

## **Module 5**

## **Électricité**







## Table des matières

Notes

<b>1</b>	<b>OBJECTIFS.....</b>	<b>1</b>
1.1	PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ÉLECTRICITÉ.....	1
1.2	TRANSFORMATEURS.....	1
1.3	ALTERNATEURS.....	2
1.4	PROTECTION.....	3
	<b>PAGE VOLONTAIREMENT LAISSÉE EN BLANC.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ÉLECTRICITÉ.....</b>	<b>5</b>
2.1	INTRODUCTION.....	5
2.2	TERMES D'ÉLECTRICITÉ.....	5
2.2.1	<i>Courant (I, ampère).....</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Potentiel (V, volt).....</i>	<i>5</i>
2.2.3	<i>Résistance (R, ohm).....</i>	<i>5</i>
2.2.4	<i>Capacité (C, farad).....</i>	<i>6</i>
2.2.5	<i>Flux magnétique (Wb, weber).....</i>	<i>6</i>
2.2.6	<i>Inductance (L, henry).....</i>	<i>7</i>
2.2.7	<i>Fréquence (f, hertz).....</i>	<i>8</i>
2.2.8	<i>Réactance (X, ohm).....</i>	<i>8</i>
2.2.9	<i>Impédance (Z, ohm).....</i>	<i>8</i>
2.2.10	<i>Puissance active (P, watt).....</i>	<i>9</i>
2.2.11	<i>Puissance réactive (Q, var).....</i>	<i>9</i>
2.2.12	<i>Puissance apparente (U, voltampère).....</i>	<i>10</i>
2.2.13	<i>Facteur de puissance (PF).....</i>	<i>10</i>
2.3	RAPPORTS ENTRE LES QUANTITÉS ÉLECTRIQUES DE BASE.....	10
2.3.1	<i>La tension par rapport à l'intensité dans une résistance, un condensateur ou un inducteur.....</i>	<i>10</i>
2.3.2	<i>Éléments d'un circuit c. c.....</i>	<i>11</i>
2.3.3	<i>Résistances.....</i>	<i>11</i>
2.3.4	<i>Condensateurs.....</i>	<i>12</i>
2.3.5	<i>Inducteurs.....</i>	<i>13</i>
2.3.6	<i>Effet transitoire.....</i>	<i>14</i>
2.4	PHASEURS.....	15
2.5	ÉLÉMENTS D'UN CIRCUIT C. A.....	16
2.5.1	<i>Résistances.....</i>	<i>16</i>

Notes

2.5.2	<i>Inducteurs</i> .....	17
2.5.3	<i>Condensateurs</i> .....	18
2.5.4	<i>Circuits à composants multiples</i> .....	20
2.5.5	<i>Mnémotechnie</i> .....	21
2.5.6	<i>La chaleur par rapport à l'intensité du courant dans une résistance</i> .....	22
2.6	<b>PUISSANCE ACTIVE, PUISSANCE RÉACTIVE, PUISSANCE APPARENTE ET FACTEUR DE PUISSANCE</b> ....	24
2.6.1	<i>Puissance active - ou réelle - mesurée watts (W)</i> .....	24
2.6.2	<i>Puissance réactive - mesurée en voltampères réactifs (var)</i> .....	24
2.6.3	<i>Puissance apparente - mesurée en voltampères (VA)</i> ..	25
2.6.4	<i>Puissance apparente</i> .....	26
2.7	<b>CHAMP MAGNÉTIQUE PRODUIT PAR UN COURANT DANS UN CONDUCTEUR</b> .....	29
2.8	<b>TENSION INDUITE SUR LES CONDUCTEURS PAR UN CHAMP MAGNÉTIQUE CHANGEANT</b> .....	30
2.8.1	<i>Fonctionnement du transformateur</i> .....	32
2.8.2	<i>Force magnétique exercée sur un conducteur par lequel passe un courant</i> .....	32
2.8.3	<i>Tension induite sur un conducteur</i> .....	34
2.9	<b>CONNEXIONS EN TRIPHASÉ</b> .....	39
2.10	<b>CIRCUITS MAGNÉTIQUES</b> .....	40
2.10.1	<i>Courant de Foucault</i> .....	40
2.10.2	<i>Hystérésis</i> .....	41
2.10.3	<i>Saturation magnétique</i> .....	41
2.11	<b>CONVERTISSEURS DE PUISSANCE</b> .....	43
2.12	<b>INSOLATION DES MACHINES</b> .....	44
2.12.1	<i>Humidité excessive</i> .....	44
2.12.2	<i>Température excessivement élevée</i> .....	45
2.13	<b>QUESTIONS DE RÉVISION - PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ÉLECTRICITÉ</b> .....	46
	<b>PAGE VOLONTAIREMENT LAISSÉE EN BLANC</b> .....	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>TRANSFORMATEURS</b> .....	<b>49</b>
3.1	<b>INTRODUCTION</b> .....	49
3.2	<b>TRANSFORMATEURS - GÉNÉRALITÉS</b> .....	49
3.2.1	<i>Puissance nominale - en VA</i> .....	49
3.2.2	<i>Refroidissement</i> .....	49
3.2.3	<i>Fréquence</i> .....	51
3.2.4	<i>Tension</i> .....	51
3.2.5	<i>Phase</i> .....	51

3.2.6	<i>Enroulements</i> .....	52
3.2.7	<i>Connexions</i> .....	52
3.2.8	<i>Prises</i> .....	53
3.3	<b>CHANGEURS DE PRISE</b> .....	54
3.3.1	<i>Changeurs de prise hors tension</i> .....	55
3.3.2	<i>Changeurs de prise sous tension</i> .....	56
3.4	<b>LIMITES DE FONCTIONNEMENT</b> .....	61
3.4.1	<i>Pertes dans les transformateurs (chaleur)</i> .....	61
3.4.2	<i>Pertes dans le cuivre (ou dans l'enroulement)</i> .....	61
3.4.3	<i>Pertes dans le fer (ou dans le noyau)</i> .....	62
3.4.4	<i>Limites de température des transformateurs</i> .....	63
3.4.5	<i>Limites de courant</i> .....	64
3.4.6	<i>Limites de tension et de fréquence</i> .....	64
3.5	<b>TRANSFORMATEURS D'INSTRUMENT</b> .....	66
3.5.1	<i>Transformateurs de potentiel</i> .....	66
3.5.2	<i>Transformateurs de courant</i> .....	66
	<b>QUESTIONS DE RÉVISION- TRANSFORMATEURS</b> .....	68
	<b>PAGE VOLONTAIREMENT LAISSÉE EN BLANC</b> .....	<b>69</b>
<b>4</b>	<b>ALTERNATEURS</b> .....	<b>70</b>
4.1	<b>INTRODUCTION</b> .....	70
4.2	<b>PRINCIPES FONDAMENTAUX DU FONCTIONNEMENT DES ALTERNATEURS</b> .....	70
4.3	<b>FONCTIONNEMENT SYNCHRONE</b> .....	71
4.3.1	<i>Champ magnétique</i> .....	71
4.3.2	<i>Forces entre les champs magnétiques</i> .....	73
4.3.3	<i>Fonctionnement d'un alternateur comme un moteur.</i> 74	
4.3.4	<i>Limites</i> .....	75
4.3.5	<i>Alternateur synchrone - Circuit équivalent</i> .....	75
4.4	<b>DIAGRAMME DE PHASEUR EN RÉGIME ÉTABLI</b> .....	76
4.4.1	<i>Augmentation du flux de vapeur</i> .....	77
4.4.2	<i>Augmentation de l'excitation</i> .....	77
4.5	<b>DÉMARRAGE DE SYNCHRONISATION PRÉALABLE AU COUPLAGE DES ALTERNATEURS</b> 78	
4.5.1	<i>Démarrage</i> .....	78
4.5.2	<i>Application du champ du rotor</i> .....	79
4.6	<b>PRÉPARATION DE LA SYNCHRONISATION</b> 81	
4.6.1	<i>Ordre des phases</i> .....	81
4.6.2	<i>Amplitude de la tension</i> .....	81
4.6.3	<i>Fréquence</i> .....	82

4.6.4	<i>Angle de phase</i> .....	83
4.7	SYNCHRONISATION .....	84
4.8	SYNCHRONISATION D'UN ALTERNATEUR .....	86
4.8.1	<i>Réaction d'induit</i> .....	87
4.8.2	<i>Élément actif</i> .....	87
4.8.3	<i>Élément de retard réactif</i> .....	87
4.8.4	<i>Élément d'avance réactif</i> .....	88
4.9	COUPLAGE AVEC UN BUS HORS TENSION ..	88
4.9.1	<i>Couplage avec un bus hors tension, avec charge à facteur de puissance en avance</i> .....	88
4.9.2	<i>Couplage avec un bus hors tension, avec charge à facteur de puissance en retard</i> .....	88
4.9.3	<i>Couplage avec un bus en court-circuit</i> .....	89
4.9.4	<i>Couplage avec un bus hors tension, sans aucune charge connectée</i> 89	
4.10	CHARGE D'UN ALTERNATEUR .....	89
4.10.1	<i>Couplage avec un circuit fini par rapport au couplage avec un réseau infini</i> .....	89
4.11	COMMANDE D'UN ALTERNATEUR PAR UN STABILISATEUR AUTOMATIQUE DE TENSION .....	90
4.11.1	<i>Action du stabilisateur automatique de tension sur la charge de l'alternateur</i> .....	92
4.11.2	<i>Charge à facteur de puissance unité</i> .....	92
4.11.3	<i>Charge en retard à facteur de puissance nul</i> .....	93
4.12	COMMANDE DU RÉGULATEUR DE VITESSE D'UN ALTERNATEUR .....	95
4.12.1	<i>Fléchissement de la vitesse</i> .....	96
4.12.2	<i>Régulateur de vitesse isochrone</i> .....	97
4.12.3	<i>Pourcentage de fléchissement de la vitesse</i> .....	98
4.12.4	<i>Pendant le démarrage</i> .....	100
4.12.5	<i>Fonction normal</i> .....	100
4.12.6	<i>Fonctionnement en parallèle avec un bus de grande taille (infini)</i> .....	100
4.12.7	<i>Fonctionnement en parallèle avec un bus fini</i> .....	103
4.13	COMMANDE COMBINÉE D'UN STABILISATEUR AUTOMATIQUE DE VITESSE ET D'UN RÉGULATEUR DE VITESSE .....	105
4.13.1	<i>Réglage du flux de vapeur sans changement de l'excitation</i> .....	105
4.13.2	<i>Réglage de l'excitation sans changement du flux de vapeur</i> 106	
4.14	STABILITY DES ALTERNATEURS.....	108
4.15	ALTERNATEUR DÉCALÉ .....	110

4.16	ALTERNATEURS - PRODUCTION DE CHALEUR ET CONDITIONS DÉFAVORABLES .....	112
4.16.1	<i>Limite de chauffage du rotor.....</i>	<i>113</i>
4.16.2	<i>Limite de chauffage du stator .....</i>	<i>113</i>
4.16.3	<i>Limite de chauffage des alternateurs.....</i>	<i>114</i>
4.16.4	<i>Refroidissement du rotor et du stator des alternateurs</i>	<i>117</i>
4.17	ARRÊT DES ALTERNATEURS.....	119
4.18	QUESTIONS DE RÉVISION - ALTERNATEURS .....	121
	<b>PAGE VOLONTAIREMENT LAISSÉE EN BLANC.....</b>	<b>123</b>
<b>5</b>	<b>PROTECTION ÉLECTRIQUES .....</b>	<b>124</b>
5.1	INTRODUCTION .....	124
5.2	BUT DES PROTECTIONS ÉLECTRIQUES.....	125
5.3	QUALITÉS ESSENTIELLES DES PROTECTIONS ÉLECTRIQUES.....	126
5.3.1	<i>Vitesse .....</i>	<i>126</i>
5.3.2	<i>Fiabilité.....</i>	<i>126</i>
5.3.3	<i>Sécurité .....</i>	<i>126</i>
5.3.4	<i>Sensibilité.....</i>	<i>126</i>
5.4	ZONES DE PROTECTION .....	127
5.5	PROTECTION DES DISJONCTEURS .....	130
5.5.1	<i>Protections redondantes A et B.....</i>	<i>131</i>
5.6	PROTECTIONS DES BUS .....	132
5.6.1	<i>Protection différentielle des bus .....</i>	<i>133</i>
5.6.2	<i>Protection de secours de bus .....</i>	<i>135</i>
5.6.3	<i>Défauts à la terre des buss.....</i>	<i>137</i>
5.6.4	<i>Protection des bus contre la sous-tension .....</i>	<i>138</i>
5.7	PROTECTION DES TRANSFORMATEURS ....	139
5.7.1	<i>Protection des transformateurs contre la surintensité instantanée .....</i>	<i>140</i>
5.7.2	<i>Protection différentielle des transformateurs .....</i>	<i>140</i>
5.7.3	<i>Relais à gaz pour transformateurs.....</i>	<i>142</i>
5.7.4	<i>Gaz produits à cause des défauts.....</i>	<i>143</i>
5.7.5	<i>Surcharge thermique des transformateurs.....</i>	<i>145</i>
5.7.6	<i>Protection des transformateurs contre les défauts à la terre</i>	<i>146</i>
5.8	PROTECTION DES MOTEURS.....	147
5.8.1	<i>Protection des moteurs contre la surintensité instantanée .....</i>	<i>147</i>

Notes

5.8.2	<i>Protection des moteurs contre la surintensité prolongée</i>	148
5.8.3	<i>Surcharge thermique.....</i>	149
5.8.4	<i>Protection des moteurs contre les défauts à la terre</i>	151
5.8.5	<i>Protection des moteurs contre le calage.....</i>	152
5.8.6	<i>Protection des moteurs contre l'excès de flux magnétique.....</i>	154
5.9	<b>PROTECTION DES ALTERNATEURS .....</b>	156
5.9.1	<i>Classes de déclenchement des alternateurs à turbine</i>	156
5.9.2	<i>Surintensité des alternateurs.....</i>	157
5.9.3	<i>Protection différentielle des alternateurs .....</i>	158
5.9.4	<i>Protection des alternateurs contre les défauts à la terre</i>	159
5.9.5	<i>Protection à la terre du rotor.....</i>	160
5.9.6	<i>Protection des alternateurs contre le déséquilibre des phases</i>	161
5.9.7	<i>Protection des alternateurs contre la perte de champ</i>	162
5.9.8	<i>Protection des alternateurs contre la surexcitation..</i>	163
5.9.9	<i>Protection des alternateurs contre la sous-fréquence</i>	163
5.9.10	<i>Protection des alternateurs contre le décalage .....</i>	164
5.9.11	<i>Protection des alternateurs contre l'inversion de puissance</i>	164
5.10	<b>QUESTIONS DE RÉVISION - PROTECTIONS ÉLECTRIQUES .....</b>	166





## MODULE 5

Notes

### INTRODUCTION

Ce module porte sur les domaines suivants de l'électricité :

- Principes fondamentaux
- Transformateurs
- Alternateurs
- Protections

À la fin de l'étude de ce module, les participants auront les aptitudes suivantes :

## 1 OBJECTIFS

### 1.1 PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ÉLECTRICITÉ

- expliquer les termes d'électricité suivants : courant, potentiel, résistance, capacité, flux magnétique, inductance, fréquence, réactance, impédance, puissance active, puissance réactive, puissance apparente, facteur de puissance;
- identifier les unités de mesure utilisées en électricité;
- expliquer les rapports existant entre les quantités électriques;
- expliquer comment l'humidité et la température excessives exercent leur influence sur l'isolant des machines électriques et sur la résistance des matériaux utilisés dans ces machines;

### 1.2 TRANSFORMATEURS

- expliquer de quelle façon les changeurs de prise permettent de changer le rapport de tension entre l'entrée et la sortie;
- expliquer les limites du fonctionnement des changeurs de prises hors tension;
- identifier les causes de surchauffe des transformateurs;
- expliquer les conditions d'un fonctionnement ayant une influence sur la production de chaleur;
- identifier les limites d'utilisation des transformateurs.

### 1.3 ALTERNATEURS

- expliquer pourquoi l'excitation ne peut être appliquée que si l'alternateur tourne à sa vitesse nominale ou presque;
- expliquer pourquoi la valeur des paramètres électriques doit se trouver dans des limites acceptables pour qu'un alternateur puisse être couplé sur un réseau de distribution électrique;
- identifier la façon d'interpréter les indications d'un synchroscope pour être sûr de pouvoir fermer le disjoncteur;
- expliquer comment réagit un alternateur lorsque son disjoncteur est fermé au contact d'un bus hors tension auquel sont raccordées des charges capacitatives ou inductives;
- indiquer pourquoi les charges électriques doivent être déconnectées avant qu'un bus ne soit mis sous tension;
- donner la définition d'un bus fini et d'un bus infini;
- expliquer de quelle façon la tension appliquée aux bornes d'un alternateur est commandée automatiquement;
- décrire la fonction d'un régulateur de turbine;
- indiquer comment le changement de la puissance à l'arbre de la turbine ou le changement du courant d'excitation d'un alternateur couplé à un réseau infini influence les paramètres rattachés à cette turbine;
- décrire les éléments qui ont une influence sur la limite de régime établi et la stabilité dynamique des alternateurs et des lignes de distribution électriques;
- expliquer pourquoi des limites sont imposées aux paramètres rattachés aux alternateurs;
- décrire les changements qui se produisent lors du rejet d'une charge à la puissance de sortie utile;
- décrire la réaction des circuits de commande de la vitesse et de la tension pendant un rejet à la puissance maximale;
- expliquer pourquoi de la chaleur est produite par les éléments d'un alternateur et les conséquences d'une production excessive de chaleur;
- expliquer comment la chaleur du rotor et du stator est dissipée;
- expliquer pourquoi la conductivité de l'eau du stator doit être limitée;

- énoncer les conséquences d'un dépassement de la limite de conductivité;
- expliquer comment l'eau ou l'air qui pénétrerait dans l'alternateur risquerait de diminuer les capacités d'isolation et de refroidissement de cet alternateur par l'hydrogène.

#### 1.4 PROTECTION

- expliquer comment la protection différentielle permet de protéger un bus;
- indiquer pourquoi la protection différentielle, la protection de secours contre les surintensités, la protection contre les défauts à la terre et la protection contre la sous-tension sont nécessaires pour protéger les bus de distribution électrique;
- indiquer pourquoi la protection de surintensité instantanée, la protection différentielle, les relais à gaz, la protection contre les surcharges thermiques et la protection contre les défauts à la terre sont nécessaires pour protéger les transformateurs d'électricité;
- indiquer pourquoi la protection contre les surintensités instantanées, la protection à action différée contre les surintensités, la protection contre les surcharges thermiques, la protection contre les défauts à la terre, la protection contre le calage et la protection contre l'excès de flux magnétique sont nécessaires pour protéger les moteurs électriques;
- indiquer pourquoi il est acceptable de réenclencher immédiatement le relais de surcharge thermique d'un moteur électrique et pas le relais de surintensité instantanée;
- indiquer quand un déclenchement de turbine de classe A, B, C ou D peut se produire;
- expliquer pourquoi la surintensité, la protection différentielle, les défauts à la terre, le déséquilibre de phase, la perte de champ, la surexcitation, la sous-fréquence, le glissement de pôle, l'inversion de puissance et les défauts à la terre au rotor sont des éléments à utiliser pour protéger les alternateurs.

Notes

**PAGE VOLONTAIREMENT LAISSÉE EN BLANC**

## **2 PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ÉLECTRICITÉ**

### **2.1 INTRODUCTION**

Le premier chapitre donne la définition des quantités électriques élémentaires (ampère, volt, watt, var, facteur de puissance, etc.) et indique les relations qui existent entre ces quantités. Il traite également de la théorie de l'électricité c. a. et c. c. qui forme la base théorique du fonctionnement des appareils électriques (moteurs, transformateurs, alternateurs, convertisseurs de puissance et alimentations sans coupure).

### **2.2 TERMES D'ÉLECTRICITÉ**

Ce qu'on désigne habituellement par « électricité » n'est en réalité qu'un mouvement d'électrons. Commençons donc par là.

#### **2.2.1 Courant (I, ampère)**

Comme son nom l'indique, le courant est l'intensité (I) du mouvement ou de la circulation des électrons. L'unité de mesure de l'intensité est l'ampère. Cette unité est habituellement représentée sous forme abrégée par la lettre A. La circulation des électrons d'un courant électrique peut être assimilée à celle des molécules d'un cours d'eau.

Pour déplacer quoi que ce soit, un potentiel est nécessaire. Cette règle s'applique aussi aux électrons.

#### **2.2.2 Potentiel (V, volt)**

Le potentiel est la force qui commande le déplacement des électrons (elle s'appelle force électromotrice ou F.E.M.). Cette force se mesure par la tension qu'elle exerce. L'unité de mesure de la tension est le volt. Cette unité est représentée sous forme abrégée par la lettre V.

#### **2.2.3 Résistance (R, ohm)**

La résistance caractérise les matériaux qui résistent à la circulation du courant. Elle équivaut à la friction en mécanique. L'unité de mesure de la résistance est l'ohm (du savant qui lui a donné son nom). Cette unité est parfois indiquée par son symbole officiel ( $\Omega$ ). Sa forme abrégée est toujours la lettre R. La valeur de la résistance ne dépend pas seulement

Notes

du matériau utilisé comme conducteur mais aussi de sa taille et de sa température.

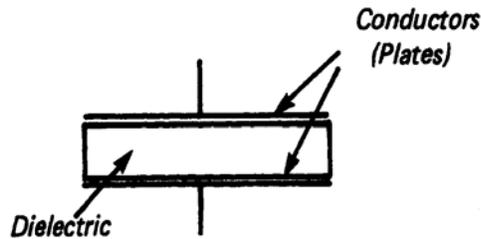
Une augmentation de la section augmente la résistance.

Une augmentation de la longueur augmente la résistance.

- Une augmentation de la température augmente la résistance (avec la plupart des matériaux conducteurs d'électricité).

#### 2.2.4 Capacité (C, farad)

Deux conducteurs séparés par un matériau isolant forment un condensateur. La capacité d'un condensateur est sa faculté de garder des électrons ou une charge. L'unité de mesure de la capacité des condensateurs est le farad. La valeur des condensateurs est habituellement indiquée en microfarads ( $\mu\text{F}$ ) et en picofarads (pF). La capacité d'un condensateur dépend de sa construction.



Conductors (Plates) = Conducteurs (plaques)      Dielectric = Diélectrique

**Figure 1**  
**Condensateur**

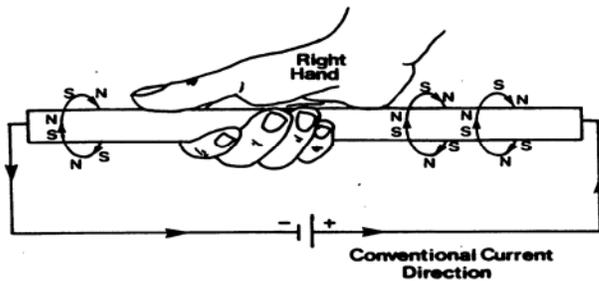
- Plus les plaques sont rapprochées, plus la capacité est grande.
- Plus la surface des plaques est grande, plus la capacité est grande.

#### 2.2.5 Flux magnétique (Wb, weber)

Si un courant circule dans un conducteur, un champ magnétique se forme autour de ce conducteur. Ce champ est habituellement représenté par des lignes de force magnétique. Le terme flux magnétique s'applique à la mesure de la circulation magnétique à l'intérieur du champ. Cette définition est comparable à celle du courant ou de la circulation des électrons, mais dans un champ magnétique. La figure suivante illustre la direction du flux magnétique

autour d'un conducteur et l'application de la règle de la main droite, qui est facile à mémoriser.

Si le conducteur est saisi en imagination avec le pouce orienté dans le sens de la circulation du courant, les autres doigts s'enroulent autour du conducteur dans la même direction que le flux magnétique.



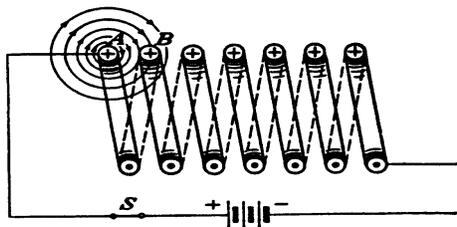
Right Hand = Main droite      Conventional Current Direction = Direction conventionnelle du courant

**Figure 2**

### Lignes de force magnétique

Les lignes de force magnétique ont un effet sur les conducteurs adjacents et aussi sur elles-mêmes.

Cette effet est plus prononcé si le conducteur s'enroule sur lui-même comme une bobine.



**Figure 3**

### Auto-inductance magnétique

Tout conducteur par lequel passe un courant et qui est enroulé de cette façon forme un inducteur, nom qui vient du fait que ce conducteur induit un courant en lui-même (auto-inductance) ou dans d'autres conducteurs.

#### 2.2.6 Inductance (L, henry)

La force qui s'oppose à la circulation du courant dans un inducteur est l'inductance. L'inductance caractérise les circuits au même titre que la résistance. L'inductance s'oppose à tout changement de circulation du

courant. L'unité d'inductance est le henry (H). Le symbole de l'inductance est la lettre L.

### 2.2.7 Fréquence (f, hertz)

Les circuits électriques peuvent être classés en deux catégories. Celle du courant continu (c. c.) et celle du courant alternatif (c. a.). Avec les circuits c. c., le courant ne circule que dans un sens. Une source d'énergie, comme une pile ou une batterie, maintient une force électromotrice constante. La plupart des circuits fonctionnent en c. a.

La fréquence est la cadence du changement du sens de circulation du courant. Elle est représentée en abrégé par la lettre f. L'unité de mesure de la fréquence est le hertz (Hz).

### 2.2.8 Réactance (X, ohm)

La force qui s'oppose à la circulation du courant alternatif (c. a.) dans les condensateurs et les inducteurs s'appelle la réactance. Le symbole de la réactance capacitive est  $X_C$  et celui de la réactance inductive est  $X_L$ .

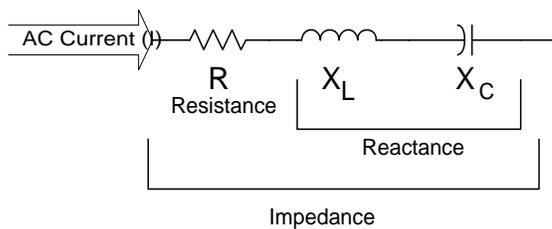
Sans entrer dans le détail de la dérivation des valeurs de réactance, disons qu'il est possible de prouver les égalités suivantes (dans lesquelles f représente la fréquence d'un courant c. a.) :

$$X_L = 2 \pi f L$$

$$X_C = 1/2\pi f C$$

### 2.2.9 Impédance (Z, ohm)

L'effet d'opposition totale, ou l'effet combiné de l'impédance d'une résistance et d'une réactance exercé sur la circulation d'un courant alternatif s'appelle l'impédance. L'impédance est représentée en abrégé par la lettre Z. L'unité d'impédance est l'ohm. Le rapport entre ces éléments peut être illustré par le circuit en série suivant :



AC Current = Courant c. a. RESISTANCE = RÉSISTANCE REACTANCE = RÉACTANCE IMPEDANCE = IMPÉDANCE

**Figure 4**  
**Impédance**

### 2.2.10 Puissance active (P, watt)

Au lieu d'employer directement le terme d'énergie électrique, on emploie habituellement la quantité d'énergie utilisée pendant un certain temps, ce qui définit la puissance. Il existe trois éléments de puissance : la puissance active, la puissance réactive et la puissance apparente.

La puissance active, ou puissance réelle, est la vitesse de consommation de l'énergie utilisée pour effectuer un travail utile. Par exemple, si un courant circule à travers une résistance, de la chaleur est produite.

La puissance active est symbolisée par la lettre P. Son unité de mesure est le watt.

### 2.2.11 Puissance réactive (Q, var)

La puissance réactive est la puissance produite par un courant circulant à travers des éléments réactifs (inductance ou capacité). Elle est symbolisée par la lettre Q. Son unité de mesure est le voltampère réactif (var).

La puissance réactive peut être également vue comme la vitesse d'un échange d'énergie entre une charge capacitive ou inductive et un alternateur ou entre des condensateurs des inducteurs.

La puissance réactive ne produit aucun travail réel, mais elle représente une force nécessaire pour les alternateurs, les moteurs et les transformateurs. L'exemple en est donné par le chargement et le déchargement des condensateurs ou des bobines. Un transfert d'énergie a bien lieu, mais aucune puissance n'est consommée ni produite, contrairement à ce qui se passerait avec une résistance.

### 2.2.12 Puissance apparente (U, voltampère)

La puissance apparente est la puissance totale ou la puissance combinée qu'un courant produit en circulant à travers n'importe quelle combinaison d'éléments passifs ou réactifs. Elle est symbolisée par la lettre U. Son unité de mesure est le voltampère (VA).

### 2.2.13 Facteur de puissance

#### Puissance réelle / puissance apparente

Le rapport de puissance est le rapport de la puissance réelle à la puissance apparente.

- Avec une résistance, aucune puissance réactive n'est consommée. La puissance apparente utilisée est donc entièrement réelle. Le facteur de puissance est dans ce cas égal à 1. Il porte alors le nom de facteur de puissance unité.
- Avec un inducteur ou un condensateur pur, la puissance apparente consommée est entièrement réactive (la puissance réelle est nulle). Le facteur de puissance est dans ce cas égal à 0.
- Si la puissance est consommée par une impédance formée d'une résistance, d'une inductance et d'une capacité, le facteur de puissance se situe quelque part entre ces deux limites, à un point variant d'un circuit à l'autre.

L'efficacité de la consommation de la puissance augmente à mesure que le facteur de puissance s'approche du facteur de puissance unité.

## 2.3 RAPPORTS ENTRE LES QUANTITÉS ÉLECTRIQUES DE BASE

### 2.3.1 La tension par rapport à l'intensité dans une résistance, un condensateur ou un inducteur

Les éléments d'un circuit électrique se comportent différemment selon qu'ils sont exposés à un courant continu ou à un courant alternatif. Pour faciliter les explications, ces dispositifs sont souvent comparés à des objets faciles à imaginer.

- Les résistances d'un circuit électriques peuvent être comparées à des rochers situés dans un cours d'eau.
- Un condensateur peut être comparé à une rame plongée dans un cours d'eau.
- L'action d'un inducteur est similaire à celle d'un ressort hélicoïdal.

### 2.3.2 Éléments d'un circuit c. c.

Voyons pour commencer un simple circuit c. c. alimenté par une force électromotrice constante (une pile) et comprenant trois éléments de base agencés de deux façons (en série et en parallèle).

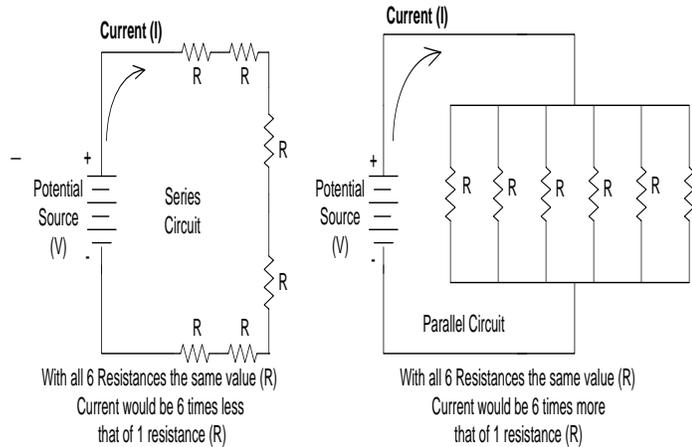
### 2.3.3 Résistances

En circulant à travers les résistances, de la même façon qu'un cours d'eau passe par des rochers, le courant dissipe une partie de son énergie. Si les rochers sont disposés dans le cours d'eau à la façon de ceux d'un rapide, une résistance importante est offerte à l'écoulement de l'eau. Mais si le même nombre de rochers est placé en travers du cours d'eau, la résistance générale offerte à l'écoulement de l'eau est moindre.

Les schémas suivants illustrent le principe simple mais fondamental qui régit la plupart des circuits électriques. Le potentiel nécessaire pour forcer un courant de 1 ampère à travers une résistance de 1 ohm est égal à 1 volt (loi d'Ohm), ce qui peut prendre la forme de l'équation  $V=IR$ .

Avec le circuit en série (à gauche), le même courant circule à travers chacune des résistances, mais la tension appliquée se divise entre elles. Avec le circuit en parallèle (à droite), la même tension est appliquée à toutes les résistances, mais le courant se divise entre elles.

Notes



Current (I) = Courant (I)    Potential Source (V) = Source de potentiel (V)    Series Circuit = Circuit en série  
 With all 6 Resistances the same value (R) Current would be 6 times less that of 1 resistance (R)  
 = Avec 6 résistances identiques (R), le courant est 6 fois plus petit qu'avec une résistance (R)  
 Current (I) = Courant (I)    Potential Source (V) = Source de potentiel (V)    Parallel Circuit = Circuit en parallèle  
 With all 6 Resistances the same value (R) Current 6 times more that of resistance (R)  
 = Avec 6 résistances identiques (R), le courant est 6 fois plus grand qu'avec une résistance (R)

**Figure 5**

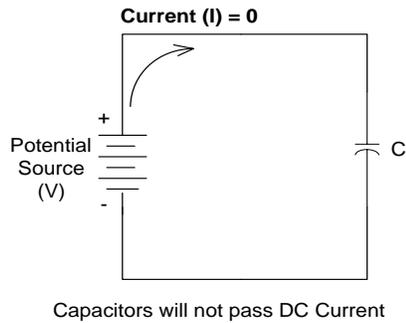
**Circuit à résistances c. c.**

La résistance totale des circuits en série s'exprime par la formule  $R_{\text{totale}} = R_1 + R_2 + (\text{etc.})$ . Dans notre exemple de circuit,  $R_{\text{totale}} = 6R$ .

- La résistance des circuits en parallèle s'exprime par la formule  $1/R_{\text{totale}} = 1/R_1 + 1/R_2 + (\text{etc.})$ . Dans notre exemple de circuit,  $1/R_{\text{totale}} = 6/R$  ou  $R_{\text{totale}} = R/6$ .
- La même théorie s'applique aux circuits constitués de sous-circuits en série et en parallèle, mais le calcul de ces circuits est plus long.

**2.3.4 Condensateurs**

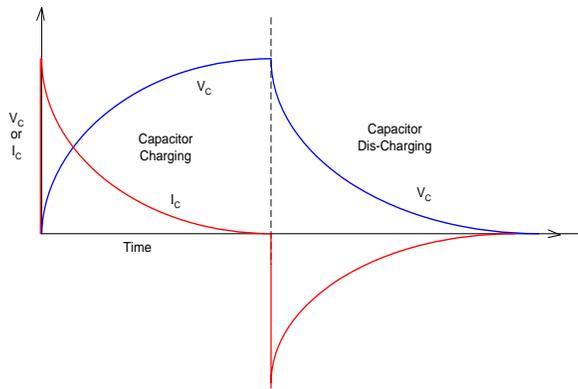
Comme nous l'avons déjà vu, les condensateurs sont physiquement constitués de deux surfaces conductrices séparées par un isolant. Les condensateurs d'un circuit électrique sont dans un état permanent et ont un effet transitoire sur ce circuit. Comme les conducteurs d'un condensateur ne sont pas physiquement en contact, ils ne permettent pas au courant de passer directement après un temps assez long. L'effet est le même que celui d'une rame plongée dans un cours d'eau - elle bloque le passage de l'eau. Mais au moment même où une tension est appliquée aux bornes d'un condensateur, le courant passe pendant le temps que ce condensateur se charge. Cet effet est dit transitoire.



Current (I) = 0 = Courant (I) = 0    Potential Source (V) = Source de potentiel (V)  
 Capacitors will not pass DC Current = Le condensateur ne laisse pas passer le courant c. c.

**Figure 6**

**État permanent de la capacité d'un circuit c. c.**



Capacitor Charging = Condensateur qui se charge    Capacitor Dis-Charging = Condensateur qui se décharge  
 Time = Temps     $V_c$  or  $I_c = V_c$  ou  $I_c$

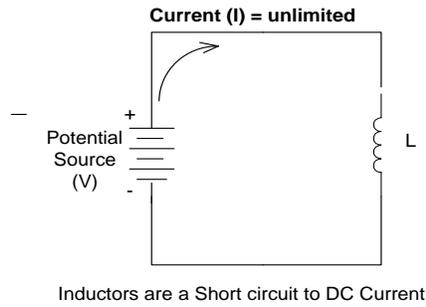
**Figure 7**

**Effet transitoire de la capacité d'un circuit c. c.**

**2.3.5 Inducteurs**

L'inducteur de la figure 8 est similaire à un ressort hélicoïdal et n'oppose aucune résistance quand l'état du circuit est permanent. Si une force permanente lui est appliquée, l'inducteur peut laisser passer une quantité phénoménale d'énergie en n'étant limité que par les possibilités de l'alimentation électrique ou par sa propre robustesse. Un inducteur ne doit être placé dans un circuit qu'en usant de précautions car il n'oppose aucune résistance à la circulation du courant, ce qui peut provoquer l'appauvrissement de la source d'énergie ou endommager cet inducteur. Mais au moment même où une tension est appliquée aux bornes d'un inducteur, celui-ci empêche le courant de circuler dans le circuit.

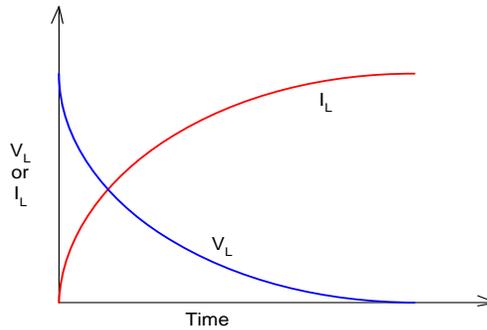
Notes



Current (I) = Unlimited = Courant (I) = illimité    Potential Source (V) = Source de potentiel to DC Current = Les inducteurs sont des courts-circuits pour le courant c. c.    Inductors are a Short circuit to DC Current

**Figure 8**

**État permanent de l'inductance d'un circuit c. c.**



$V_L$  or  $I_L$  =  $V_L$  ou  $I_L$     Time = Temps

**Figure 9**

**Effet transitoire de l'inductance d'un circuit c. c.**

**2.3.6 Effet transitoire**

L'effet transitoire produit par les condensateurs et les inducteurs vient de l'énergie emmagasinée dans le circuit électrique. L'énergie est emmagasinée sous deux formes : sous la forme d'une charge électrique dans les condensateurs et sous la forme d'un champ magnétique dans les inducteurs. La quantité d'énergie emmagasinée dans un inducteur dépend du courant circulant à travers le circuit. La quantité d'énergie emmagasinée dans un condensateur dépend de la tension qui appliquée à ses bornes. Si l'état du circuit change, la quantité d'énergie emmagasinée dans l'élément change et un effet transitoire se produit.

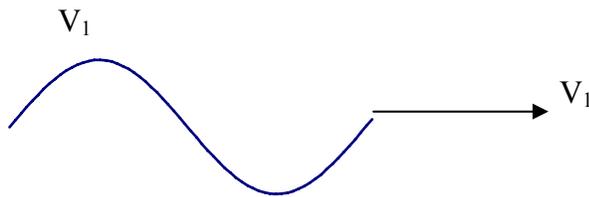
On peut imaginer les effets transitoires comme une opposition aux changements de la circulation du courant dans un circuit de la part des inducteurs et comme une opposition aux changements de tension de la part des condensateurs. Dans les circuits c. c. les plus courants, les

inducteurs et les condensateurs peuvent être pris pour des objets bizarres car leur effet est négligeable. Mais dans les circuits c. a., comme le courant change continuellement, les condensateurs et les enroulements ont des effets continus sur ces circuits.

Notes

## 2.4 PHASEURS

Les tensions et les intensités des circuits c. a. changent continuellement de façon sinusoïdale. Avec la théorie du courant c. a., nous sommes concernés par l'amplitude des courbes de tension et d'intensité sinusoïdales, mais nous sommes également concernés par la phase (l'angle entre les crêtes) rattachée à ces courbes. Il existe de nombreuses méthodes mathématiques pour représenter ces courbes sinusoïdales. La méthode utilisée le plus souvent en électricité est celle du diagramme de phaseur.



**Figure 10**  
**Courbe sinusoïdale et phaseur**

## Notes

Un phaseur ressemble beaucoup à un vecteur, mais ce n'en est pas un. Un vecteur représente une grandeur et une direction. Un phaseur représente une grandeur et un angle. La manipulation des quantités rattachées aux phaseurs (addition ou soustraction) obéit cependant aux mêmes règles que celles des vecteurs. La représentation d'une courbe sinusoïdale par un phaseur peut paraître un peu irréaliste, mais pour comparer des courbes sinusoïdales, rien n'est plus pratique.

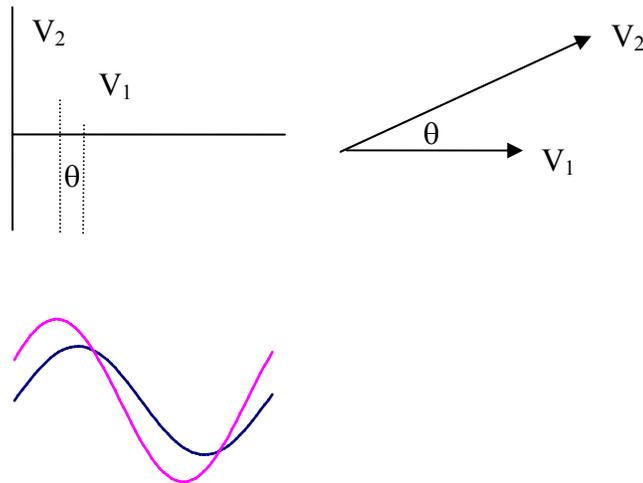


Figure 11

### Représentation de deux tensions par un phaseur

La figure 11 illustre un diagramme de phaseur représentant deux tensions qui ne sont pas en phase et dont l'amplitude n'est pas égale. Nous voyons dans ce diagramme que  $V_2$  est plus grand que  $V_1$  et que  $V_2$  devance  $V_1$  par l'angle  $\theta$ .

## 2.5 ÉLÉMENTS D'UN CIRCUIT c. a.

### 2.5.1 Résistances

Les dispositifs résistifs se comportent en c. a. de la même façon que nous l'avons vu précédemment en c. c. et de grandes quantités d'énergie sont dissipées par ces dispositifs.

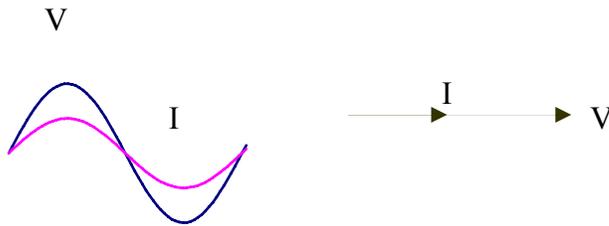


Figure 12

### Représentation d'un circuit résistif par un phaseur

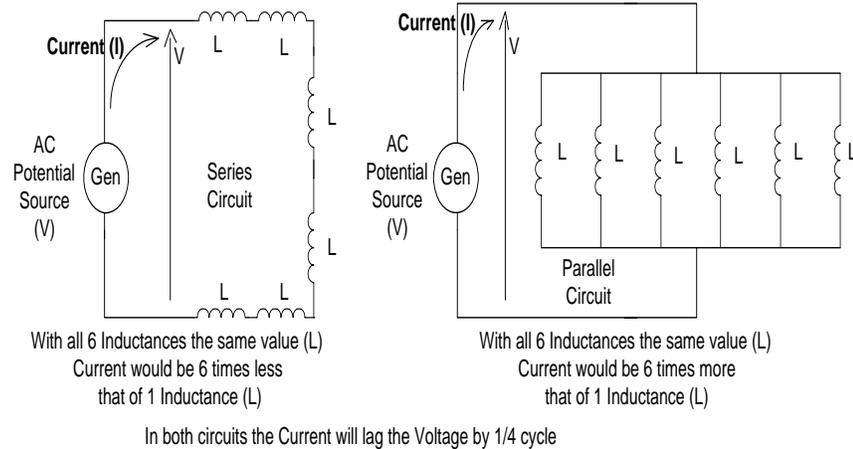
#### 2.5.2 Inducteurs

Les inducteurs retardent la circulation du courant mais ne retirent aucune énergie de ce courant.

Ce processus est similaire à la poussée exercée sur une extrémité d'un ressort hélicoïdal. Cette poussée est retardée à l'autre extrémité du ressort, mais l'énergie produite par le ressort est égale à celle qui lui a été appliquée.

Si plusieurs inducteurs sont montés en série ou si la taille d'un inducteur est augmentée, l'effet augmente (comme avec un ressort plus long) et entrave un peu plus le mouvement. Si des inducteurs sont montés en parallèle, l'effet diminue (comme avec plusieurs ressorts en parallèle). Les inducteurs (ou les ressorts) utilisent de l'énergie, même s'ils n'en consomment pas. Comme le montrent les schémas suivants, les circuits c. a. inductifs obéissent à la loi d'Ohm de la même façon que les résistances.  $X_L$  représente la réactance inductive d'un inducteur dans la formule que nous avons déjà vue :  $V = I X_L$ .

Notes



Current (I) = Courant (I)    AC Potential Source (V) = Source de potentiel c. a. (V)  
 Gen = Alternateur    Series Circuit = Circuit en série  
 With all 6 Inductances the same value (L) Current would be 6 times less that of 1 Inductance (L)  
 = Avec 6 inductances de même valeur (L), le courant est 6 fois plus petit qu'avec une inductance (L)  
 Current (I) = Courant (I)    AC Potential Source (V) = Source de potentiel c. a. (V)  
 Gen = Alternateur    Parallel Circuit = Circuit en parallèle  
 With all 6 Inductances the same value (L) Current would be 6 times more that of 1 Inductance (L)  
 = Avec 6 inductances de même valeur (L), le courant est 6 fois plus grand qu'avec une inductance (L)  
 In both circuits the Current will lag the Voltage by 1/4 cycle  
 = Dans les deux circuits le courant est en retard sur la tension par 1/4 de cycle

**Figure 13**  
**Circuit à inductances c. a.**

Ce qu'il faut bien garder en tête, c'est l'action retardée. Le courant circulant dans un inducteur est retardé par rapport à la tension, comme l'indique le schéma suivant :



**Figure 14**  
**Phaseurs d'un circuit inductif**

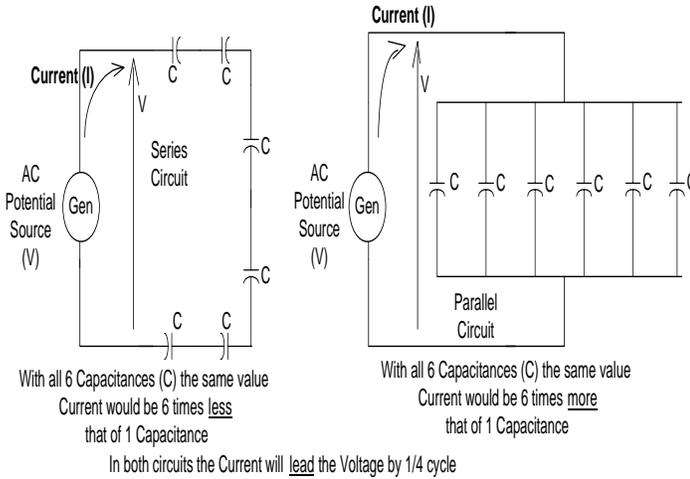
### 2.5.3 Condensateurs

La rame d'une barque :

Les condensateurs peuvent être imaginés comme une rame plongée dans l'eau et utilisée pour ramer. Le mouvement de l'eau se produit à l'avant de la force produite par la rame de la même façon que le courant commence à circuler avant que la tension ne soit complètement appliquée. Plus la rame est grande ou plus le nombre de

rames placées en parallèle est important, plus le mouvement du courant est important.

Un condensateur ou une rame en action utilise de l'énergie mais n'en consomme pas. Comme le montrent les schémas suivants, les circuits c. a. capacitifs obéissent à la loi d'Ohm de la même façon que les résistances.  $X_C$  représente la réactance capacitive d'un condensateur dans la formule que nous avons déjà vue :  $V = I X_C$ .

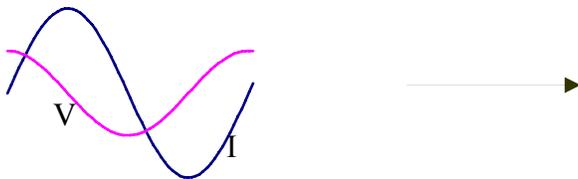


Current (I) = Courant (I) AC Potential Source (V) = Source de potentiel (V)  
Gen = Alternateur Series Circuit = Circuit en série  
With all 6 Capacitances (C) the same value (L) Current would be 6 times less that of 1 Capacitance  
= Avec 6 condensateurs (C) de même valeur (L), le courant est 6 fois plus petit qu'avec 1 condensateur  
Current (I) = Courant (I) AC Potential Source (V) = Source de potentiel c. a.  
Gen = Alternateur Parallel Circuit = Circuit en parallèle  
With all 6 Capacitances the same value (L) Current would be 6 times more that of 1 Capacitance  
= Avec 6 condensateurs (C) de même valeur (L), le courant est 6 fois plus grand qu'avec 1 condensateur  
In both circuits the Current will ad the Voltage by 1/4 cycle  
= Dans les deux circuits, le courant s'ajoute à la tension par 1/4 de cycle

**Figure 15**

**Circuit à capacitances c. a.**

Ce qu'il faut bien garder en tête, c'est l'action retardée. Le courant circulant dans un condensateur est en avance par rapport à la tension, comme l'indique le schéma suivant. C'est exactement le contraire avec un inducteur. Les condensateurs et les inducteurs s'appellent pour cette raison dispositifs complémentaires.



### Figure 16 Phaseurs d'un circuit capacitif

**Nota :** Avec les circuits électriques c. a., le retard du courant traversant un inducteur idéal ou l'avance du courant traversant un condensateur idéal est de  $1/4$  de cycle constant.

#### 2.5.4 Circuits à composants multiples

En pratique, tous les circuits c. a. comprennent une combinaison d'inducteurs, de condensateurs et de résistances. Le courant peut être décalé de n'importe angle, d'une avance de  $90^\circ$  à un retard de  $90^\circ$  par rapport à la tension. La plupart des circuits sont inductifs dans l'ensemble et ont un angle de phase voisinant les  $20$  à  $30^\circ$ .

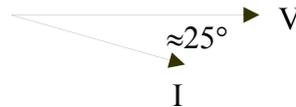
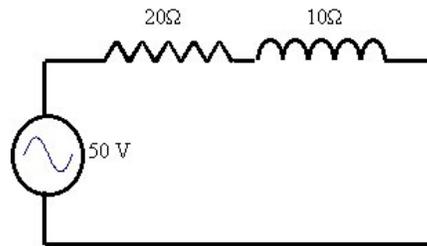


Figure 17

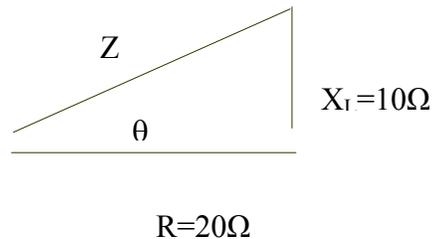
#### Diagramme de phaseur d'un circuit c. a. représentatif

Avec un circuit doté d'une combinaison de résistances, d'inductances et de capacités, le déphasage entre la tension et le courant dépend de la taille relative des composants. Le déphasage de  $90^\circ$  entre les éléments réactifs et inductifs peut rendre l'arithmétique des calculs quelque peu fastidieux avec les circuits complexes. Cependant, avec de la persévérance et de la ténacité, toutes les caractéristiques des circuits peuvent être réduites à une seule tension et à une résistance et un condensateur ou un inducteur montés en série. Voyons ici comment résoudre les problèmes posés par ce type de circuit.

Partons du principe que nous avons une résistance de  $20 \Omega$  montée en série avec un inducteur de  $10 \Omega$ . Ce montage en série est alimenté par une source de 50 volts. Quel est l'angle de phase entre le potentiel et le courant du circuit?

**Figure 18****Circuit électrique simple**

Comme les éléments constituant l'impédance causent un déphasage de  $90^\circ$ , les valeurs de ces éléments ne peuvent pas se calculer par une simple somme arithmétique, mais par le fameux théorème de Pythagore.

**Figure 19****Triangle d'impédances**

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 10^2} = 22.4\Omega$$

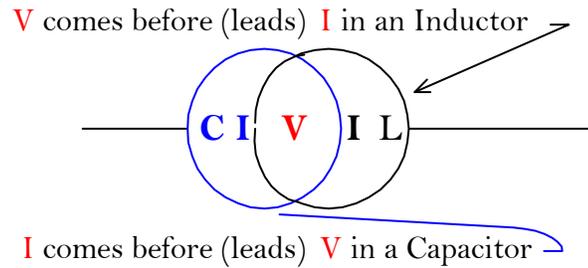
$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} = \tan^{-1} \frac{10}{20} = 26.6^\circ$$

Comme le circuit est inductif, le courant a un retard de  $26,6^\circ$  par rapport à la tension.

**2.5.5 Mnémotechnie**

Le mot CIVIL permet de la manière indiquée ci-dessous de se souvenir facilement du rapport existant entre la tension et le courant, avec les condensateurs et les inducteurs :

Notes



V comes before (leads) I in an Inductor = V précède I avec un inducteur  
 I comes before (leads) V in a Capacitor = I précède V avec un condensateur

**Figure 20**

**Mnémotechnie : CIVIL**

### 2.5.6 La chaleur par rapport à l'intensité du courant dans une résistance

Il est impossible de détruire l'énergie. Elle passe d'une forme à l'autre. La chaleur est une des formes d'énergie les plus connues. Si un courant (I) est forcé à travers une résistance (R) par l'application d'un potentiel (V), l'énergie électrique est convertie en énergie thermique, comme l'indique l'augmentation de la température de la résistance. Rappelons-nous que la puissance est la vitesse à laquelle l'énergie est consommée. L'énergie dissipée par la résistance équivaut donc à la puissance consommée par cette résistance multipliée par le temps que dure la circulation du courant.

Dans ce cas, la puissance électrique (en watts) consommée par une résistance équivaut au produit de la tension appliquée aux bornes de cette résistance par l'intensité du courant circulant à travers elle. Cette puissance a pour nom puissance active ou puissance réelle.

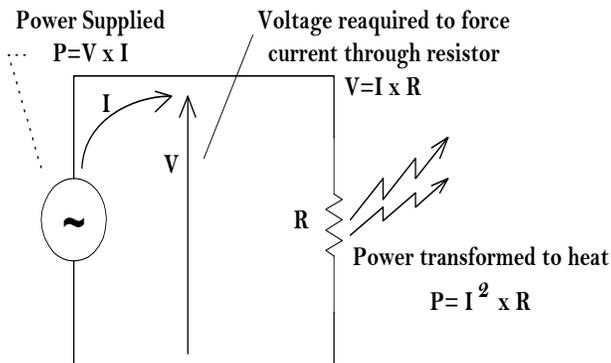
Nota : La chaleur peut être produite que par une charge résistive (friction électrique) mais pas par une charge inductive ou capacitive.

La valeur de la puissance réelle (P) consommée par la résistance se calcule de la façon suivante :

$$\text{Puissance} = \text{tension} \times \text{intensité} \quad (P = V \times I)$$

Nous savons déjà qu'une tension (V) doit être appliquée pour forcer le passage d'un courant (I) à travers une résistance (R). Nous pouvons donc définir la puissance d'une autre façon :

$$\text{Puissance} = (\text{intensité})^2 \times \text{résistance} \quad (P = I^2 \times R)$$

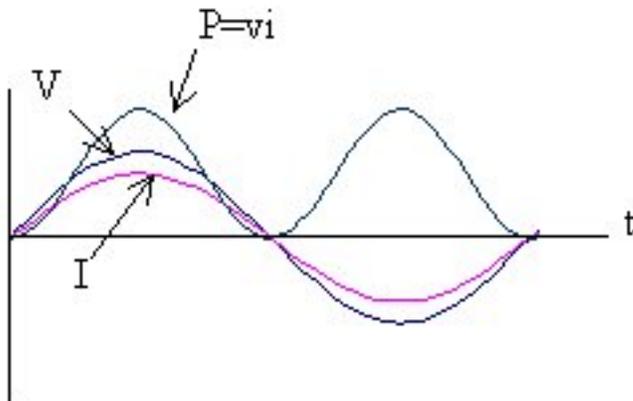


Power Supplied = Puissance fournie  
 Voltage required to force current through resistor = Tension nécessaire pour forcer le courant à travers la résistance  
 Power transformed to heat = Puissance transformée en chaleur

**Figure 21**

**La chaleur par rapport au courant dans une résistance**

Nota : La puissance réelle ne peut se produire que si l'amplitude de la tension augmente et diminue à la même cadence que celle de l'intensité, comme l'illustre la figure suivante. Les deux valeurs sont alors dites en phase, ce qui ne peut se produire qu'avec une charge résistive.



**Figure 22**

**Puissance réelle, tension et intensité**

Avec les circuits c. a., le flux instantané de la puissance est à tout moment égal au produit de la tension par l'intensité. Le flux de puissance n'est pas constant, mais fluctue avec la tension et l'intensité. L'intégralité de la puissance par rapport au temps est l'énergie fournie au circuit de charge. Avec un circuit purement résistif, le produit de la tension par l'intensité est toujours positif. Au cours d'un cycle c. a. complet., l'énergie est fournie au circuit de charge.

## **2.6 PUISSANCE ACTIVE, PUISSANCE RÉACTIVE, PUISSANCE APPARENTE ET FACTEUR DE PUISSANCE**

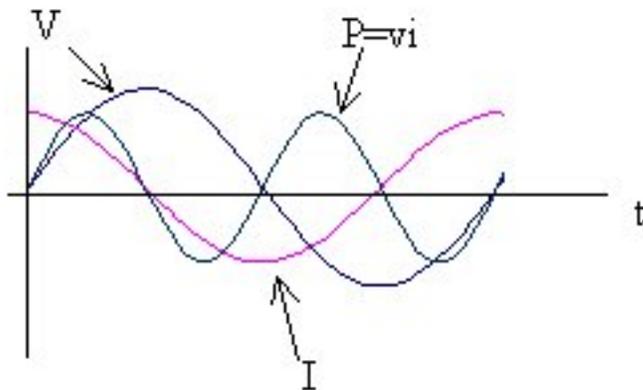
Dans l'exemple précédent, nous avons lié l'énergie dissipée ou la chaleur produite par une résistance à la puissance électrique appliquée à cette résistance. Comme nous l'avons déjà vu, au lieu d'employer directement le terme d'énergie électrique, nous employons habituellement en électricité la quantité d'énergie utilisée pendant un certain temps (ce qui définit la puissance). Il existe trois éléments de puissance :

### **2.6.1 Puissance active - ou réelle - mesurée en watts (W)**

Comme nous l'avons déjà vu, la puissance active - ou réelle - entraîne l'exécution d'un travail utile, et elle représente la puissance dissipée par les charges résistives. Cela commence avec la force motrice, qui est la vapeur faisant tourner les turbines dans les centrales nucléaires. La puissance active est donc commandée en grande partie par la force motrice, qui est le flux de vapeur. Le réglage du flux de vapeur a une certaine influence sur la puissance réactive de sortie des alternateurs à cause de la réaction d'induit. (Une explication sera donnée plus loin à ce sujet.)

### **2.6.2 Puissance réactive - mesurée en voltampères réactifs (var)**

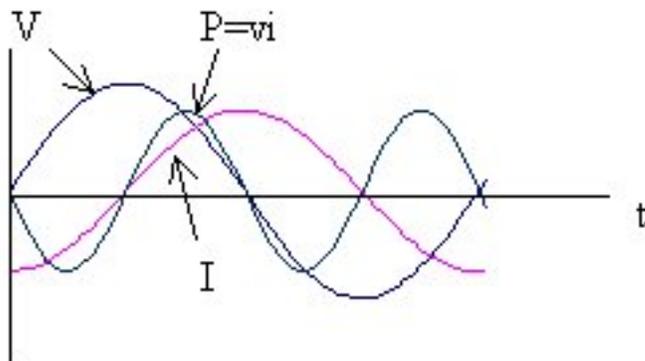
La puissance réactive est échangée dans les circuits c. a. entre l'alternateur et les circuits de charge ayant besoin de ces champs pour fonctionner. Comme nous l'avons déjà vu, la puissance réactive est la puissance dissipée par les charges réactives (capacitives et inductives). Les formes d'ondes de la puissance réactive liée à une charge capacitive (figure 23) et à une charge inductive (figure 24) sont indiquées ci-dessous comme référence. Notons que la valeur moyenne de la puissance réactive pure est de 0.



Tension, intensité et puissance avec un condensateur

**Figure 23****Puissance réactive liée au condensateur**

Même si la puissance réactive est absolument nécessaire pour les circuits c. a., elle leur impose une certaine consommation et ne permet d'effectuer aucun travail utile. La puissance réactive est commandée par la tension de sortie de l'alternateur grâce au réglage du courant d'excitation.

**Figure 24**

Tension, intensité et puissance avec un inducteur

**2.6.3 Puissance apparente - mesurée en voltampères (VA)**

Est-ce qu'un alternateur (c. a.) fournit une combinaison de puissance active et réactive? La figure 25 est un schéma représentatif de la puissance apparente combinée dans une charge active et réactive.

Notes

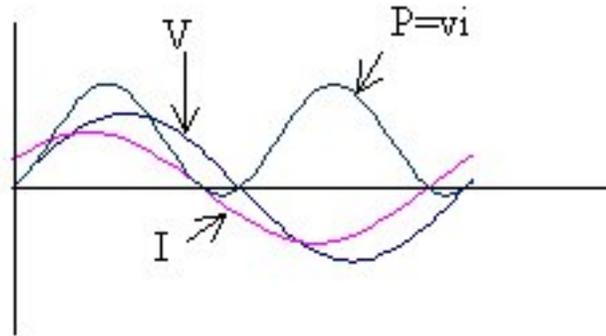


Figure 25

### Tension, intensité et puissance avec un circuit doté d'une combinaison de résistance et d'inductance

#### 2.6.4 Puissance apparente

En pratique, la puissance apparente est significative comme unité de capacité nominale. Par exemple, la puissance apparente des alternateurs (c. a.) est produite à une tension et une fréquence essentiellement constantes. La capacité de sortie nominale des alternateurs est donc indiquée en mégavoltampères (MVA). La capacité nominale des transformateurs et des moteurs est indiquée en MVA ou en kVA pour des raisons similaires.

Les centrales électriques doivent produire de la puissance apparente, mais elles ne sont rétribuées qu'en fonction de la puissance active utilisée par les clients. Le rapport de la puissance active à la puissance apparente est donc une grandeur d'importance. Ce rapport représente le facteur de puissance. Cette grandeur peut aller de zéro à un, mais l'économie lui dicte de se rapprocher le plus possible de l'unité. On peut voir dans ce rapport une mesure de l'efficacité d'un système dans l'utilisation de la puissance apparente pour effectuer un travail utile. La terminologie peut prendre dans ce domaine l'une des formes suivantes :

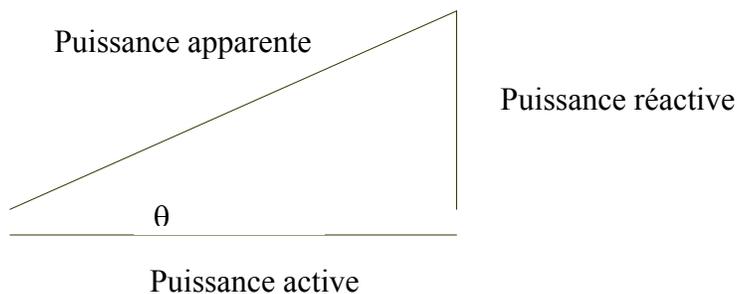
$$\begin{aligned} \text{Facteur de puissance} &= \text{FP} \\ &= \text{Puissance réelle/puissance apparente} \\ &= \text{Watts/voltampères} \end{aligned}$$

Nota : Il existe un retard entre la puissance apparente et la puissance réelle. Ce retard correspond à celui qui existe entre la tension et l'intensité avec les charges réactives. Avec les charges capacitatives, le facteur de puissance est rattaché à une avance. Avec les charges inductives, il est rattaché à un retard. La mesure de l'angle du facteur de puissance indique à quel point la puissance apparente se rapproche du fait d'être une puissance entièrement réelle ou du fait de fournir une

charge résistive pure. La valeur nominale du facteur de puissance peut se résumer dans deux domaines d'importance :

- Efficacité : Plus le facteur de puissance est petit (demandé par le circuit de charge qui nécessite une quantité donnée d'énergie active), plus le courant débité par l'alternateur et envoyé à travers le réseau de distribution électrique est grand. Cela se traduit par des enroulements de plus grande taille, par des pertes de charge plus importantes sur le réseau et par une efficacité amoindrie.
- Régulation de la tension : Plus le facteur de puissance est petit et le courant produit par l'alternateur est grand, plus les chutes de tension de réactance sont grandes sur la ligne. Cela se traduit par une tension plus petite au circuit de charge et donc par une régulation de la tension de moins bonne qualité sur le réseau.

Le rapport entre la puissance apparente, la puissance active et la puissance réactive est la même que celle qui existe entre les côtés d'un triangle rectangle.



**Figure 26**  
**Triangle de puissance**

Notes

Notes

Les rapports suivants s'appliquent entre la tension, l'intensité, la puissance apparente (U), la puissance active (P) et la puissance réactive (Q).

$$U^2 = P^2 + Q^2$$

$$U = VI$$

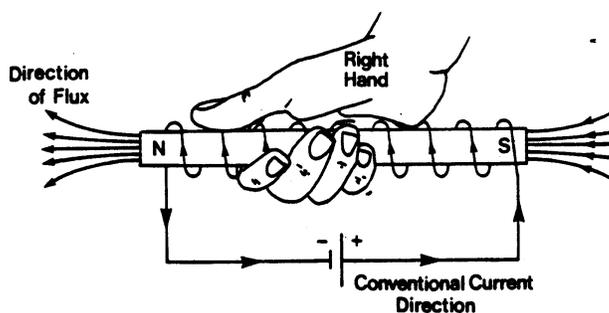
$$P = VI \cos\theta$$

$$Q = VI \sin\theta$$

Le facteur de puissance est égal au  $\cos\theta$

## 2.7 CHAMP MAGNÉTIQUE PRODUIT PAR UN COURANT CIRCULANT DANS UN CONDUCTEUR

Nous avons vu qu'un flux magnétique est produit par un conducteur dans lequel circule un courant et que ce flux peut être vu comme un champ doté de lignes de force magnétiques. Avec les moteurs, les alternateurs et les transformateurs, le champ est concentré grâce à des enroulements ou des bobines de fils conducteurs, comme indiqué ci-dessous. Cela permet de transférer de l'énergie utilisable.



Right Hand = Main droite    Direction of Flux = Direction du flux  
Conventional Current Direction = Direction conventionnelle du courant

**Figure 27**  
**Flux magnétique concentré**

Dans le schéma ci-dessus, les bobines de fils entourent une barre en métal pour accentuer la concentration du flux. Cela forme un électroaimant rudimentaire. La règle de la main droite doit être mémorisée car elle est pratique. Si la ou les bobines sont saisies en imagination avec la main dans le sens de la circulation du courant, le pouce indique la direction du flux magnétique.

Un flux magnétique concentré peut transférer de grande quantités de d'électricité :

- Il réagit aux autres champs magnétiques produisant une force.
- Il crée des champs magnétiques à l'intérieur et autour des conducteurs adjacents

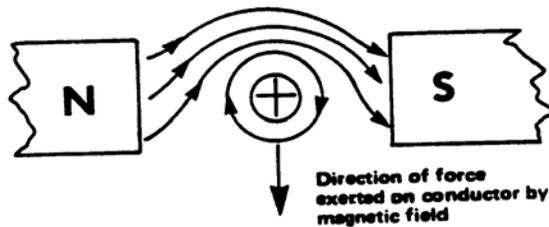
La plupart des circuits de commande des centrales électriques appliquent de quelque façon ce principe de base. Ces circuits sont habituellement dotés de relais ou d'électroaimants. Les signaux de

commande qui excitent une bobine à distance parviennent de nombreux dispositifs, comme les détecteurs logiques de température ou de pression. De son côté, la bobine attire une plaque en métal sur laquelle sont fixés des contacts qui mettent sous tension d'autres dispositifs.

Avant de continuer, nous devons étudier l'effet d'un flux magnétique sur un conducteur.

## 2.8 TENSION INDUITE SUR LES CONDUCTEURS PAR UN CHAMP MAGNÉTIQUE CHANGEANT

Si un champ magnétique est rapproché d'un conducteur, il se courbe autour de ce conducteur de la façon illustrée par la figure suivante. Notons la présence des champs, autour du conducteur, au centre (vue en coupe), et l'aimant (les deux pôles sont montrés) se déplaçant vers le bas.



Direction of force exerted on conductor by magnetic field  
= Direction de la force exercée sur un conducteur par un champ magnétique

### Figure 28 Tension produite sur un conducteur par un champ magnétique

Pour le conducteur de la figure 28,

- une force s'exerce sur le conducteur;
- un champ magnétique se forme autour du conducteur;
- un potentiel pouvant permettre d'effectuer un travail se développe.

À mesure que le champ magnétique se déplace sur le fil conducteur, de l'énergie est transférée de ce champ à ce fil et un potentiel se forme en même temps que le champ se déplace.

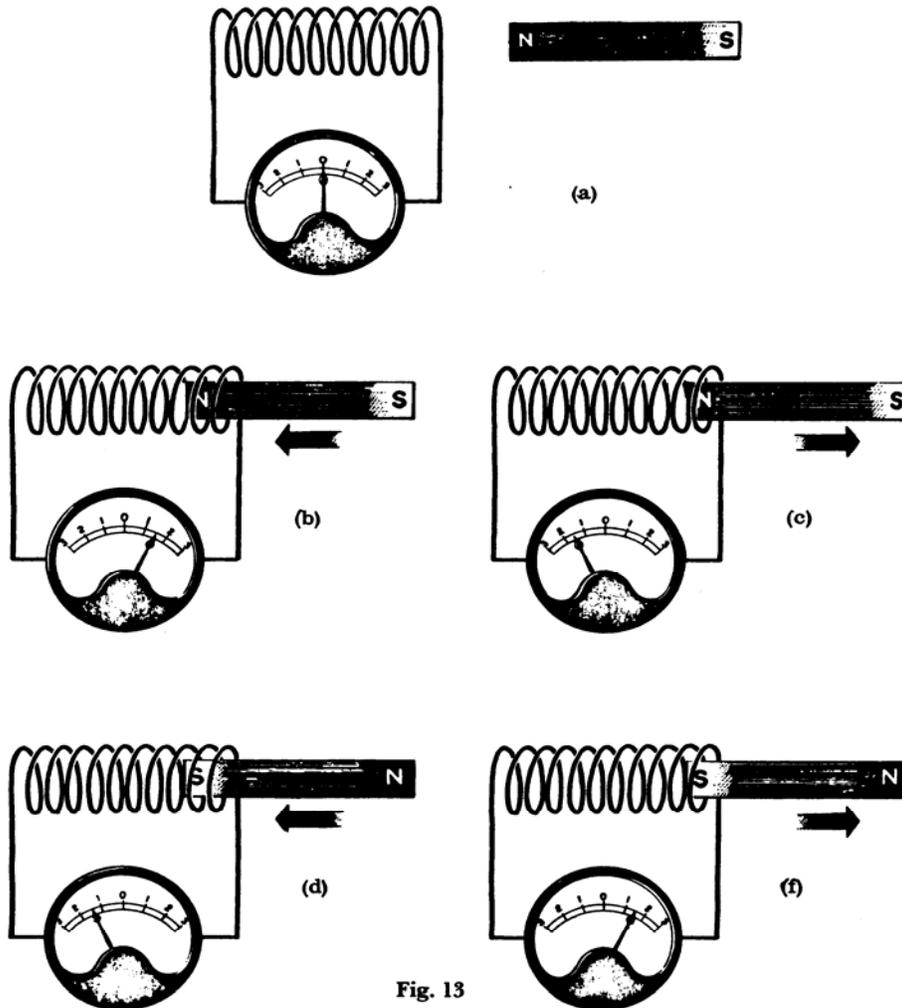


Fig. 13

**Figure 29**  
**Tension produite sur une bobine par un champ magnétique**

L'amplitude de la force électromotrice commandant ce phénomène peut se montrer facilement. Dans la figure 29, ci-dessus, une source concentrée de flux magnétique (un aimant) est introduite dans une bobine et en est sortie du même côté. Les effets de ce mouvement peuvent être observés sur un voltmètre.

Souvenons-nous de la règle de la main droite et remarquons que l'aiguille du voltmètre se déplace à droite puis à gauche du zéro quand l'aimant se déplace en entrant puis en sortant de la bobine. La tension ainsi produite est donc sensible en polarité et en direction. L'amplitude de la tension augmente par ailleurs en fonction de la vitesse du mouvement.

### 2.8.1 Fonctionnement du transformateur

En combinant les deux principes vus plus haut, nous avons le principe du fonctionnement du transformateur :

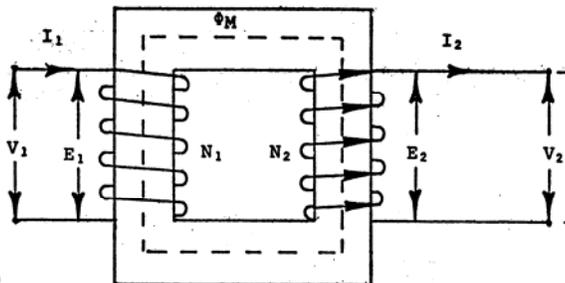
Si un courant alternatif ( $I_1$ ) est forcé par un potentiel ( $V_1$ ) à travers un conducteur, un champ magnétique constitué de lignes de force ( $M$ ) s'établit autour de ce conducteur.

Si un champ magnétique ( $M$ ) se déplace par rapport à un conducteur, un potentiel ( $V_2$ ) est produit sur ce conducteur. Cela permet de fournir un courant ( $I_2$ ) à un circuit de charge branché.

Dans l'exemple suivant, comme les deux bobines partagent le même flux ( $M$ ), les forces électromotrices d'entrée et de sortie sont proportionnelles au nombre de spires formées par le conducteur autour de ce flux :

$$E_2/E_1 = N_2/N_1$$

Ou bien, la tension de sortie =  $V_2 = V_1 \times (N_2/N_1)$



**Figure 30**  
**Transfert d'électricité**

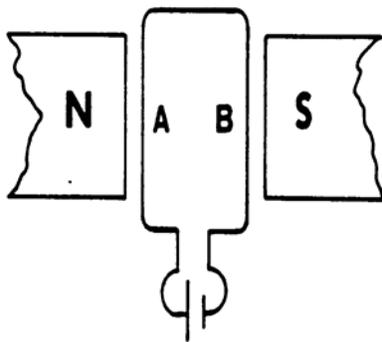
Malgré sa simplicité, ce principe forme la base de tous les transformateurs. Du plus gros des transformateurs de puissance jusqu'au plus petit des transformateurs de commande logique, la seule différence se trouve dans la construction, qui dépend de la tension, du nombre nominal de kVA et de la fréquence du courant alternatif.

### 2.8.2 Force magnétique exercée sur un conducteur par lequel passe un courant

Les rubriques précédentes nous ont permis d'examiner la force magnétique s'exerçant sur un conducteur et la force électromotrice (la tension) produite grâce à ça. Si le conducteur forme une boucle

fermée, cette tension crée un courant dans ce conducteur. Le signe + placé sur les schémas indique la queue de la flèche qui montrerait le sens du courant. Si le courant est forcé à travers le conducteur par un potentiel extérieur, la réaction au champ magnétique extérieur augmente. Toute augmentation du courant dans la bobine entraîne une augmentation proportionnelle de la force s'opposant au champ magnétique.

La figure 31, ci-dessous, montre les effets de la présence d'une boucle conductrice dans un champ magnétique.

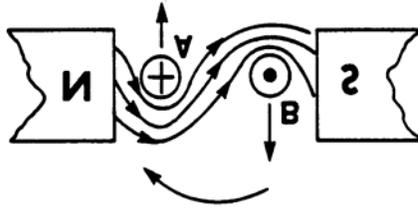


**Figure 31**

**Boucle conductrice de courant dans un champ**

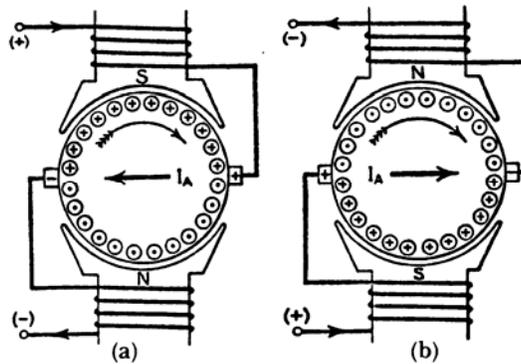
La coupe transversale de la figure 32, ci-dessous, montre que si un courant électrique est forcé à travers le fil conducteur par un potentiel électrique extérieur, le côté A est poussé vers le bas et le côté B est poussé vers le haut. La boucle conductrice essaie ensuite de tourner dans le sens antihoraire. Ce principe de rotation forme la base du fonctionnement de tous les moteurs électriques. Notons par ailleurs en passant que la force créée par le courant c. c. dans la bobine forme le principe de l'excitation c. a. du rotor (élément rotatif) des alternateurs. Le fonctionnement des alternateurs est traité plus loin dans ce module.

Notes



**Figure 32**  
**Force magnétique exercée sur une boucle conductrice de courant**

Le schéma précédent illustre le principe du fonctionnement des moteurs c. c., mais ce principe s'applique aussi aux moteurs c. a. La figure suivante illustre un moteur c. a. en série en montrant le mouvement du courant aux deux sens de circulation du courant alternatif. Notons qu'un couple constant est produit dans le même sens même avec un courant alternatif.



**Figure 33**

### Principe du moteur c. a.

Le courant alternatif qui alimente l'induit du centre au moyen des balais en carbone est inversé à chaque demi cycle. Cette manière d'appliquer le courant permet au champ stationnaire et au champ rotatif de garder le même sens relatif. Le terme commutation est souvent utilisé dans ce cas. La rotation du moteur est ainsi maintenue constante dans le sens horaire.

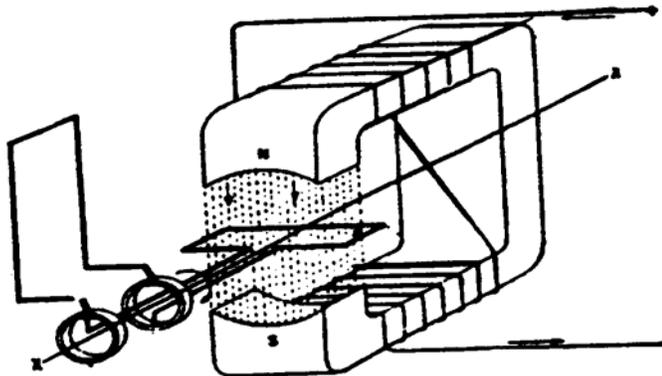
### 2.8.3 Tension induite sur un conducteur

Jusque là, nous avons examiné les divers rapports qui existent entre la tension, le courant et le flux magnétique ainsi que les appareils qui mettent en œuvre ces principes :

- Principe du transformateur - Champ magnétique créé par un conducteur par lequel passe un courant et tension induite par un champ magnétique changeant.
- Principe du moteur électrique - Force produite par un champ magnétique sur un conducteur par lequel passe un courant.

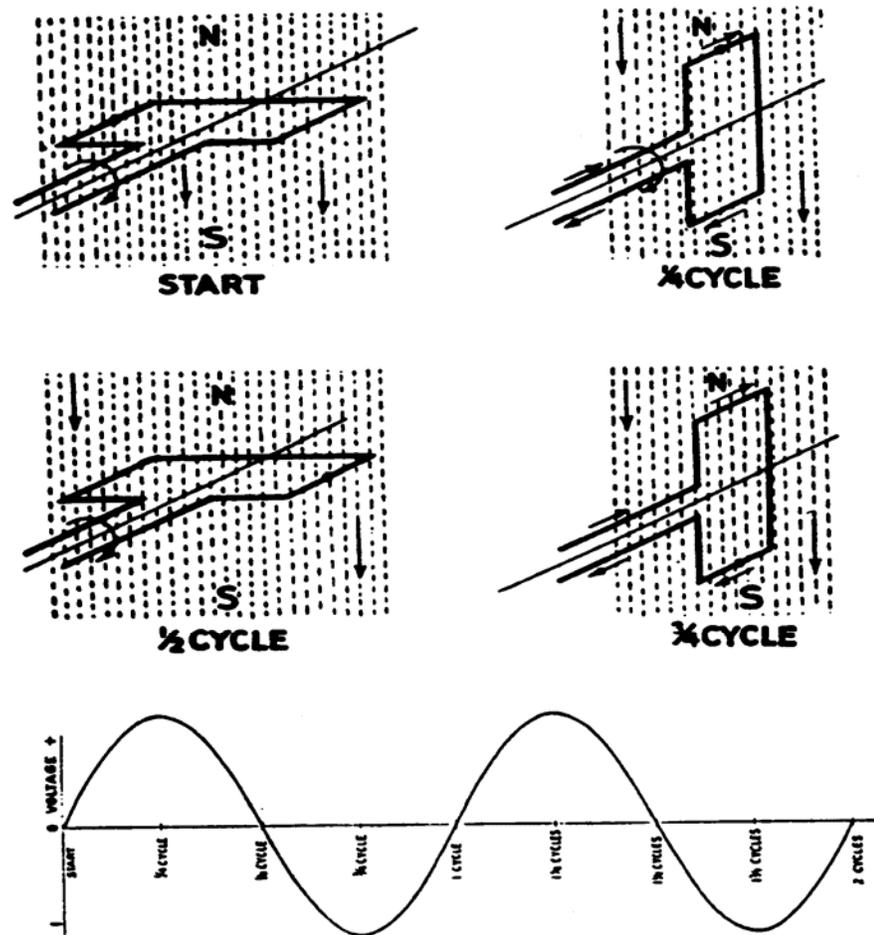
Nous allons maintenant examiner la tension produite sur un conducteur par un champ magnétique en rotation. Pour faciliter les explications, voyons d'abord cela avec un champ magnétique stationnaire et un conducteur en rotation.

Si le conducteur a la forme d'une bobine tournant à vitesse constante (figure 34), la force électromotrice produite (et mesurée aux bagues de contact rotatives) change de sens à des intervalles qui correspondent à la rotation de la bobine et change constamment de valeur. Cela donne un alternateur élémentaire produisant la forme d'onde illustrée à la figure 35.



**Figure 34**  
**Rotation dans un champ magnétique d'une bobine**  
**dans laquelle passe un courant**

Notes



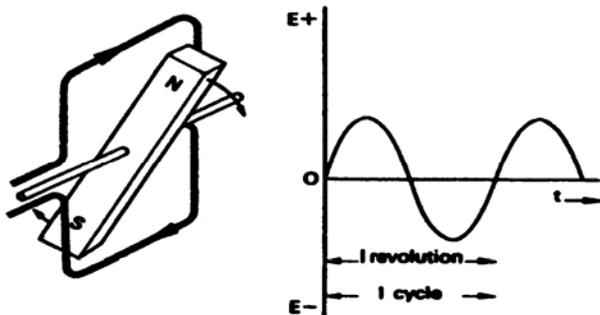
START = DÉMARRAGE    1/4 CYCLE = 1/4 CYCLE    1/2 CYCLE = 1/2 CYCLE  
 3/4 CYCLE = 3/4 CYCLE    VOLTAGE = TENSION

**Figure 35**

**Forme d'onde produite par un alternateur (c. a.)**

Notons qu'au schéma précédent (figure 35), les points situés à  $\frac{1}{4}$  et à  $\frac{3}{4}$  du cycle sont ceux auxquels la vitesse de traversée du flux est maximale et sont donc les points de tension  $E$  maximale. La tension minimale a lieu au début et à  $\frac{1}{2}$  du cycle. La forme d'onde produite porte le nom de sinusoïde ou d'onde sinusoïdale.

En pratique, la boucle est stationnaire (stator) et le champ magnétique est en rotation dans cette boucle. Cela permet de construire des bobines de sortie de stator plus robustes que les bobines du champ en rotation. Les bobines du champ magnétique peuvent être constituées de fils fins formant de nombreuses spires autour de l'élément rotatif (rotor) et être alimentées par le courant c. c. (excitation). Le principe de fonctionnement est montré ci-dessous (figure 36). Il demeure le même que celui vu précédemment.



1 revolution = 1 tour    1 cycle = 1 cycle

**Figure 36**  
**Alternateur (c. a.) monophasé simplifiée**

### Pôles

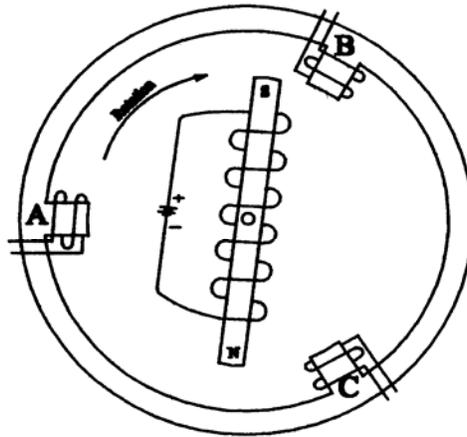
Il est important de savoir que les figures présentées jusque là n'ont illustré qu'un seul tandem de pôles. Cela n'est voulu qu'à des fins d'analyse et de facilité de représentation. La force motrice d'origine doit faire tourner l'alternateur à 60 tours par seconde (3 600 tr/min) pour qu'une forme d'onde de 60 Hz (60 cycles/seconde) soit produite. Les alternateurs entraînés par l'eau à 300 tr/min doivent évidemment être dotés de 12 tandems de pôles. Contentons-nous de dire que le nombre de pôles n'a d'effet que sur la vitesse à laquelle doit tourner le rotor. Le principe fondamental reste le même.

### Courant triphasé

En pratique, la plupart des alternateurs (c. a.) produisent du courant triphasé. Les circuits triphasés sont simplement formés de trois circuits monophasés placés à  $1/3$  de tour (à  $120^0$ ) les uns des autres. Les circuits triphasés offrent de nombreux avantages, dont les plus notables sont les suivants :

- Ils sont plus économes à produire et à utiliser;
- ils permettent de bien équilibrer les forces imposées à l'arbre.

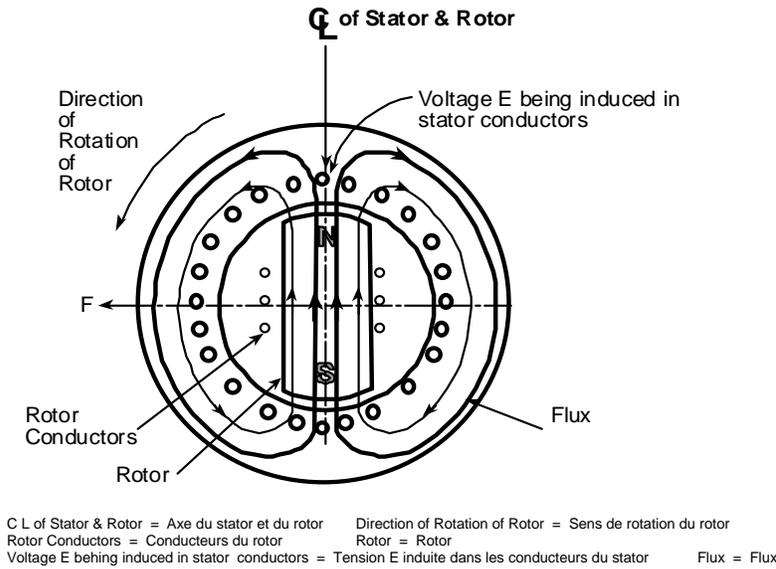
Notes

**Simplified 3 Phase AC Generator**

Simplified 3 Phase AC Generator = Alternateur triphasé simplifié

**Figure 37****Alternateur (c. a.) triphasé simplifié**

Dans un alternateur réel, les pôles et les bobines ne sont évidemment pas aussi prononcés que dans les exemples illustrés. Pour diminuer l'entrefer (qui peut provoquer un affaiblissement considérable du flux magnétique) et augmenter l'efficacité, les enroulements du rotor et du stator sont constitués de nombreuses bobines insérées dans des fentes du fer de l'alternateur. Le rotor, qui est cylindrique, tourne à grande vitesse et est refroidi par un circuit forcé (dans lequel circule habituellement de l'hydrogène gazeux). Un très petit espace, l'entrefer, existe entre le rotor et le stator (qui est à l'extérieur). Ce type d'alternateur est illustré à la figure 38. N'oublions pas qu'avec les alternateurs à courant triphasé, chaque phase atteint sa crête dans un ordre qui correspond au passage du champ des rotors dans les bobines, ce qui produit trois formes d'onde sinusoïdale identiques et décalées de  $1/3$  de cycle.

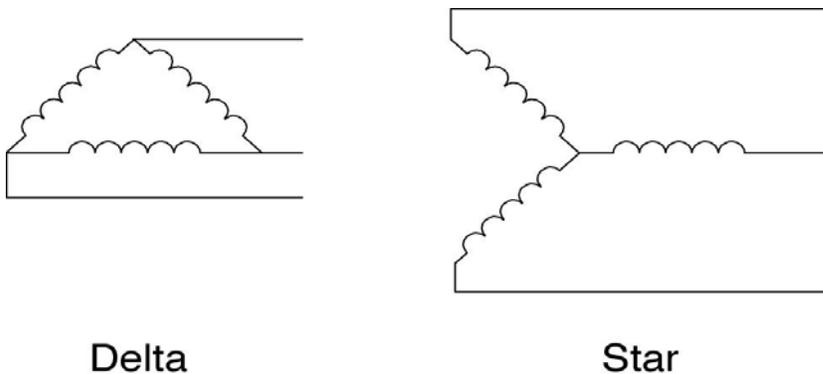


**Figure 38**

**Génératrice c. a. triphasée avec enroulements insérés**

**2.9 CONNEXIONS EN TRIPHASÉ**

Les trois enroulements des alternateurs à courant triphasé sont normalement connectés entre eux pour produire justement un courant triphasé. Il existe deux façons d'effectuer ces connexions. Chaque enroulement peut avoir une extrémité connectée à un point commun ou neutre pour former un circuit en étoile ou chaque enroulement peut avoir une extrémité connectée à celle de l'enroulement voisin pour former un circuit en triangle.



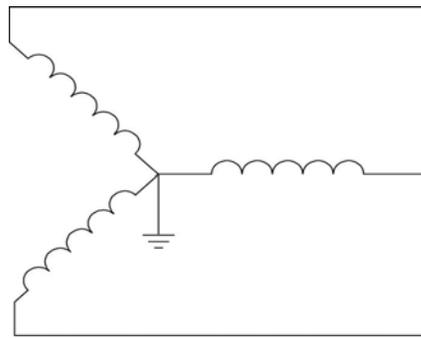
DELTA = TRIANGLE    START = ÉTOILE

**Figure 39**  
**Connexion entre les enroulements**

Notes

Chaque type de connexion présente des avantages et des inconvénients. Habituellement, la connexion en étoile est utilisée par les sources d'alimentation électrique.

Ce type de connexion offre un point très pratique pour raccorder les circuits à la terre. La meilleure façon de résoudre les sérieux problèmes de sécurité qui se posent consiste à raccorder à la terre de façon sûre et permanente un point du circuit électrique situé le plus près possible de la source de l'alimentation.



**Figure 40**  
**Connexion en étoile avec mise à la terre**

Les circuits de charge sont raccordés soit à des connexions en triangle soit à des connexions en étoile pour des raisons qui tiennent surtout à l'économie. Les connexions en étoile sont utilisées lorsqu'il se peut que les charges ne soient pas équilibrées (partagées à égalité) entre les trois phases. Le conducteur neutre permet à des courants non équilibrés de circuler, tensions et charge demeurant néanmoins équilibrées.

## 2.10 CIRCUITS MAGNÉTIQUES

Le fonctionnement de la plupart des machines c. a. (moteurs, alternateurs et transformateurs) dépend énormément du champ magnétique. Les masses ferreuses de ces machines offrent un passage au champ magnétique. Certains phénomènes intéressants se déroulent dans ces masses et il en sera question dans les rubriques suivantes.

### 2.10.1 Courant de Foucault

Le courant de Foucault est un courant électrique qui circule dans la masse ferreuse des machines c. a. Pour produire des tensions, un champ magnétique et des conducteurs sont nécessaires et un certain

changement doit s'opérer entre eux. Dans une machine c. a., le champ magnétique est en phase avec le courant, et change donc continuellement. La masse ferreuse est conductrice et des tensions y sont induites, avec circulation d'un courant. Ces tensions sont faibles, mais le courant peut être fort. Ce courant provoque un chauffage de la masse ferreuse.

Si rien n'était fait lors de la construction des machines, les masses ferreuses risqueraient de devenir extrêmement chaudes et la perte de puissance risquerait d'être énorme. Ces masses sont donc fabriquées à partir de fines feuilles de métal qui permettent de rompre la continuité de la conduction, ce qui affaiblit le courant de Foucault.

### 2.10.2 Hystérésis

L'hystérésis est un phénomène qui prend place dans les masses ferreuses des machines. Une certaine quantité d'énergie est nécessaire pour magnétiser le fer. Les dipôles magnétiques du fer doivent être alignés. Le champ magnétique extérieur au fer agit sur ces dipôles et les force à s'aligner. Dans la masse ferreuse des machines c. a., les dipôles sont continuellement réalignés et de l'énergie est donc continuellement perdue dans cette masse. Cette perte d'énergie se manifeste par un échauffement de la masse ferreuse. Les pertes pouvant être causées par l'hystérésis peuvent être amoindries par l'utilisation d'un acier facile à magnétiser.

L'hystérésis et le courant de Foucault se produisent toujours en même temps. Ils sont aussi inséparables que Laurel et Hardy ou le sel et le poivre. Ils dépendent tous deux du champ magnétique changeant dans la masse ferreuse et provoquent tous deux le réchauffement de cette masse. Pour parler en technicien, ils forment ensemble l'origine de la perte dans le fer. Une partie de l'alimentation électrique de toute machine c. a. se manifeste par l'échauffement du fer, ce qui indique un certain manque d'efficacité.

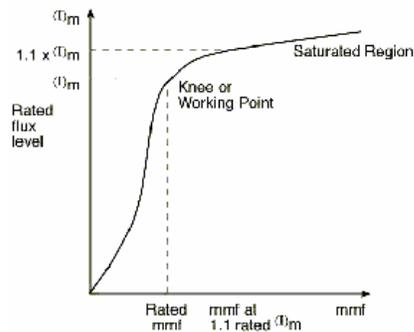
### 2.10.3 Saturation magnétique

Le fonctionnement de la plupart des machines électriques dépend d'un circuit magnétique. Ce circuit est toujours en fer et ses propriétés facilitent le changement de l'amplitude et de la direction du champ dans l'induit. La saturation du fer par le champ magnétique est une des limites caractérisant les circuits magnétiques.

Le champ magnétique est produit par le passage d'un courant à travers une bobine qui enveloppe une masse ferreuse. À mesure que le courant augmente dans la bobine, le champ magnétique augmente dans le fer.

## Notes

Au début, le rapport de grandeur entre le courant et le champ est pratiquement proportionnel. Si le courant est doublé, le champ est doublé aussi. Mais le fer ne peut pas être saturé par le champ magnétique, il devient de plus en plus difficile d'augmenter la force du champ et la demande de courant augmente en conséquence. Le rapport existant entre la force du champ et le courant se modifie. Il passe d'une situation où des changements relativement petits du courant causent de grands changements du champ magnétique à une situation où de grands changements du courant sont nécessaires pour obtenir de petits changements du champ magnétique.



Rated flux level = Niveau de flux nominal      Saturated Region = Région saturée  
 Knee or Working Point = Coude ou point de fonctionnement  
 Rated mmf = Force magnétomotrice (Fm) nominale  
 mmf at 1.1 rated = Fm à 1,1 de la Fm nominale      mmf = Force magnétomotrice (Fm)

Figure 41

## Courbe de saturation représentative

La plupart des appareils électriques sont destinés à fonctionner en deçà de la région de saturation, et toute intrusion dans la région de saturation a des conséquences fâcheuses. La plupart de nos machines (transformateurs, alternateurs et moteurs électriques) fonctionnent en courant alternatif et leur fonctionnement dépend de tensions induites dans des enroulements. Les tensions induites dépendent de la vitesse de changement du champ magnétique dans un induit. Le rapport existant entre le champ magnétique et la tension induite est régi par la loi de Faraday.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

## Loi de Faraday

e = tension induite

N = nombre de spires de la bobine

$\Phi$  = champ magnétique

t = temps

Notes

La tension et la fréquence du flux d'une machine c. a. sont absolument liées. Si la tension du circuit augmente à une fréquence donnée, la force du champ magnétique de la machine augmente obligatoirement. Si la fréquence (qui est liée à la vitesse de changement du flux) diminue, le champ magnétique doit augmenter pour maintenir une tension fixe.

La plupart des machines sont destinées à fonctionner avec un champ magnétique situé juste en deçà de la région de saturation. Si le champ magnétique augmente d'une valeur voisinant les 10 %, l'induit est saturé. Un courant important provoque un réchauffement important des enroulements ( $I^2R$ ).

L'induit des machines c. a. est chauffé par le changement continu du champ magnétique. Ce changement continu provoque des pertes par courant de Foucault et par hystérésis dans l'induit. Le courant de Foucault est un courant électrique produit à l'intérieur même du fer de l'induit. Le chauffage se produit électriquement. Les pertes par hystérésis sont des pertes intérieures à l'induit et sont liées à la force nécessaire au changement de direction et d'amplitude du champ dans cet induit. Ce sont là des effets de chauffage magnétique. Si l'amplitude du champ magnétique augmente, les effets de chauffage par courant de Foucault et par hystérésis augmentent également.

## 2.11 CONVERTISSEURS DE PUISSANCE

Le couplage direct des moteurs et des alternateurs permet de créer une grande diversité de dispositifs convertisseurs de puissance. La force motrice (moteur) peut se caractériser comme suit :

- c. c. à n'importe quelle tension
- c. a. monophasé
- c. a. triphasé
- 60 Hz ou fréquence adaptée au réseau d'alimentation (c.-à-d. 50 Hz)

La sortie d'un alternateur peut par ailleurs être de n'importe quel type précédent. Dans l'industrie et les usines, les convertisseurs de puissance robustes les plus économiques sont les groupes moteur-alternateur adaptés à la source et à la taille et au type de charge. De nombreuses alimentations électriques sans coupure sont de nos jours des dispositifs à transistors, mais si des circuits de conversion c. c. à c. a. robustes sont nécessaires, l'utilisation des groupes moteur-alternateur s'impose.

## **2.12 ISOLATION DES MACHINES**

La cause de panne d'électricité la plus fréquente est la dégradation et la rupture (par décharge) de l'isolant. Il est donc indispensable de mentionner ici les effets de l'environnement sur l'isolation des machines électriques.

L'isolation électrique peut être liquide ou solide ou bien organique ou inorganique. Les matières isolantes organiques comprennent l'émail, le vernis, la résine ou les polymères appliqués sur les éléments en acier pour créer une forte résistance entre les surfaces (entre les enroulements), comme dans la plupart des machines refroidies à l'air et des transformateurs immergés dans l'huile.

Les gros transformateurs sont immergés dans de l'huile minérale pure pour être mieux isolés et pour que la chaleur qu'ils produisent soit mieux dissipée par les radiateurs extérieurs, les ventilateurs et les pompes qui peuvent les desservir. L'isolation intérieure de ces transformateurs est souvent en papier imprégné d'huile et enroulé autour des conducteurs.

Les matières isolantes organiques peuvent être une combinaison d'oxyde de magnésium, de silicate, de phosphate et de poudre de céramique. Ce type d'isolant est habituellement traité thermiquement au contact de l'acier. Il est moins courant que l'isolation organique.

Quel que soit leur type, les deux principales causes de détérioration des isolants sont l'humidité et la chaleur.

### **2.12.1 Humidité excessive**

Avec les machines électriques refroidies à l'air, le taux d'humidité de l'air est un élément important. Avec le temps, de minuscules craquelures se forment dans les isolants. L'humidité s'introduit par ces craquelures et offre un trajet électrique qui favorise les courts-circuits entre les enroulements adjacents. La tension existant entre ces enroulements est très faible, mais si un court-circuit se forme, il offre

une boucle au flux magnétique et permet à un courant phénoménal de passer. Cela détruit habituellement la machine, qui doit alors être déposée pour être remplacée ou recevoir de nouveaux enroulements.

Avec les machines refroidies à l'huile, (c.-à-d. les transformateurs), l'humidité ne peut être décelée qu'au moyen de prélèvements d'huile réguliers. L'humidité est absorbée par l'huile en passant par le reniflard. Cette absorption est causée par les cycles de chauffage et de refroidissement continus. Des dessiccateurs d'air spéciaux (c.-à-d. des Drycol) et des éléments absorbants peuvent aider à ralentir l'absorption de l'humidité par l'huile.

Avec les transformateur remplis d'huile, il est important de noter qu'il suffit de très peu d'humidité pour diminuer énormément la valeur isolante de l'huile. Il suffit de 30 parties d'eau par million de parties d'huile pour diminuer la valeur isolante de 50 %.

### **2.12.2 Température excessivement élevée**

Avec les machines électriques refroidies à l'air, le maintien prolongé de températures élevées provoque un vieillissement thermique. L'isolant devient friable et la panne peut se produire à cause d'une infiltration d'humidité (de la façon vue plus haut) ou à cause d'un contact entre les conducteurs.

Avec les transformateurs remplis d'huile, l'effet de détérioration de l'isolation porte le nom de vieillissement de l'isolant. Le vieillissement chimique se produit plus vite à température élevée. La durée utile de l'isolant diminue de façon exponentielle par rapport à la température. Par exemple, si la valeur d'isolation nominale d'un isolant standard est de 65 °C (augmentation de température), la diminution de la durée utile de cet isolant passe de 0,001 % par heure à 100 °C à 0,05 % par heure à 140 °C et à 1,0 % par heure à 180 °C. Traduits en durée utile totale prévisible pour cet isolant, ces chiffres donnent 11,4 ans à 100 °C, 83 jours à 140 °C et 100 heures à 180 °C. Il est facile de voir l'importance d'une bonne tenue de registre quotidien pour noter les températures de fonctionnement et maintenir les appareils électriques à une température ambiante assez basse.

## 2.13 QUESTIONS DE RÉVISION - PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ÉLECTRICITÉ

1. Donner la signification des termes suivants et indiquer les unités et symboles correspondants couramment utilisés
  - a. courant,
  - b. potentiel,
  - c. résistance,
  - d. capacité
  - e. flux magnétique,
  - f. inductance,
  - g. fréquence,
  - h. réactance,
  - i. impédance,
  - j. puissance active,
  - k. puissance réactive,
  - l. puissance apparente,
  - m. facteur de puissance.
2. Une résistance de  $5\ \Omega$  est branchée sur une pile de 25 volts. Quelle est l'intensité du courant dans ce circuit?
3. Une résistance de  $10\ \Omega$ , une résistance de  $5\ \Omega$  et une résistance de  $2\ \Omega$  sont montées en série. Ce montage est branché sur une pile de 10 volts. Quelle est l'intensité du courant dans ce circuit?
4. Une résistance de  $10\ \Omega$ , une résistance de  $5\ \Omega$  et une résistance de  $2\ \Omega$  sont montées en parallèle. Ce montage est branché sur une pile de 10 volts. Quelle est l'intensité du courant dans ce circuit?
5. Un circuit est constitué d'une résistance et d'un inducteur montés en série avec un interrupteur et une pile. Effectuer un croquis montrant la circulation du courant et la chute de tension à travers l'inducteur depuis le moment où l'interrupteur est fermé jusqu'au moment où le circuit atteint un état stable.
6. Un circuit est constitué d'une résistance et d'un condensateur montés en série avec un interrupteur et une pile. Effectuer un croquis montrant la circulation du courant et la chute de tension à travers le condensateur depuis le moment où l'interrupteur est fermé jusqu'au moment où le circuit atteint un état stable.

7. Soit un circuit c. a. à 100 V et 60 Hz doté d'un condensateur de 26,5  $\mu\text{F}$ . Quelle est l'intensité du courant dans ce circuit? Quel rapport existe entre la tension et l'intensité avec ce circuit?
8. Un inducteur de 0,265 H est branché sur une alimentation de 20 V et 60 Hz. Quelle est l'intensité du courant dans ce circuit? Quel rapport existe entre l'intensité et la tension avec ce circuit?
9. Une alimentation c. c. de 100 V est raccordée à une résistance de 20  $\Omega$ . Quelle est la puissance de ce circuit?
10. Une alimentation c. a. de 100 V est raccordée à une résistance de 50  $\Omega$ . Quelle est la puissance de ce circuit?
11. Une alimentation c. a. de 100 volts est raccordée à un condensateur dont la réactance capacitive est de 50  $\Omega$ . Quelle est la puissance réactive de ce circuit?
12. Une alimentation c. a. de 100 volts est raccordée à un montage en série constitué d'une résistance de 50  $\Omega$  et d'un inducteur dont la réactance inductive est de 20  $\Omega$ . Quelle est l'intensité totale du courant dans ce circuit? Quelles sont la puissance active, la puissance réactive, la puissance apparente et le facteur de puissance de ce circuit? Dessiner un diagramme de phaseur montrant la tension, l'intensité et l'angle de phase.
13. Une alimentation c. a. de 100 volts est raccordée à un montage en série constitué d'une résistance de 25  $\Omega$  et d'un condensateur dont la réactance capacitive est de 50  $\Omega$ . Quelle est l'intensité totale du courant dans ce circuit? Quelles sont la puissance active, la puissance réactive, la puissance apparente et le facteur de puissance de ce circuit? Dessiner un diagramme de phaseur montrant la tension, l'intensité et l'angle de phase.
14. Donner une brève description de la construction d'un alternateur à courant triphasé (c. a.). Donner le nom des types de connexion d'enroulements utilisés le plus souvent avec ces appareils.
15. Indiquer les deux raisons les plus courantes de la détérioration des isolants. Expliquer brièvement comment se produit une panne d'isolation dans chacun des deux cas.

Notes

**PAGE VOLONTAIREMENT LAISSÉE EN BLANC**

## **3 TRANSFORMATEURS**

### **3.1 INTRODUCTION**

L'une des principales raisons du succès des circuits à courant alternatif vient de la facilité de transformation de la tension et de l'intensité qu'ils offrent. Un courant de forte puissance peut être envoyé à une tension très élevée avec une intensité comparativement basse par les centrales électriques. La tension est abaissée et l'intensité augmentée à destination, où l'électricité est utilisée. Ce module est destiné à étudier le principe général du fonctionnement des transformateurs et les principaux paramètres qui y sont rattachés (variation du rapport de nombre de spires au moyen des changeurs de prise, limites des transformateurs et sources de chaleur).

Les transformateurs peuvent être différents entre eux, mais leurs paramètres de fonctionnement sont toujours les mêmes, depuis les plus petits transformateurs haute fréquence audio jusqu'aux plus gros transformateurs de puissance. Ces paramètres peuvent être classés en huit groupes (indiqués sur tout transformateur de taille importante) : puissance nominale - en VA -, type de refroidissement, caractéristiques nominales, fréquence, tension, phase, branchement et changements de prise.

### **3.2 TRANSFORMATEURS - GÉNÉRALITÉS**

#### **3.2.1 Puissance nominale - en VA**

Chaque transformateur se caractérise par l'intensité maximale du courant qu'il peut fournir à sa tension de sortie standard. Ce nombre nominal de VA (kVA ou MVA pour les gros transformateurs de puissance) dépend de la température ambiante ou du refroidissement fourni. Si le nombre de VA nominal est dépassé, une surchauffe de l'induit et des enroulements risque de se produire et de provoquer des dommages.

#### **3.2.2 Refroidissement**

La plaque signalétique des transformateurs indique habituellement les besoins en refroidissement en fonction du nombre nominal de VA, avec la température ambiante d'utilisation. Les transformateurs remplis d'huile indiquent le type de refroidissement permettant de fournir la pleine puissance nominale. Un transformateur de 1 000 kVA

Notes

rempli d'huile et doté de radiateurs permettant de refroidir l'huile à l'air donne normalement les indications suivantes :

Puissance nominale : 1 000 kVA - 55 °C - ONAN, ce qui indique la capacité de fournir 1 000 kVA à une température augmentée à 55 °C avec une circulation d'huile normale (sans ventilateur ni pompe).

Les diverses abréviations rattachées au refroidissement des transformateurs sont les suivantes :

- ONAN, de l'anglais *Oil Natural circulation with Air Naturally circulated for cooling*, signifie : refroidissement par circulation naturelle d'huile (thermosyphon) avec circulation naturelle d'air.
- ONAF, de l'anglais *Oil Natural Air Forced cooling* indique que le transformateur est construit pour pouvoir être refroidi par circulation naturelle d'huile et circulation forcée d'air. La circulation forcée de l'air permet d'augmenter un peu la puissance nominale.
- OFAF, de l'anglais *Oil Forced and Air Forced cooling* signifie : refroidissement par circulation forcée (pompée) d'huile et par refroidisseur à air forcé (ventilateur).
- OFW, de l'anglais *Oil Forced and Water cooling* concerne les transformateurs principaux des grosses centrales électriques et signifie : refroidissement par circulation forcée d'huile elle-même refroidie par l'eau.

Avec les gros transformateurs de puissance, les valeurs nominales sont habituellement multiples et dépendent du type de refroidissement utilisé. Les besoins en refroidissement des transformateurs dotés de pompes de circulation d'huile et de refroidisseurs à air sont habituellement indiqués de façon suivante :

450/600/750 MVA 65 °C  
ONAN/ONAF/OFAF

Ces indications signifient qu'à une température ambiante de 65 °C, la puissance nominale est de :

- 450 MVA avec circulation normale de l'huile et sans utiliser de ventilateur ni de pompe.

- 600 MVA avec circulation normale de l'huile et ventilateurs en marche.
- 750 MVA avec les ventilateurs et les pompes en marche.

### 3.2.3 Fréquence

Tous les transformateurs sont construits pour produire le meilleur couplage inductif, la chaleur la plus basse et la perte de puissance la plus faible à une certaine fréquence. Une tension induite est créée par un champ magnétique alternatif. Si la fréquence est plus élevée que la fréquence nominale, une perte excessive se produit à l'induit à cause du mauvais rendement du couplage inductif. Si la fréquence est plus basse que la fréquence nominale, une perte excessive se produit à l'enroulement à cause de la diminution du couplage inductif.

Fondamentalement, les transformateurs sont des inducteurs :

- Si la fréquence augmente, l'impédance augmente et l'intensité diminue (moins de flux).
- Si la fréquence diminue, l'impédance diminue et l'intensité augmente dans l'enroulement.

### 3.2.4 Tension

L'isolation des enroulements constitue l'élément clé de la tension nominale des transformateurs. Avec la tension nominale de fonctionnement, la surtension transitoire (crête) que le transformateur peut supporter est habituellement indiquée. Cette surtension est indiquée comme une tension de tenue au choc.

### 3.2.5 Phase

#### Circuits monophasés sur induit commun

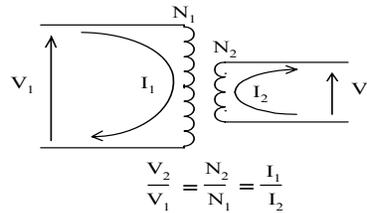
Les gros transformateurs triphasés sont souvent construits à partir de trois transformateurs monophasés raccordés par l'entrée ou la sortie de leurs enroulements. Tel est le cas de la plupart des transformateurs de puissance chargés de transformer le courant de forte intensité produit par les alternateurs et passant par des barres omnibus isolées phase par phase avant de l'envoyer sur les lignes à haute tension. La construction d'un transformateur monophasé individuel est dans ce cas hors de question.

### Circuits monophasés sur induit commun

La plupart des transformateurs sont de ce type pour des raisons d'encombrement et de coûts.

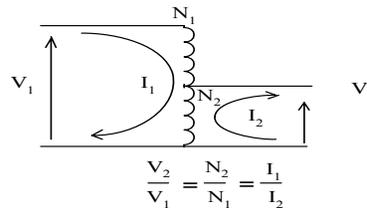
#### 3.2.6 Enroulements

##### Enroulements indépendants (standard).



**Figure 1**  
**Transformateur à deux enroulements**

##### Autotransformateur.



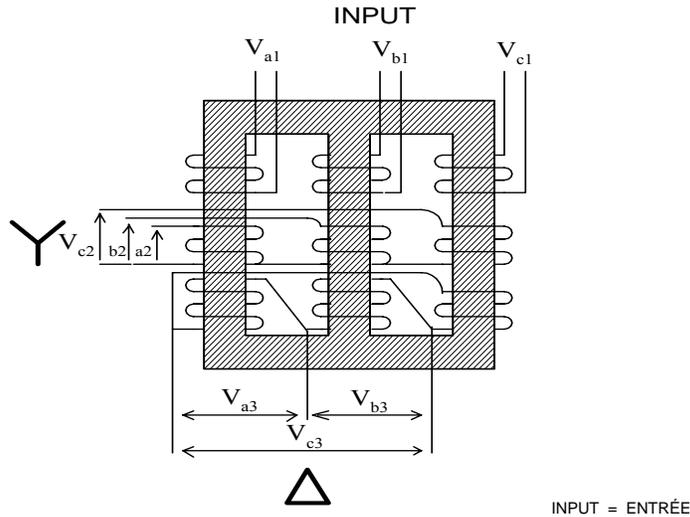
**Figure 2**  
**Autotransformateur**

Les autotransformateurs ont le même rapport de nombres de spires, de tension et d'intensité que les transformateurs constitués de deux enroulements indépendants. La sortie est cependant créée par une prise établie sur l'enroulement individuel. Cette configuration conduit naturellement à raccorder des changeurs de prise pour obtenir des tensions de sortie différentes, comme nous le verrons plus loin.

#### 3.2.7 Connexions

Les types de connexion courants pour les transformateurs sont les suivants : monophasé, triphasé en étoile, triphasé en triangle, et en zigzag (ce dernier type est utilisé spécifiquement par les réactances de mise à la terre, qui ne font pas partie de ce cours).

La figure 3 ci-dessous montre un exemple de connexions pour un transformateur triphasé. Les entrées individuelles triphasées se transforment en deux sorties indépendantes (une en étoile, l'autre en triangle).



**Figure 3**

**Transformateur avec connexions étoile/triangle**

Les enroulements primaires et secondaires de la plupart des transformateurs triphasés sont connectés en étoile ou en triangle.

Le point central (voir figure 3) d'un enroulement en étoile est relié à la terre, ce qui assure l'équilibre des tensions appliquées entre les bornes et la terre. Contrairement à l'enroulement en étoile, l'enroulement en triangle n'est pas doté d'un point commun. Il n'est donc pas relié à la terre au transformateur.

**3.2.8 Prises**

Des prises établies sur les enroulements des transformateurs permettent de changer le rapport du nombre de spires entre l'entrée et la sortie et donc de choisir la tension de sortie.

- Les changeurs de prise hors tension sont utilisés par les transformateurs qui ne nécessitent que très rarement un changement de leur tension de sortie, comme avec les transformateurs de sortie des alternateurs principaux, par exemple.

- Les changeurs de prise sous tension sont utilisés pour répondre fréquemment aux besoins créés par les fluctuations de la demande du client ou du circuit de charge pendant la journée.

### 3.3 CHANGEURS DE PRISE

Si un transformateur doit fournir une tension constante à un circuit de charge malgré des fluctuations du courant de charge ou de la tension d'alimentation, le rapport des spires de ce transformateur doit être modifié. C'est la fonction des changeurs de prise, dont nous allons voir les deux types de plus près :

- Changeur de prise hors tension.
- Changeur de prise sous tension.

Examinons d'abord le fonctionnement d'un changeur de prise standard au moyen d'un exemple simple.

#### Exemple 1

L'enroulement primaire d'un transformateur 13 800 V / 4 160 V est doté de cinq prises raccordées comme suit : à -5 %, à -2 1/2 %, à la valeur nominale, à +2 1/2 % et à +5 % du nombre de spires nominal. Si en charge la tension induite au secondaire diminue à 4 050 V, quelle prise doit être utilisée pour maintenir une tension de 4 160 V au circuit de charge (en partant du principe que la tension d'alimentation demeure constante)? La réponse est la suivante :

#### Réponse :

Pour garder la tension induite au secondaire à 4 160 V (ou le plus près possible de cette valeur), la tension d'alimentation du primaire ou la prise de l'enroulement haute tension doit être changée.

Examinons le rapport suivant :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

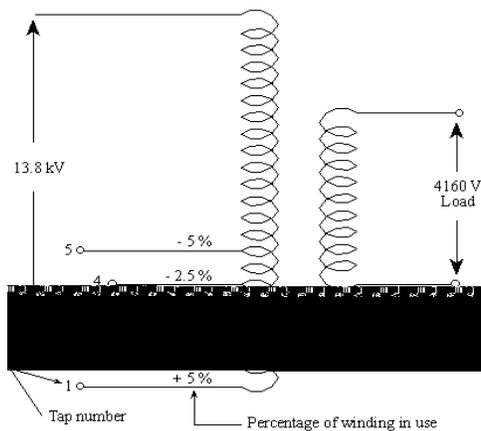
ou  $V_1 N_2 = V_2 N_1$  et nous voyons que pour conserver l'égalité dans cette formule tout en ayant une tension fixe au primaire et un nombre de spires fixe au secondaire, il est nécessaire d'adapter  $V_2$  ou  $N_1$ . Comme l'objectif consiste à augmenter  $V_2$  jusqu'à la valeur nominale,  $N_1$  doit être diminué. L'augmentation de  $V_2$  de

4 050 à 4 160 V nécessite l'augmentation suivante du nombre de volts au secondaire :

$$\frac{4160}{4050} = 1,027 \text{ ou } 102,7 \%. \quad N_1 \text{ doit être diminué à } \frac{1}{1,027} = 0,974 .$$

$N_1$  doit donc être diminué de  $(1 - 0,974) = 0,026$  ou 2.6%.

Une diminution de  $N_1$  de 2,6 % permet d'augmenter la tension de sortie du secondaire. La prise à sélectionner est celle qui permet d'obtenir l'augmentation la plus proche de ce pourcentage. C'est donc celle qui se trouve à -2 1/2 % (voir figure 4).



Tap number = Numéro de prise    Load = Charge    Percentage of winding in use = Pourcentage d'enroulement utilisé

**Figure 4**

### Changeur de prise ordinaire

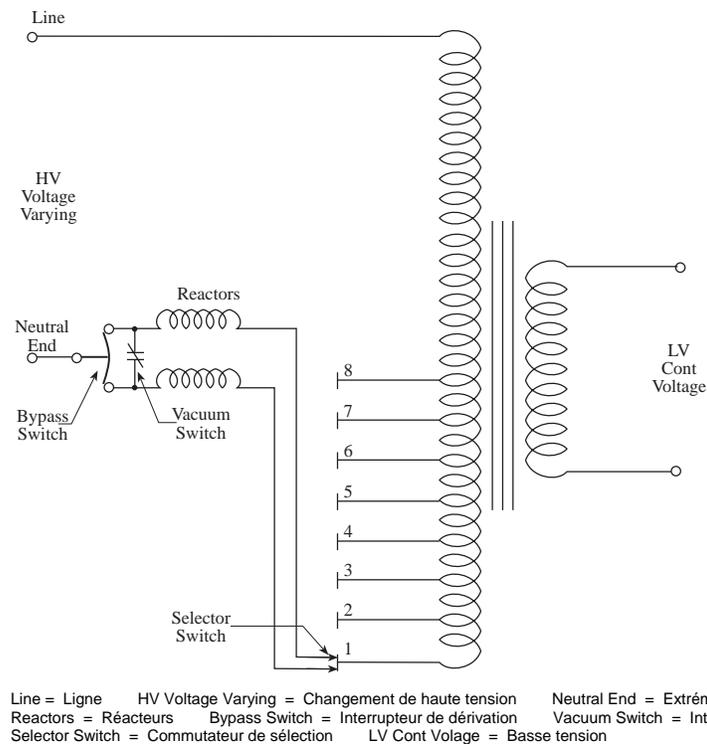
#### 3.3.1 Changeurs de prise hors tension

La plupart des transformateurs associés à la distribution moyenne tension des centrales nucléaires sont dotés de changeurs de prise hors circuit. Avec ce type de changeur de prise, le transformateur doit être placé hors circuit pour que le changement de prise puisse avoir lieu. Les contacts du changeur de prise ne sont destinés à couper aucun courant, même sans charge. Si un changement de prise est tenté sous tension, un arc électrique puissant se forme et peut détruire le changeur de prise et le transformateur.

### 3.3.2 Changeurs de prise sous tension

Les changeurs de prise sous tension permettent comme leur nom l'indique de changer de prise et de réguler la tension pendant que le transformateur est sous tension. Le changement de prise est habituellement effectué sur l'enroulement haute tension pour les deux raisons suivantes :

- Comme le courant est plus faible, les contacts, les fils, etc. du changeur de prise peuvent être plus petits.
- Comme l'enroulement haute tension est situé à l'extérieur de l'enroulement basse tension, il est plus facile d'y connecter le changeur de prise. La figure 5 montre les connexions d'un changeur de prise qui fonctionne sur l'enroulement haute tension du transformateur.



**Figure 5**

### Changeur de prise sous tension

Le changeur de prise se caractérise par quatre éléments essentiels :

### **Les commutateurs de sélection**

Ces commutateurs permettent de sélectionner la position physique des prises sur l'enroulement du transformateur. À cause de leur construction ils ne doivent pas ni ne peuvent être utilisés pour couper ou faire passer un courant de charge.

### **Réacteurs**

Le courant de charge ne doit en aucun cas être interrompu pendant un changement de prise. Il existe donc pendant chaque changement de prise un intervalle où deux tensions s'exercent entre deux prises. Des réacteurs (inducteurs) sont placés dans le circuit pour augmenter l'impédance du circuit du sélecteur et limiter l'intensité du courant circulant à cause de cette différence de tension. Si la charge est normale, un courant de charge égale circule dans l'enroulement de chaque réacteur et les flux magnétiques s'équilibrent pour ne produire aucun flux dans l'induit. Sans flux, il n'y a aucune inductance et donc aucune chute de tension causée par de l'inductance. Une très petite chute de tension se produit cependant à cause de la résistance. Pendant le changement de prise, les commutateurs de sélection permettent de sélectionner différentes prises (voir figure 6) et un courant de circulation passe par le circuit du réacteur. Ce courant de circulation crée un flux magnétique et la réactance inductive qui en résulte limite le débit de ce courant de circulation.

### **Interrupteur sous vide**

Ce dispositif est chargé de couper et de faire passer le courant pendant le déroulement du changement de prise.

### **Interrupteur de dérivation**

Cet interrupteur est mis en fonction pendant le déroulement du changement de prise, mais n'est à aucun moment utilisé pour faire passer ou couper un courant de charge. Il est toujours hors circuit au moment où il change de position.

Un exemple illustrant en détail les étapes d'un changement de prise est donné à la figure 6 (schémas 1 à 10). Le tableau 1 décrit les étapes du changement de la prise 1 à la prise 2 illustré par la figure 6. Les changements de prise s'effectuent toujours de la même manière, en ne pouvant toutefois avoir lieu directement qu'entre prises voisines. Autrement dit, il est impossible de passer directement de la prise 1 à la

Notes

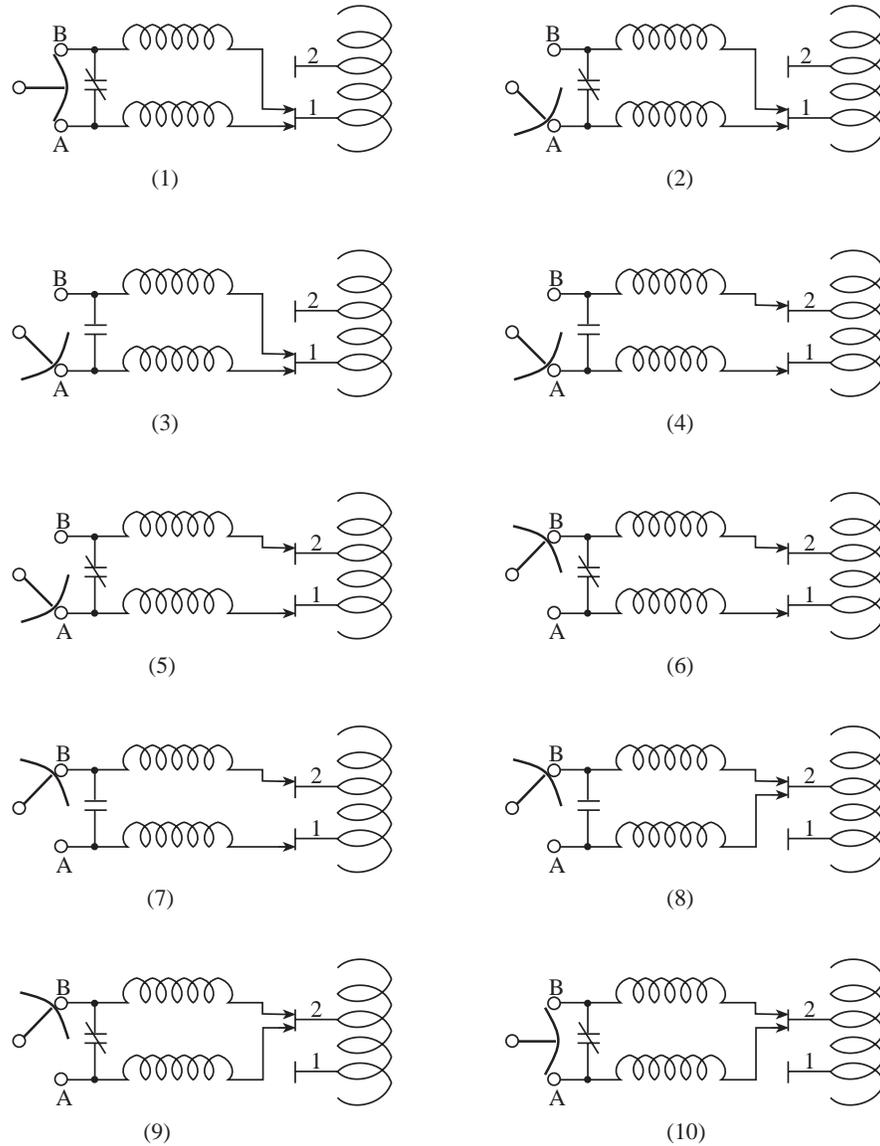
prise 3. Le changement doit se faire de la prise 1 à la prise 2 puis de la prise 2 à la prise 3.

Le mécanisme de changement de prise sous tension est commandé par un moteur. Il peut être utilisé à la main si le moteur tombe en panne. Des liaisons mécaniques à utilisation asservie règlent le déroulement des opérations pour assurer un bon ordre de mise en œuvre des contacts. Si ce mécanisme tombe en panne, le transformateur et le changeur de prise peuvent être sérieusement endommagés.

DETAILS DU FONCTIONNEMENT D'UN CHANGEUR DE PRISE	
1	Position de départ - Changeur de prise sur la prise 1, interrupteur de dérivation fermé (A + B).
2	L'interrupteur de dérivation se place sur le contact inférieur (A).
3	L'interrupteur sous vide se ferme et annule le courant de charge de la partie supérieure du circuit, ce qui libère une moitié du commutateur de sélection, qui peut se déplacer.
4	Comme aucun courant de charge ne passe par le bras supérieur du commutateur de sélection, ce bras peut passer sur la prise 2.
5	L'interrupteur sous vide se ferme - Les deux parties du commutateur de sélection sont sous tension et la circulation du courant est limitée par les réacteurs.
6	L'interrupteur de dérivation se place sur le contact supérieur (B). Aucun arc électrique ne se produit car l'interrupteur sous vide est fermé et en parallèle.
7	L'interrupteur sous vide se ferme et annule le courant de charge de la partie inférieure du circuit, ce qui libère la partie inférieure du commutateur de sélection, qui peut se déplacer.
8	Comme aucun courant de charge ne circule dans la partie inférieure du commutateur de sélection, cette partie se déplace sur la prise 2.
9	L'interrupteur sous vide se ferme - Les deux parties du commutateur de sélection sont sous tension, en parallèle et sur la prise 2.
10	Comme l'interrupteur sous vide est fermé et que le commutateur de sélection est sur une seule prise, l'interrupteur de dérivation peut revenir à sa position d'origine. Les deux circuits de réaction restent normalement en parallèle. Le changement de prise est terminé.

**Tableau 1**  
**Étapes du changement de prise illustré à la figure 6**

Notes



**Figure 6**

**Illustration des étapes d'un changement de prise**

L'exemple précédent porte sur un type de changeur de prise sous tension. Il existe cependant plusieurs autres types, qui peuvent être très différents de celui décrit ici. Les différences portent habituellement sur la façon de sélectionner les prises et sur le niveau de mécanisation. Ce qu'il faut cependant retenir, c'est que tous les changeurs de prise sous tension permettent de changer la tension sans interrompre l'alimentation des circuits.

### 3.4 LIMITES DE FONCTIONNEMENT

Notes

#### 3.4.1 Pertes dans les transformateurs (chaleur)

La température nominale des transformateurs est déterminée par les éléments suivants :

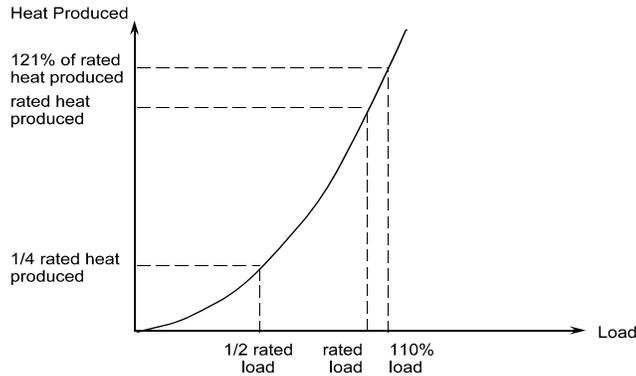
- quantité de chaleur produite dans les enroulements et les connexions;
- quantité de chaleur produite dans l'induit en fer;
- efficacité de l'enlèvement de la chaleur du transformateur lorsque la température nominale est atteinte. À ce point, la chaleur produite doit être égale à celle qui est enlevée ou dissipée - c'est l'équilibre thermique.

Les transformateurs de puissance sont très efficaces, en particulier avec les gros transformateurs fonctionnant à pleine charge. Cependant, tous les transformateurs subissent des pertes. Ces pertes peuvent être classées en pertes dans le cuivre ou pertes  $I^2R$  et en pertes dans le fer ou pertes dans le noyau.

#### 3.4.2 Pertes dans le cuivre (ou dans l'enroulement)

Les pertes dans le cuivre sont résistives. Elles sont proportionnelles au courant de charge. Elles portent parfois le nom de pertes par la charge ou de pertes  $I^2R$ . À mesure que le transformateur est chargé, de la chaleur est produite dans les enroulements primaire et secondaire et aux connexions à cause de l' $I^2R$ . Lorsque la charge est faible, la quantité de chaleur produite est petite mais à mesure que la charge augmente, la quantité de chaleur devient significative. À pleine charge, les enroulements fonctionnent à la température pour laquelle ils ont été calculés ou presque à cette température. La figure 7 montre le rapport entre le courant de charge et la chaleur produite dans les enroulements et aux connexions des transformateurs.

Notes



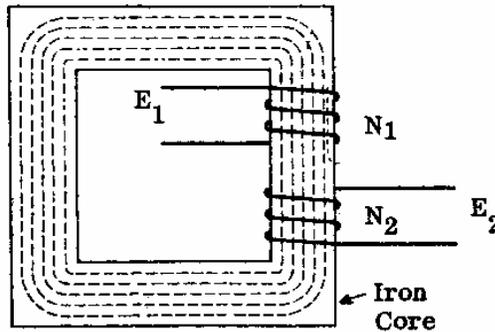
Heat Produced = Chaleur produite      121% of rated heat produced = 121 % de la chaleur nominale produite  
 rated heat produced = Chaleur nominale produite      1/4 rated heat produced = 1/4 de la chaleur nominale produite  
 1/2 rated load = 1/2 de la charge nominale      rated load = Charge nominale  
 110% rated load = 110 % de la charge nominale      Load = Charge

**Figure 7**

**Rapport entre la charge et la chaleur produite dans les enroulements des transformateurs**

**3.4.3 Pertes dans le fer (ou dans le noyau)**

Les pertes dans le fer sont dues au courant de Foucault, qui est un courant parasite dans le noyau des transformateurs. Nous avons vu dans le module 1 de cette série que des lignes de flux se forment autour des conducteurs dans lesquels circule du courant. La plus grande partie du flux circule dans le noyau de la façon illustrée à la figure 8 suivante.



Iron Core = Noyau en fer

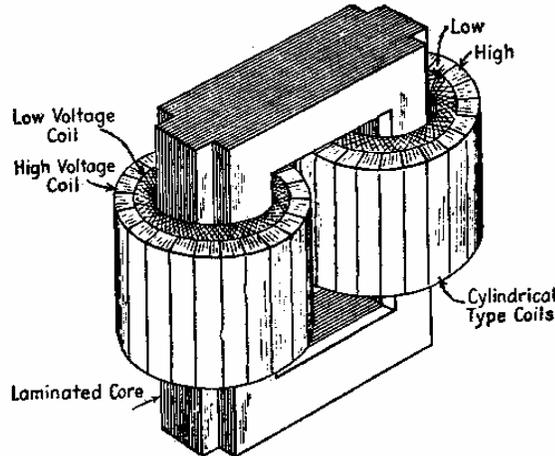
**Figure 8**

**Flux en circulation dans le noyau**

Une certaine partie du flux essaie cependant de circuler en s'écartant des lignes normales, ce qui provoque la formation d'un courant de Foucault dans le noyau même. Ce courant porte parfois le nom de courant de Foucault-Eddy (de l'anglais *eddy*, tourbillon) car il s'ajoute en désordre au courant normal. Pour combattre cet effet, le noyau est constitué de lamelles, comme l'illustre la figure 9. Ces lamelles permettent d'obtenir un espace minuscule entre les plaques. Comme le

flux magnétique circule mieux dans le fer que dans l'air ou l'huile, les pertes dans le fer sont atténuées.

Notes



Low Voltage Coil = Bobine basse tension      High Voltage Coil = Bobine haute tension  
 Laminated Core = Noyau en lamelles      Low = Haute tension  
 High = Basse tension      Cylindrical Type Coils = Bobines cylindriques

**Figure 9**

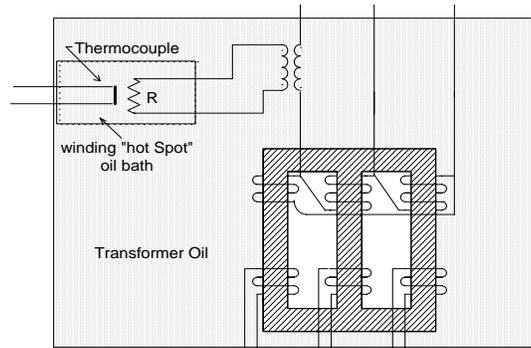
**Construction en lamelles du noyau d'un transformateur**

**3.4.4 Limites de température des transformateurs**

Avec les transformateurs secs (refroidis à l'air et dont les enroulements sont normalement isolés avec de la résine de silicone), une limite de température de 155 °C est imposée. Ces transformateurs sont refroidis grâce à de l'air qui circule à travers les enroulements et sur le noyau. Si la température ambiante maximale est de 40 °C, l'augmentation maximale de la température doit être limitée à  $155^\circ - 40^\circ = 115^\circ \text{C}$ .

Les transformateurs isolés à l'huile sont habituellement dotés de dispositifs de mesure de la température de l'huile et des enroulements. Un dispositif particulier permet de simuler la mesure de la température des enroulements. Il porte le nom de point chaud. La température au point chaud est mesurée à une résistance placée dans l'huile et par laquelle passe une quantité représentative de courant de charge (voir la figure 10).

Notes



Thermocouple = Thermocouple winding "hot Spot" oil bath = Bain d'huile du « point chaud de l'enroulement »  
 Transformer Oil = Huile du transformateur

Figure 10

### Point chaud d'un transformateur

Nota : Il est important de surveiller les températures de l'huile et du point chaud. Si le transformateur n'est pas suffisamment refroidi, la charge doit être diminuée.

#### 3.4.5 Limites de courant

Le courant a deux effets direct sur les transformateurs :

Il produit de la chaleur dans les enroulements, comme nous venons de le voir.

Il produit aux bornes de l'enroulement de sortie une chute de tension proportionnelle au courant de charge. À mesure que le transformateur est chargé, la tension du secondaire chute à cause de la résistance et de la réactance de l'enroulement.

**Exemple** : Un transformateur dont l'impédance est de 5 % subit au secondaire une chute de tension de 5 % entre le moment où aucune charge ne lui est appliquée et le moment où la pleine charge lui est appliquée. À la moitié de la charge, la chute de tension est de la moitié, c'est-à-dire de 2,5 %.

De toute façon, la charge d'un transformateur doit toujours être inférieure à celle du nombre de VA nominal.

#### 3.4.6 Limites de tension et de fréquence

Nous avons vu auparavant que la tension et la fréquence de fonctionnement doivent être gardées dans des limites nominales à

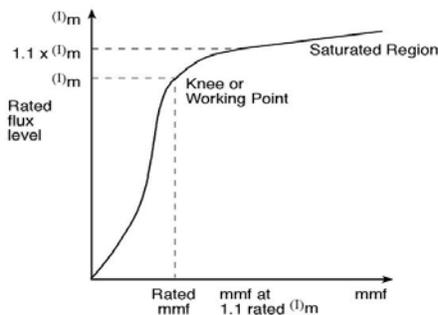
cause de la construction physique des transformateurs (isolation des enroulements et construction du noyau). Les effets subtils de ces paramètres sur la surchauffe du noyau sont parfois sous-estimés.

Si un transformateur fonctionne à sa tension et à la fréquence nominales, il fonctionne à la valeur nominale de flux dans le noyau. Si la tension augmente pendant que la fréquence reste la même ou si la fréquence baisse pendant que la tension reste la même, le flux augmente dans le noyau. La température de ce noyau augmente à cause des effets d'hystérésis et de courant de Foucault dans le noyau.

Un augmentation de tension de 10 % au-dessus de la valeur nominale donne un niveau de flux de 10 % au-dessus de la valeur nominale. La figure 11 montre que si le niveau du flux dépasse la normale de 10 %, le fer commence à se saturer. Dès que le fer commence à se saturer, la chaleur augmente rapidement à cause des effets de courant de Foucault et d'hystérésis (voir la figure 12).

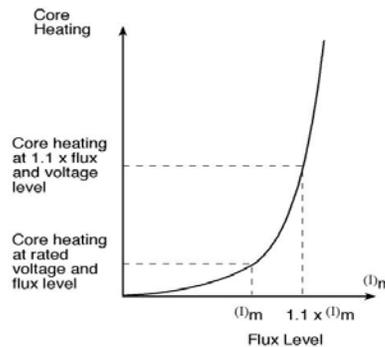
Pour cette raison, la tension appliquée aux transformateurs ne doit jamais pouvoir dépasser la valeur nominale de plus de 10 %.

Si cette précaution n'est pas prise, la surchauffe du noyau est inévitable. Cette surchauffe peut provoquer la détérioration de l'isolant de chaque lamelle, provoquant l'apparition d'importants courants de Foucault et entraînant une surchauffe excessive. Cela peut amener la détérioration complète du noyau avec dans certains cas extrêmes la fusion des lamelles de fer.



Rated flux level = Niveau nominal du flux  
 Saturated Region = Région saturée  
 Knee or Working Point = Coude ou point de fonctionnement  
 Rated mmf = Force magnétomotrice nominale (Fm)  
 mmf at 1.1 rated = Fm à 1,1 Fm nominale  
 mmf = Force magnétomotrice =Fm

**Figure 11 - Courbe de magnétisation représentative du noyau d'un transformateur**



Core Heating = Surchauffe du noyau  
 Core heating at 1.1 x flux and voltage level = Chauffage du noyau à 1,1 x flux nominal et 1,1 x tension nominale  
 Core heating at rated voltage and flux level = chauffage du noyau à la tension et au niveau de flux nominaux  
 Flux level = Niveau de flux

**Figure 12 - Rapport entre le flux et la surchauffe dans le noyau**

### **3.5 Transformateurs d'instrument**

Les transformateurs fonctionnent tous de la même façon : ils changent la tension et l'intensité d'un circuit électrique et transfèrent de l'énergie au moyen d'un circuit magnétique. Les caractéristiques particulières présentant de l'intérêt avec les transformateurs changent un peu selon l'utilisation de ces transformateurs. Cette rubrique a jusque là porté surtout sur les caractéristiques et les paramètres concernant les transformateurs de puissance, mais les circuits électriques comprennent une autre catégorie importante de transformateurs : les transformateurs d'instrument. Ces transformateurs servent à mesurer la tension et l'intensité des circuits électriques et à diminuer cette tension et cette intensité à des valeurs permettant d'assurer la sécurité lorsqu'elles sont appliquées à des circuits de protection ou de mesure. Les transformateurs d'instrument sont classés en deux types : les transformateurs de potentiel (ou de tension) et les transformateurs de courant (ou d'intensité).

#### **3.5.1 Transformateurs de potentiel**

Les transformateurs de potentiel sont des transformateurs à deux enroulements calculés pour mesurer des tensions avec précision. Un ou deux ensembles de transformateurs de potentiel sont habituellement raccordés à chaque bus de distribution électrique d'une installation. Leur tension de sortie est généralement de 120 V c. a. Leur précision est établie à une charge spécifique et à un facteur de puissance spécifique.

#### **3.5.2 Transformateurs de courant**

Les transformateurs de courant mesurent le courant d'un circuit. Ils sont souvent constitués d'un seul enroulement enveloppant un noyau toroïdal. L'enroulement primaire est simplement le conducteur dans lequel circule le courant à mesurer. Le secondaire des transformateurs de courant est doté d'une sortie standard de 5 A ou 1 A.

La précision des transformateurs de mesure des circuits est établie aux intensités de courant normales. La précision des transformateurs utilisés pour protéger les circuits est établie aux intensités de panne des circuits. De nombreux transformateurs de courant sont dotés d'un enroulement secondaire à prises pour offrir divers rapports de transformation.

Les transformateurs de courant se caractérisent par une petite bizarrerie. Un phénomène électrique vraiment net se produit avec ces

transformateurs. Le secondaire doit toujours être en courts-circuit ou connecté à une charge de faible impédance, sinon une très haute tension peut y être induite. Cette haute tension peut endommager l'enroulement ou l'isolant et/ou présenter un risque pour le personnel. De plus, elle provoque la circulation d'un flux magnétique beaucoup trop important dans le noyau, ce qui peut altérer définitivement la précision du transformateur.

Notes

## QUESTIONS DE RÉVISION - TRANSFORMATEURS

1. Indiquer le but d'un changeur de prise dans un circuit électrique.
2. Décrire brièvement la construction d'un changeur de prise en indiquant comment elle permet d'atteindre le but fixé.
3. Expliquer la principale limite imposée au fonctionnement des changeurs de prise hors tension.
4. Il est possible de trouver des changeurs de prise sous tension et hors tension dans une centrale nucléaire. Indiquer où les changeurs de prise sous tension sont habituellement situés physiquement.
5. Le fonctionnement d'un transformateur est limité par la chaleur. La chaleur est produite dans le noyau et dans les enroulements. Expliquer la ou les sources de la chaleur produite dans ces endroits.
6. Les paramètres électriques (la tension, l'intensité et la fréquence) ont tous un effet sur la quantité de chaleur produite dans un transformateur. Expliquer comment la variation de chacun de ces paramètres par rapport à sa valeur normale influence la production de chaleur dans le transformateur.
7. Un transformateur monophasé dont le rapport de tension nominal est de 4 160 à 600 volts est doté d'un changeur de prise sur son enroulement haute tension. Ce changeur de prise est raccordé à des prises de 0,  $\pm 2\frac{1}{2}$  et  $\pm 5$  %. Quelle prise doit être sélectionnée pour amener la tension le plus près possible de 600 volts?

**PAGE VOLONTAIREMENT LAISSÉE EN BLANC**

Notes

## 4 ALTERNATEURS

### 4.1 INTRODUCTION

Les alternateurs peuvent être perçus comme la véritable raison d'être des centrales électriques. Le fonctionnement des alternateurs à turbine est tellement crucial qu'il n'est classé en importance qu'après celui des réacteurs nucléaires et des circuits à vapeur de forte puissance. Les principes fondamentaux des alternateurs doivent être bien compris pour que les méthodes d'utilisation et les rapports d'événement qui les concernent soient bien compris aussi. Pour étudier ce sujet, ce module s'est fixé pour but d'examiner les problèmes fondamentaux qui se posent dans toutes les centrales nucléaires, mais sans s'arrêter aux détails des nombreuses constructions possibles.

Avec ce module, nous allons examiner les machines synchrones et les besoins liés au démarrage et à la synchronisation préalable des alternateurs. Nous allons ensuite étudier le synchronisme physique des alternateurs puis la mise en charge de ces alternateurs. Nous concluerons en voyant certaines conditions défavorables au fonctionnement des alternateurs et en étudiant le problème posé par la production de chaleur dans les alternateurs.

### 4.2 PRINCIPES FONDAMENTAUX DU FONCTIONNEMENT DES ALTERNATEURS

Le premier module de ce cours traite des trois éléments rattachés à l'induction électromagnétique :

- un champ magnétique;
- des bobines de fil conducteur dans lesquelles une tension est induite;
- un changement entre ce champ et ces bobines.

Avec les alternateurs électriques, le champ magnétique est placé sur la partie rotative (le rotor) de la machine. L'aimant est un électroaimant, le rotor est doté d'enroulements qui sont alimentés par une source de courant continu appelé circuit d'excitation. Le champ c. c. d'un alternateur de 800 MW qui fonctionne à pleine charge est d'environ 400 V c. c. et 4 000 A. Le rotor est entraîné par une force motrice, qui

dans le cas des alternateurs principaux des centrales électriques qui nous intéressent est la vapeur.

Les spires de fil conducteur dans lesquelles la tension est induite sont insérées dans le fer du stator. Le champ magnétique en rotation entraîne un changement continu du champ qui relie ces conducteurs.

Le champ magnétique en continu change induit une tension dans ces conducteurs. La tension ainsi induite est sinusoïdale. L'amplitude de la tension dépend de la force du champ magnétique et de la vitesse de rotation du rotor. La période de l'onde de forme de la tension ne dépend que de la vitesse de rotation.

Avec les alternateurs triphasés, le stator est doté de trois enroulements placés à intervalles de  $120^\circ$ . La rotation du rotor induit une tension sinusoïdale dans chaque enroulement. Ces tensions sont cependant décalées entre elles de  $120^\circ$ .

### 4.3 FONCTIONNEMENT SYNCHRONES

Pour quantité de gens, le fonctionnement d'un alternateur synchrone est particulièrement mystérieux. Voilà une énorme machine qui tourne à vitesse constante quelle que soit l'ouverture de la vanne de vapeur de 4 à 24 pouces qui la commande, et dans le même temps cette vanne peut même être complètement ouverte ou complètement fermée. Le changement du flux de vapeur entraînant la machine change la puissance de sortie de cette machine mais n'a aucun effet sur sa vitesse.

Et il y a aussi l'étrange principe de la puissance réactive. Les débits de puissance réactive ne sont pas censés consommer d'énergie mais ils changent quand même à mesure que les vannes de vapeur s'ouvrent ou se ferment.

Le changement de l'excitation d'un alternateur change la tension exercée aux bornes, mais de peu. L'effet est négligeable à côté de celui que peut produire le changement d'excitation sur la machine si elle n'est ni synchronisée ni raccordée au réseau de distribution électrique. Cette partie du cours va, nous l'espérons, permettre de bien faire comprendre certains de ces phénomènes.

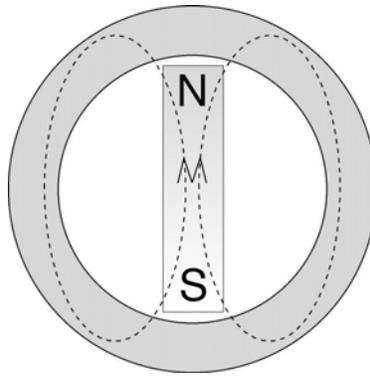
#### 4.3.1 Champ magnétique

L'une des meilleures façons de comprendre l'étrange comportement des alternateurs est de se faire une certaine image mentale du champ magnétique qui y est produit. Il n'existe qu'un champ magnétique,

Notes

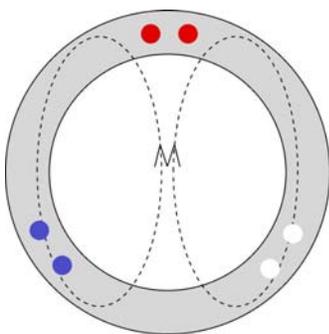
mais si nous partons du principe qu'il y en a deux, une bonne partie du comportement de la machine peut être expliqué par l'interaction de ces deux champs. Pour simplifier, imaginons un alternateur à deux pôles. (Les explications sont les mêmes pour les alternateurs à plus de deux pôles, mais les interactions produites avec ces alternateurs demanderaient des images et des mots plus compliqués.)

Le premier champ magnétique est celui établi dans le rotor par le circuit d'excitation. La puissance de ce champ est constante et il tourne dans la machine à la même vitesse que le rotor. L'amplitude est directement proportionnelle au courant inducteur (à condition que le circuit magnétique ne soit pas saturé).



**Figure 1**  
**Champ magnétique du rotor**

Le second champ magnétique est celui établi par la circulation du courant dans l'enroulement triphasé du stator. Si une alimentation triphasée est connectée à trois enroulements disposés autour du noyau de l'alternateur, l'enroulement produit un champ magnétique rotatif. La force du champ magnétique dépend de la circulation du courant dans l'enroulement et la vitesse de rotation dépend de la fréquence de l'alimentation. Avec une machine à deux pôles alimentée à une fréquence de 60 Hz, la vitesse de rotation est de 60 tours par secondes, soit 3 600 tr/min.



**Figure 2**  
**Champ magnétique du stator**

C'est l'interaction entre ces deux champs magnétiques qui produit dans l'alternateur la force nécessaire pour le transfert de l'énergie au réseau de distribution électrique. Avec les gros alternateurs, cette force peut être de l'ordre de  $10^6$  Newtons. Une telle force permettrait d'envoyer des vaisseaux spatiaux de bonne taille dans l'espace. Dans les machines synchrones, c'est une force de cette ordre de grandeur qui fait tourner le rotor à la vitesse déterminée par la fréquence du réseau. Le champ magnétique produit par le courant du stator et le champ magnétique du rotor se verrouillent l'un à l'autre et tournent à la même vitesse dans une rotation sans fin.

Les champs magnétiques ne s'alignent pas parfaitement, à moins que la machine ne produise aucune puissance à la sortie. Un angle existe entre ces champs. Cet angle porte le nom d'angle de charge ou d'angle de couple. Il est lié à la puissance produite par la machine.

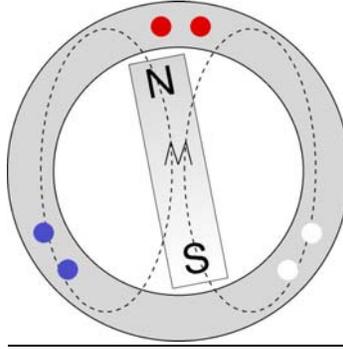
#### 4.3.2 Force entre les champs magnétiques

La force qui existe entre les champs magnétiques est la force qui existe entre l'arbre et le réseau de distribution électrique. C'est cette force qui permet de transférer l'énergie de l'arbre au réseau électrique.

Si les champs sont parfaitement alignés et ne forment donc aucun angle entre eux, aucune force n'est produite et aucune énergie n'est transférée. C'est l'état de charge à vide. Les vannes régulatrices sont ouvertes pour laisser passer juste assez de vapeur dans la machine pour contrer les pertes dues à la friction et les pertes à l'enroulement de la machine, qui continue ainsi de tourner à la vitesse de synchronisation. Si les vannes régulatrices sont ouvertes, une plus grande quantité de vapeur est admise et le rotor commence à accélérer. À mesure qu'il prend de l'avance, les champs magnétiques se désalignent dans l'alternateur. Cela crée entre ces champs une force qui s'oppose à l'accélération de la machine. L'énergie passe de la machine au réseau

Notes

de distribution électrique. La vitesse de circulation de l'énergie produite par la machine ou la puissance de sortie de la machine est proportionnelle à la force des champs magnétiques de la machine et du sinus de l'angle de charge.



**Figure 3**  
**Force entre les champs**

Si une plus grande quantité de vapeur est admise, l'angle augmente (et le sinus de l'angle augmente aussi), la force s'opposant à la rotation augmente et la vitesse de la machine reste constante. Si la force d'un des deux champs magnétiques est augmentée, la puissance de sortie de la machine reste constante, mais la force augmentée entre les champs repousse le rotor vers sa position de charge nulle et l'angle de charge augmente. La puissance de sortie ne peut pas changer. C'est le flux de la vapeur dirigée dans la machine qui détermine seul la puissance. L'énergie d'entrée est toujours égale à l'énergie de sortie.

Deux éléments peuvent subir des changements pendant le fonctionnement d'une machine synchrone individuelle : la vanne régulatrice et la force du champ du rotor. Ces changements ont une influence sur l'angle de charge. Si la force du champ est augmentée, l'angle de charge diminue, mais la charge reste la même. Si le flux de vapeur est augmenté, l'angle de charge augmente, et la puissance de sortie augmente également.

#### 4.3.3 Alternateur fonctionnant comme un moteur

Si les vannes régulatrices sont fermées et laissent entrer moins d'énergie que nécessaire pour compenser les pertes dues à la friction, le rotor a tendance à ralentir. Les champs magnétiques se désalignent et une force est produite pour pousser le rotor dans le sens de la rotation. L'alternateur fonctionne à ce moment comme un moteur synchrone. Le fonctionnement à l'état de moteur peut être ou ne pas être imposé à un alternateur. La plupart des alternateurs à turbine des

centrales CANDU peuvent fonctionner comme un moteur pendant un temps relativement court.

Notes

#### 4.3.4 Limites

Ce phénomène a ses limites. Si la machine atteint les  $90^\circ$ , elle atteint en même temps la puissance de sortie maximale permise par la force des champs magnétiques. Si la puissance appliquée à l'entrée de la machine pousse le rotor au delà des  $90^\circ$ , la force de retardement appliquée à l'arbre n'augmente plus mais se met à diminuer. Le rotor se met à accélérer. Il se met à tourner plus vite que le champ magnétique de l'induit. Mais n'oublions pas les millions de Newtons de la force que les champs magnétiques peuvent produire. Le rotor cherche à prendre un tour de plus, ce qui fait subir une très forte contrainte à la machine, car à ce moment l'incroyable force magnétique impose à l'arbre un tel couple que la machine risque d'être détruite avant même d'être accélérée. Un tel couple ne peut qu'endommager la machine, et parfois de façon catastrophique. Ce phénomène s'appelle le glissement de pôle. Notons ici que la mesure de l'angle de charge est une mesure d'angle électrique. Ces angles ne sont équivalents que dans le cas des machines à deux pôles. Avec les machines à quatre pôles, l'angle de décalage mécanique de l'arbre de l'alternateur fait la moitié de l'angle de charge. Avec les machines dotées d'encore plus de pôles, l'angle mécanique est encore plus petit.

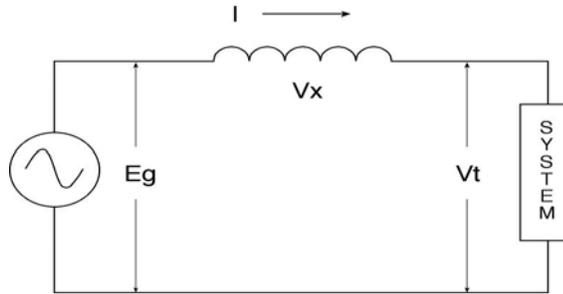
#### 4.3.5 Alternateur synchrone - Circuit équivalent

La première idée qui vient à l'esprit pour expliquer le comportement d'un alternateur synchrone est celle de l'angle de charge, avec sa façon de changer en fonction de la force du champ et de changer en fonction de la charge. La seconde idée est celle du circuit équivalent simplifié. Ce circuit comprend un alternateur, un inducteur et une charge. Une tension fixe est appliquée à ce circuit par le réseau électrique. L'alternateur est une machine théorique. La tension  $E_g$  produite est directement proportionnelle à la force du champ magnétique du rotor.

Si le courant d'excitation est augmenté,  $E_g$  augmente. La phase de  $E_g$  est déterminée par l'angle de charge. Si l'angle de charge est augmenté, l'angle de phase de  $E_g$  avance. La réactance inductive  $X$  représente l'impédance des enroulements de la machine. La résistance des enroulements est petite par rapport à la réactance inductive. Si le circuit n'est destiné qu'à donner une idée du fonctionnement de la machine, il est possible d'ignorer cette résistance au lieu de l'intégrer à une analyse qui deviendrait trop détaillée. La tension  $V_t$  appliquée aux bornes est une tension déterminée par le reste du réseau électrique. Un

Notes

alternateur seul a très peu d'effet sur la fréquence et la tension du réseau de distribution électrique. Avec notre simple petit alternateur, la tension du réseau est celle appliquée aux bornes de la machine. Rappelons-nous certains éléments importants : la chute de tension à travers  $X$  ( $V_X$ ) précède le courant de  $90^\circ$  et  $V_t$  et  $V_X$  s'additionnent pour donner  $E_G$ . Rappelons-nous aussi que l'addition de tout élément c. a. oblige à utiliser des phaseurs.

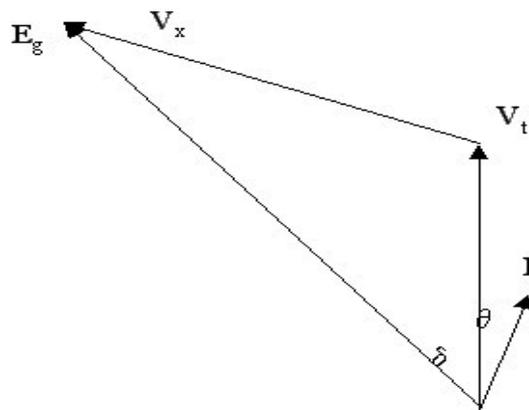


SYSTEM = SYSTÈME

**Figure 4****Alternateur - Circuit équivalent simplifié****4.4 DIAGRAMME DE PHASEUR EN RÉGIME ÉTABLI**

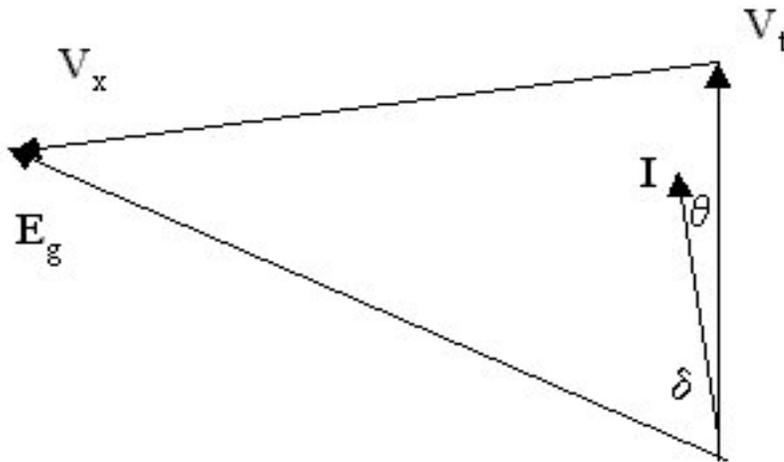
Un alternateur fonctionne habituellement avec un facteur de puissance en retard aux bornes. Le courant de la machine est en retard sur la tension aux bornes par un angle  $\theta$ . L'angle  $\delta$  est l'angle formé entre la tension aux bornes et la tension produite. La chute de tension par la réactance inductive est en avance de  $90^\circ$  sur le courant et s'ajoute à la tension aux bornes dans la tension produite.

La puissance de sortie de la machine est égale à  $VI \cos\theta$  et la puissance réactive est égale à  $VI \sin\theta$ .

**Figure 5****Diagramme de phaseur d'un alternateur en charge**

#### 4.4.1 Augmentation du flux de vapeur

Si le flux de la vapeur dirigée vers la machine augmente, l'angle de charge augmente et la puissance de sortie augmente.  $E_g$  prend de l'avance. L'angle de puissance  $\theta$  est influencé par le changement de l'élément de puissance réelle et par l'augmentation du décalage de phase entre  $E_g$  et  $V_t$ . Cela entraîne une augmentation de l'avance de l'angle de puissance. La puissance de sortie réactive de la machine diminue à 0 puis augmente de nouveau dans le sens de l'avance. Cela dépend en totalité de la valeur d'augmentation de la puissance.



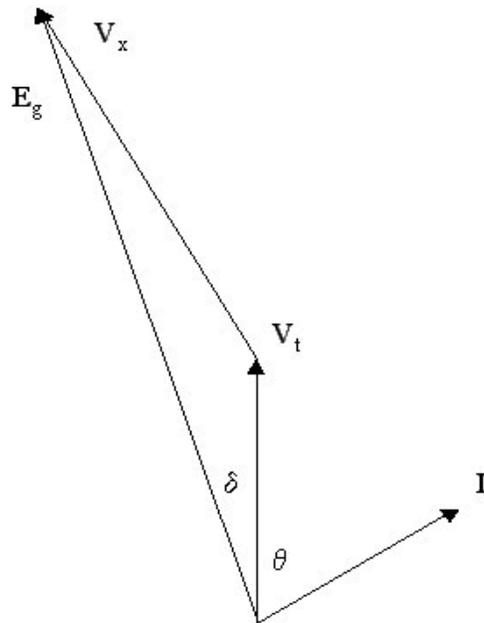
**Figure 6**  
**Augmentation de la charge**

#### 4.4.2 Augmentation de l'excitation

Si l'excitation est changée, la puissance de sortie ne change pas. L'énergie qui circule dans la machine est déterminée par le flux de vapeur. Si l'excitation est augmentée, la valeur de  $E_g$  augmente et la force du champ magnétique augmente. Cette augmentation entraîne la diminution de l'angle de charge. Le courant du stator est forcé à prendre encore plus de retard.

Il suffit de mémoriser ce petit circuit et de se rappeler qu'un changement du flux de vapeur a pour effet de changer la puissance de sortie et l'angle de charge et qu'un changement de l'excitation a pour effet de changer la tension produite et l'angle de charge pour pouvoir prévoir le comportement global des alternateurs dans de nombreux cas.

Notes



**Figure 6 a**  
**Augmentation de l'excitation**

## 4.5 DÉMARRAGE DE SYNCHRONISATION PRÉALABLE AU COUPLAGE DES ALTERNATEURS

### 4.5.1 Démarrage

Le terme démarrage s'applique à la totalité du processus nécessaire pour amener l'alternateur entre le moment où il ne tourne qu'à quelques tr/min et le moment où il tourne à la vitesse de synchronisation. La vitesse de synchronisation est la vitesse de rotation du rotor qui permet à la fréquence de sortie du stator de correspondre à celle du réseau de distribution électrique extérieur (60 Hz) si le champ d'excitation est appliqué. Dans les centrales CANDU, les conditions d'utilisation de la vapeur oblige la turbine à tourner plus lentement. Les alternateurs utilisés dans ces centrales sont donc dotés d'un rotor à 4 pôles pouvant tourner à une vitesse de synchronisation de 1 800 tr/min pour qu'une fréquence de 60 Hz puisse être produite à la sortie..

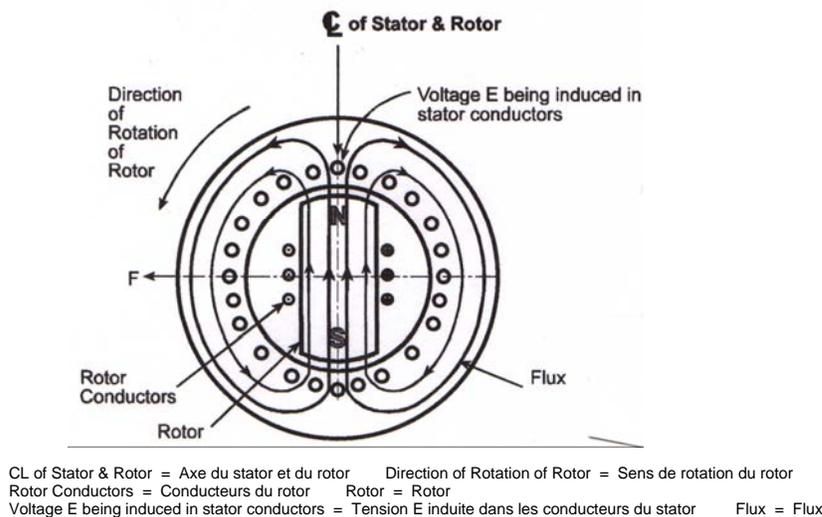
Les nombreux processus nécessaires pour amener un alternateur à la vitesse de synchronisation sont traités dans d'autres modules (Physique des réacteurs, Chaleur et thermodynamique, etc.). Avec ce module, il nous suffit de savoir que l'énergie thermique venant d'une chaudière sous forme de vapeur est projetée contre les aubes d'une turbine pour être convertie en énergie mécanique. Cette énergie

mécanique fait tourner les rotors pour amener l'arbre de la turbine et de l'alternateur à tourner à la vitesse de synchronisation.

Notes

#### 4.5.2 Application du champ du rotor

Si une tension c. c. est appliquée à l'enroulement du rotor, un courant d'excitation circule dans cet enroulement et une tension se crée au rotor. Lorsque le rotor tourne et passe le long des enroulements du stator, une tension est produite au stator, comme le montre la figure 7 ci-dessous.



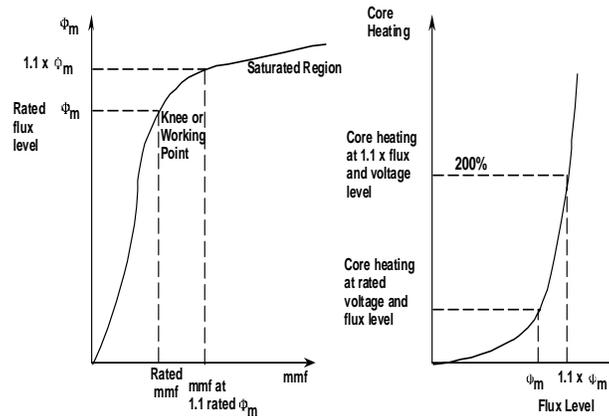
**Figure 7**

#### Tension au stator de l'alternateur

Pour éviter toute saturation du circuit magnétique, il est très important que l'excitation ne soit appliquée au rotor qu'à la vitesse nominale ou presque. Dans le noyau en fer d'un dispositif c. a., le flux est proportionnel à la tension appliquée et inversement proportionnelle à la fréquence ( $\phi \propto V/f$ ). Ce rapport, qui s'exprime par un nombre de volts par hertz, doit toujours être maintenu dans la plage de fonctionnement normal du dispositif.

Si la tension  $V$  du champ d'excitation est appliquée à une vitesse inférieure à la vitesse nominale du rotor, le fer du rotor et du stator se sature. Ce surplus de flux (voir figure 8 ci-dessous) provoque une surchauffe du fer du rotor et du stator et la circulation d'un courant de forte intensité dans le rotor, ce qui provoque le chauffage  $I^2R$  de l'enroulement du rotor. Si un flux excessif est appliqué sans contrôle à un alternateur, une surchauffe rapide du noyau du rotor et du stator peut se produire, ce qui peut endommager cet alternateur.

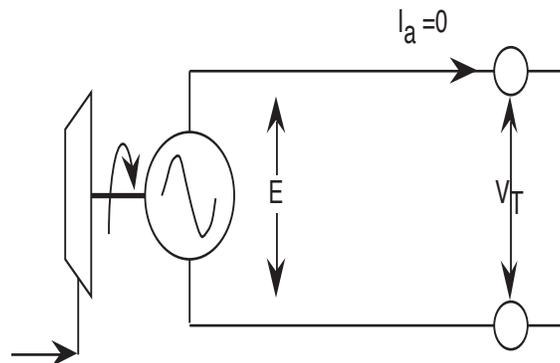
Notes



Rated flux level = Niveau de flux nominal      Saturated Region = Région saturée  
 Knee or Working Point = Coude ou point de fonctionnement      Rated mmf = Force magnétomotrice (Fm) nominale  
 mmf at 1.1 rated = Fm à 1,1 de la Fm nominale      mmf = Force magnétomotrice (Fm)      Core Heating = Chauffage du noyau  
 Core heating at 1.1 x flux and voltage and flux level = Chauffage du noyau à 1,1 x tension et 1,1 niveau de flux  
 Core heating at rated voltage and flux level = Chauffage du noyau à la tension nominale et au niveau de flux nominal  
 Flux level = Niveau de flux

**Figure 8**  
**Surchauffe d'un noyau en fonction du flux magnétique**

Les moteurs et les alternateurs sont simplement des transformateurs dotés d'enroulements en rotation. Le courant du champ du rotor est augmenté pour augmenter la tension de sortie induite  $E$  (figure 9). Comme le disjoncteur n'est pas encore fermé et qu'aucun courant ne circule dans le stator, cette tension  $E$  est en réalité la tension aux bornes  $V_T$ .

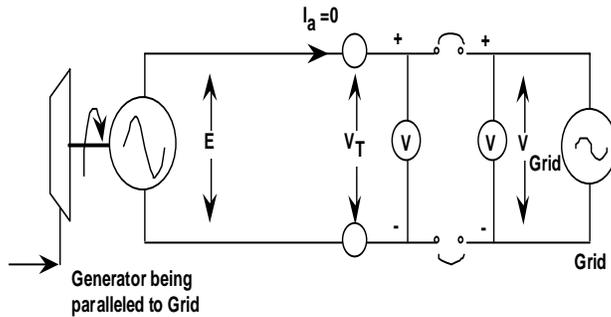


**Figure 9**  
**Alternateur avec charge à vide**

L'excitation du rotor est habituellement amenée à un point de réglage du stabilisateur automatique de tension (ou AVR, de l'anglais *Automatic Voltage Regulator*) pour correspondre au réseau électrique extérieur. Mais voyons pour commencer l'exécution manuelle de la synchronisation.

## 4.6 PRÉPARATION DE LA SYNCHRONISATION

Pour synchroniser un alternateur avec le réseau de distribution électrique (figure 8), quatre conditions doivent être remplies.



Generator being parallel to Grid = Alternateur parallèle au réseau électrique    Grid = Réseau électrique  
Grid = Réseau électrique

**Figure 10**

### Synchronisation d'un alternateur avec le réseau de distribution électrique

#### 4.6.1 Ordre des phases

L'ordre (de rotation) des trois phases de l'alternateur doit être le même que celui des trois phases du réseau électrique.

Les seuls moments où l'ordre des phases peut ne pas être le bon sont les suivants : à l'installation d'origine et après une intervention pour entretien ou dépannage. Le problème peut avoir deux origines : le câblage d'alimentation du transformateur ou de l'alternateur a été inversé lors d'une intervention, ou c'est le câblage du transformateur de tension qui a été inversé.

#### 4.6.2 Amplitude la tension

L'amplitude de la tension sinusoïdale produite par l'alternateur doit être égale à celle de la tension sinusoïdale du réseau électrique.

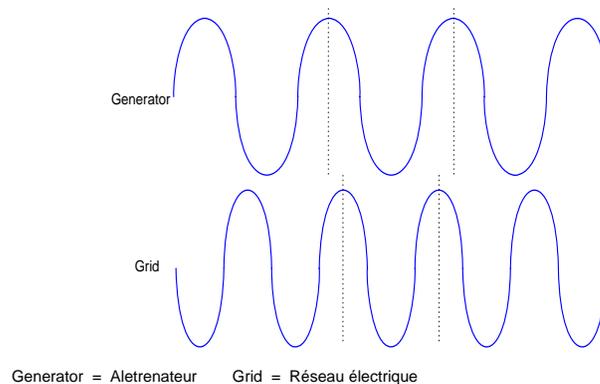
Si toutes les conditions sont respectées mais que ces deux tensions ne sont pas égales, une différence de potentiel existe et si alors le disjoncteur de sortie (c. a.) de l'alternateur est fermé, le nombre de mégavoltampères produits peut être particulièrement important. N'oublions pas : avant qu'un alternateur ne soit synchronisé avec le réseau électrique, aucun courant n'y circule et aucune réaction d'induit n'y a lieu, et donc la tension interne de l'alternateur est la même que la tension exercée aux bornes de cet alternateur. Lorsque la tension de l'alternateur est supérieure à celle du réseau électrique, la tension interne de l'alternateur est supérieure à celle de ce réseau. Si

## Notes

l'alternateur est alors connecté au réseau électrique, il est surexcité et produit des mégavoltampères. Lorsque la tension de l'alternateur est inférieure à celle du réseau électrique, la tension interne de l'alternateur est inférieure à celle de ce réseau. Si l'alternateur est alors connecté au réseau électrique, il est sous-excité et absorbe des mégavoltampères.

### 4.6.3 Fréquence

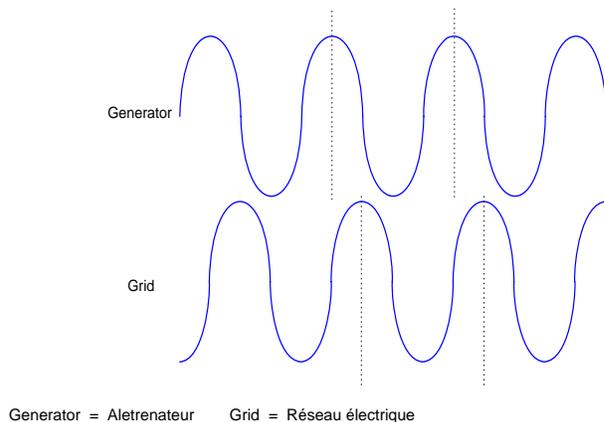
La fréquence de la tension sinusoïdale produite par l'alternateur doit être égale à celle de la tension sinusoïdale produite par le réseau électrique.



**Figure 11**

#### **Alternateur lent au regard de la fréquence du réseau électrique**

La figure 11 ci-dessus indique que l'alternateur est lent au regard de la fréquence du réseau électrique. Le synchroscope tourne rapidement dans le sens antihoraire. Si le disjoncteur de l'alternateur est fermé par inadvertance, cet alternateur, qui est trop lent au regard de la fréquence du réseau, se comporte comme un moteur et le réseau tente de l'accélérer jusqu'à sa mise en phase. Le rotor et le stator produisent un glissement de pôle, ce qui risque d'endommager (et même détruire) l'alternateur, comme nous l'avons déjà vu. Le problème est le même si l'alternateur est trop rapide. Le réseau tente de le ralentir, ce qui provoque un glissement de pôle.

**Figure 12**

### **Alternateur tournant à la bonne vitesse mais déphasé au regard de la fréquence du réseau électrique**

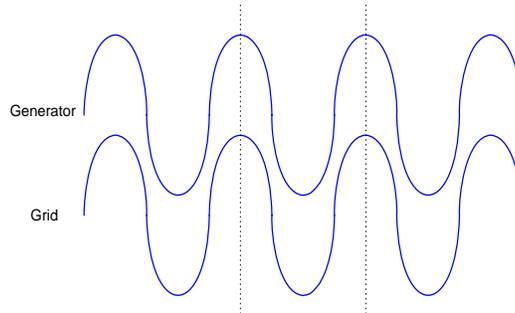
La figure 12 indique que l'alternateur tourne à la bonne vitesse au regard de la fréquence du réseau électrique. Les crêtes et les passages à zéro des courbes de tension sinusoïdales de l'alternateur et du réseau se produisent à la même vitesse. Un angle de phase existe cependant entre ces courbes.

Cela peut être représenté par un synchroscope ne tournant pas (l'alternateur et le réseau sont à la même fréquence) et dont l'aiguille reste fixe à environ 9 heures (l'alternateur est en retard sur le réseau). Si le disjoncteur de l'alternateur est fermé à ce moment, le réseau tente de « tirer » l'alternateur pour le mettre en phase. Mais là aussi, cela a pour effet de précipiter une grande quantité de courant vers l'alternateur, ce qui crée une contrainte si forte sur son rotor et son stator que cet alternateur finit par être endommagé. Si l'alternateur est en avance sur le réseau électrique, il tente immédiatement d'envoyer du courant sur ce réseau avec la force destructrice que nous avons déjà mentionnée. L'alternateur doit donc être amené à tourner de façon que la forme d'onde de la tension du réseau électrique corresponde exactement à celle que cet alternateur produit.

#### **4.6.4 Angle de phase**

Comme nous l'avons vu, l'angle de phase entre la tension produite par l'alternateur et la tension produite par le réseau électrique doit être égal à 0. L'angle de phase (de 0 à 360°) peut être facilement vu en observant les crêtes et les passages à zéro simultanés des deux formes d'onde sinusoïdales. Si le disjoncteur de l'alternateur est fermé lorsque ces crêtes et ces passages à zéro correspondent exactement, la connexion se fait sans à-coup ni problème. Dans ces conditions (figure 13 ci-dessous), l'aiguille du synchroscope indique 12 heures. Le pire

cas se produit lorsque l'alternateur est parfaitement déphasé, c'est-à-dire avec un angle de phase de  $180^0$  et l'aiguille du synchroscope indiquant 6 heures.



Generator = Alternateur    Grid = Réseau électrique

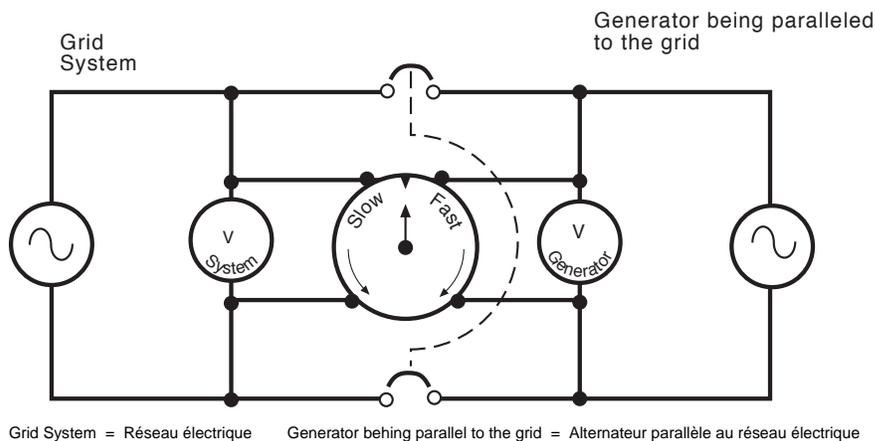
**Figure 13**

### **Alternateur en phase avec le réseau électrique**

## **4.7 SYNCHRONISATION**

Maintenant que nous avons vu le principe de la synchronisation, examinons rapidement la façon de procéder physiquement à cette synchronisation. En théorie, au moins deux mesures - ou deux indications simples - doivent être utilisées pour synchroniser un alternateur et un réseau de distribution électrique. Si les deux tensions remplissent les conditions suivantes : amplitudes égales, fréquences identiques et angle nul entre elles, leur addition sur la boucle de tension donne zéro à chaque instant des sinusoïdes de ces tensions. En conséquence, deux voltmètres raccordés aux bornes de chaque disjoncteur de couplage indiquent zéro. Des lampes raccordées aux mêmes endroits sont complètement éteintes si toutes les conditions de la synchronisation sont remplies.

En pratique, nous avons besoin de renseignements que les voltmètres et les lampes ne peuvent pas nous donner pour nous permettre de synchroniser un alternateur et un réseau de distribution électrique en vue de les coupler. Pendant le déroulement physique de la synchronisation, nous devons savoir si c'est l'alternateur ou si c'est le réseau qui est en avance, et de quelle valeur est cette avance. L'instrument qui peut nous informer à ce sujet est le synchroscope. La figure 14 montre le raccordement d'un synchroscope entre l'alternateur à synchroniser et le réseau de distribution électrique.



Grid System = Réseau électrique    Generator being parallel to the grid = Alternateur parallèle au réseau électrique

**Figure 14**

### Synchroscope permettant de vérifier l'angle et la fréquence

Nous avons encore besoin de deux voltmètres pour nous assurer que les tensions de l'alternateur et du réseau électrique sont bien les mêmes (mais notons toutefois que le raccordement de ces voltmètres n'est pas le même que celui vu auparavant, qui était effectué aux bornes des disjoncteurs de couplage).

L'aiguille du synchroscope indique la différence d'angle entre la tension de l'alternateur et celle du réseau électrique. Lorsque cet angle est égal à zéro, l'aiguille du synchroscope est verticale, c'est-à-dire à 12 heures.

La vitesse de rotation de l'aiguille indique la différence de fréquence entre les deux tensions. Cette aiguille tourne dans le sens « *Slow* » (sens antihoraire) si la fréquence de l'alternateur est inférieure à celle du réseau. Elle tourne dans le sens « *Fast* » (sens horaire) si la fréquence de l'alternateur est supérieure à celle du réseau. Notons que l'aiguille du synchroscope ne tourne que si la différence de fréquence est très petite (jusqu'à 2 Hz). Le synchroscope n'est pas destiné à indiquer des différences plus hautes.

Les deux derniers paragraphes nous ont montré que :

- si l'aiguille est verticale, ou à 12 heures,
- et si l'aiguille est immobile (si elle ne tourne pas),

les deux tensions sont en phase et les fréquences de l'alternateur et du réseau électrique sont identiques.

En pratique, les disjoncteurs de couplage sont fermés lorsque l'alternateur est à peine plus rapide que nécessaire et lorsque l'aiguille

Notes

du synchroscope est à peu près à moins 5 minutes (par rapport à 12 heures). Cela donne un léger temps d'avance pour fermer les disjoncteurs de couplage et assurer que l'alternateur ne se mettra pas à fonctionner comme un moteur une fois couplé au réseau électrique.

Il est important de vérifier le fonctionnement du synchroscope avant toute opération de synchronisation et de couplage. Si l'alternateur tourne à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisation, l'aiguille du synchroscope doit tourner dans le sens « *Slow* ». Dans le même ordre d'idée, si l'alternateur tourne à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisation, l'aiguille du synchroscope doit tourner dans le sens « *Fast* ».

#### **4.8 SYNCHRONISATION D'UN ALTERNATEUR**

Maintenant que l'alternateur est au point où le disjoncteur de sortie peut être fermé, le réseau de distribution électrique extérieur doit être examiné. Dans le chapitre précédent, le réseau électrique était déjà sous tension et la synchronisation devait s'effectuer par rapport à ce réseau. Non seulement cette méthode de synchronisation est normale, mais elle permet comme nous l'avons vu d'expliquer assez clairement les paramètres en cause.

Avant d'entrer dans le détail des explications, voyons ce qui se passe lorsqu'une charge à vide (ou hors tension) est prise en compte. Tout ce que nous avons vu plus haut reste valable. L'alternateur doit fonctionner à la tension et à la fréquence nominales, et en plus, le stabilisateur automatique de tension et le régulateur de vitesse doivent être en service. Ces deux appareils seront vus plus loin en détail. Le premier problème concerne la taille et le type du circuit de charge à prendre en compte et ce qui doit en résulter du côté de l'alternateur.

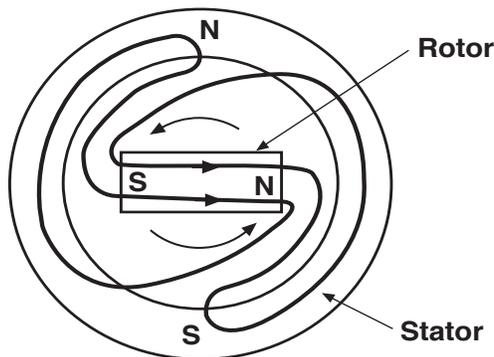
La taille et le type du circuit de charge a par l'intermédiaire du courant un effet unique sur les alternateurs à turbine. Nous avons vu au début de la série sur l'équipement électrique que la production d'électricité était en fait un moyen d'appliquer une poussée sur des électrons ou sur du courant électrique. Nous avons également vu que les alternateurs n'étaient rien de plus que des transformateurs dotés d'un enroulement primaire en rotation. Le courant tiré de l'enroulement secondaire (le stator) a bien sûr un effet sur l'enroulement primaire (le rotor) et sur la force motrice (la vapeur). Cette effet porte le nom de réaction d'induit.

#### 4.8.1 Réaction d'induit

Si l'alternateur est en charge et que le courant circule dans les conducteurs du stator, un deuxième flux  $\phi_S$  est produit par les bobines du stator. La réaction d'induit est l'interaction des champs magnétiques des enroulements du stator  $\phi_S$  et du rotor  $\phi_R$  qui produisent un champ magnétique appelé flux d'entrefer. La réaction d'induit se caractérise par les trois éléments suivants :

#### 4.8.2 Élément actif

L'élément actif du courant, qui produit la puissance réelle ou active affaiblit le flux de liaison à travers l'entrefer. Ce flux s'étire dans cet entrefer (figure 15). Si la charge en MW augmente sans que la tension d'excitation n'augmente, les lignes de flux s'étirent encore plus, autrement dit l'angle de charge augmente. Cela doit être empêché, sinon un glissement de pôle risque de se produire, comme nous l'avons vu précédemment. Par conséquent, si la charge augmente, la tension d'excitation doit être augmentée (surexcitation) pour maintenir la force du champ magnétique. Notons, même si nous devons examiner ça plus loin, qu'une forte anomalie de courant peut tellement déphaser l'alternateur qu'un glissement de pôle risque de se produire parce que la force motrice (la vapeur) et le stabilisateur automatique de tension ne peuvent pas réagir assez vite pour corriger l'anomalie du flux magnétique.



Rotor = Rotor    Stator = Stator

**Figure 15**  
**Flux étiré dans l'entrefer**

#### 4.8.3 Élément de retard réactif

Si l'alternateur est en charge avec du retard, un courant retardé est tiré du stator et l'alternateur semble produire des mégavoltampères réactifs. Le courant en retard du stator produit un flux qui s'oppose

directement au flux du champ magnétique. Comme la tension induite est proportionnelle au flux ( $V \propto f$ ), la tension de sortie de l'alternateur diminue. Pour maintenir la tension nominale, le champ du rotor doit être augmenté et l'alternateur devient surexcité.

#### 4.8.4 Élément d'avance réactif

Si l'alternateur est en charge avec de l'avance, un courant retardé alimente le stator et l'alternateur semble absorber des mégavoltampères. Le courant en retard du stator produit un flux qui assiste directement le flux du champ magnétique. Comme la tension induite est proportionnelle au flux ( $V \propto f$ ), la tension de sortie de l'alternateur augmente. Pour maintenir la tension nominale, le champ du rotor doit être diminué et l'alternateur devient sous-excité.

## 4.9 COUPLAGE AVEC UN BUS HORS TENSION

### 4.9.1 Couplage avec un bus hors tension, avec charge à facteur de puissance en avance

Il est possible qu'un réseau électrique soit doté d'un bus à charge capacitive :

- Des condensateurs statiques y sont connectés.
- Une ligne haute tension est alimentée. Notons que les lignes haute tension apparaissent de façon inhérente comme des condensateurs et peuvent fournir des mégavoltampères réactifs.

Dans le cas d'une charge capacitive, l'alternateur doit absorber ces mégavoltampères. Si le stabilisateur automatique de tension est en mode automatique, l'excitation de l'alternateur est automatiquement diminuée pour permettre à cette alternateur d'absorber le nombre de mégavoltampères nécessaires et maintenir une tension adéquate à ses bornes. Si le stabilisateur automatique de tension est en mode manuel, l'excitation est constante, et le courant à facteur de puissance en avance nécessaire pour que l'alternateur absorbe les mégavoltampères peut provoquer l'application d'une tension très élevée aux bornes de l'alternateur.

### 4.9.2 Couplage avec un bus hors tension, avec charge à facteur de puissance en retard

Une charge inductive peut prendre les formes suivantes :

- Transformateurs de puissance connectés
- Charges motrices

Les charges inductives peuvent provoquer de fortes chutes de tension lorsque le disjoncteur de l'alternateur est fermé, à cause de l'absorption des mégavoltampères par le circuit de charge.

#### **4.9.3 Couplage avec un bus en court-circuit**

Si le coupe circuit de sortie d'un alternateur est fermé pour couplage avec un bus en court-circuit, cet alternateur peut être endommagé à cause d'un courant de forte intensité dans les enroulements, de contraintes trop fortes et d'un glissement de pôle possible.

#### **4.9.4 Couplage avec un bus hors tension, sans aucune charge connectée**

Ce genre de couplage ne pose aucun problème si le bus est en bon état et n'est pas relié à la terre.

### **4.10 CHARGE D'UN ALTERNATEUR**

#### **4.10.1 Couplage avec un circuit fini par rapport au couplage avec un réseau infini**

Avant d'aborder le sujet de la charge des alternateurs, nous devons savoir si le réseau électrique raccordé est relativement grand, et donc très robuste, ou relativement petit, et donc assez faible. Le premier réseau fait partie des réseaux infinis et le deuxième fait partie des réseaux finis.

Un alternateur connecté à un réseau électrique de très grande taille (bus infini) a très peu ou pas du tout d'effet sur la tension ou la fréquence de ce réseau.

Mais un alternateur connecté sur un bus fini a un effet important sur la tension et la fréquence de ce bus.

Il est normalement admis que si la capacité d'un alternateur dépasse de 5 % celle du réseau qu'il alimente, ce réseau ne se comporte pas comme un bus infini. Par exemple, si un alternateur de 800 MW alimente un réseau ayant une capacité de 10 000 MW, la tension et la fréquence de ce réseau peuvent changer et ce réseau se comporte comme un bus fini.

#### 4.11 COMMANDE D'UN ALTERNATEUR PAR UN STABILISATEUR AUTOMATIQUE DE TENSION

Seulement deux éléments peuvent avoir un effet direct sur le comportement électrique de la centrale et du réseau. Ces deux éléments sont les suivants :

- Le stabilisateur automatique de tension, qui règle automatiquement l'intensité du champ de l'alternateur pour maintenir une tension désirée aux bornes de l'alternateur (ou la charge d'une puissance réactive).
- Le régulateur de vitesse, qui est un circuit de commande à boucle fermée commandant les vannes d'arrivée de la vapeur sur la turbine pour régler la vitesse du rotor. Lorsque l'alternateur est synchronisé, le régulateur de vitesse règle aussi la charge de cet alternateur.

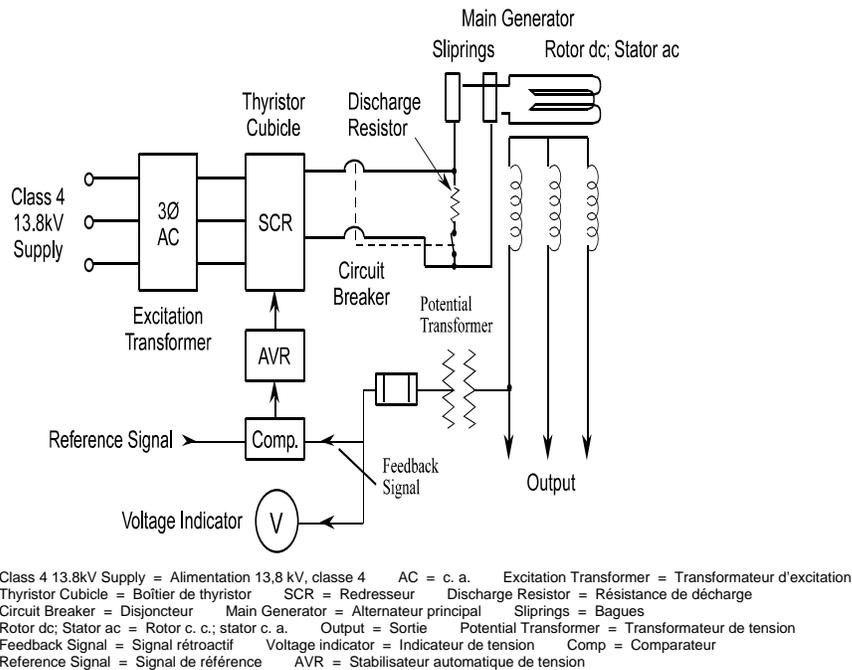
Le premier élément à examiner est le stabilisateur automatique de tension. Un circuit d'excitation doit pouvoir fournir au rotor le courant c. c. nécessaire pour produire le flux magnétique nécessaire, dans les conditions suivantes :

- Si l'alternateur est hors charge, le circuit d'excitation doit fournir un flux suffisant pour que cet alternateur produise la tension nominale à la vitesse nominale.
- Entre le moment où l'alternateur fonctionne hors charge et celui où il fonctionne à pleine charge, le courant d'excitation doit être augmenté pour contrer les effets de la réaction d'induit. Habituellement, entre ces deux moments, le courant d'excitation doit être augmenté d'un rapport de 2 à 2,5, par exemple 1 700 A à 4 000 A.
- Si des anomalies se produisent sur le réseau électrique à cause de la foudre ou pour toute autre raison, les tensions appliquées à ce réseau s'affaiblissent ou diminuent. Le circuit d'excitation doit dans ce cas réagir très vite. Il doit pouvoir augmenter très vite l'excitation (habituellement en moins de 0,25 seconde) pour contrer tout affaiblissement de la tension et ramener la tension de sortie (c. a.) de l'alternateur à la normale.

Il existe de nombreux types de circuit de commande rétroactive pour les stabilisateurs automatiques de tension. Cela va des génératrices c. c. aux redresseurs alimentés en c. a.

Le redresseur alimenté en c. a. de la figure 16 n'est là qu'à titre d'exemple. Tous les circuits de commande rétroactive se caractérisent par les éléments suivants :

- Source c. c. fiable et à plage importante
- Voltmètre de sortie c. a. de l'alternateur
- Signal de référence
- Comparateur
- Circuit logique du stabilisateur automatique de tension



**Figure 16**  
**Circuit stabilisateur automatique de tension**  
**représentatif**

Le comparateur compare la tension produite par l'alternateur (c. a.) principal et la tension demandée par le technicien de la salle de commande. La tension produite par l'alternateur est diminuée en proportion par le transformateur de potentiel et appliquée à une des bornes du comparateur.

Ce signal porte le nom de signal de rétroaction car il est renvoyé dans le circuit à partir de la sortie. L'autre borne du comparateur est

alimentée par la tension établie par le technicien de la salle de commande. Ce signal porte le nom de signal de référence.

#### **4.11.1 Action du stabilisateur automatique de tension sur la charge de l'alternateur**

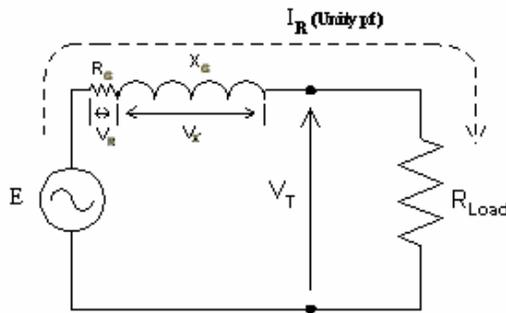
Lorsque l'alternateur principal est couplé avec une charge variable, si sa tension chute à une valeur inférieure à celle établie par le technicien, le comparateur décèle la différence et envoie un signal au stabilisateur automatique de tension. Celui-ci augmente l'intensité du champ de l'excitatrice principale, qui augmente sa tension de sortie. L'excitation est alors augmentée, permettant à l'alternateur de produire la tension de sortie requise. De façon similaire, si la tension de sortie de l'alternateur augmente, le comparateur décèle là aussi la différence.

Le stabilisateur automatique de tension diminue la valeur de sortie de l'excitatrice, ce qui entraîne la diminution de la tension de sortie de l'alternateur principal à la valeur requise.

N'oublions pas que même si une charge résistive provoque une chute de tension nécessitant une augmentation du courant de champ (renforcement par le stabilisateur automatique de tension), les charges inductive et capacitive ont un effet beaucoup plus important.

#### **4.11.2 Charge à facteur de puissance unité**

Pour bien comprendre le fonctionnement de l'excitatrice et du stabilisateur automatique de tension en fonction de diverses charges, le mieux est de se servir d'un schéma équivalent d'alternateur. La figure 17 montre un alternateur avec une résistance interne sans charge  $E$ , une réaction d'induit passive  $R_G$  et un flux de stator actif  $X_G$ . Si l'alternateur a une charge réelle ou résistive, il se produit une chute de tension entre  $E_G$  et la tension aux bornes  $V_T$  égale à la valeur de  $V_R$  plus  $V_X$ . Mais comme la chute de tension  $V_X$  est à 90 degrés par rapport à la tension aux bornes, de petits changements de la charge n'entraînent pas de grands changements de la tension aux bornes.



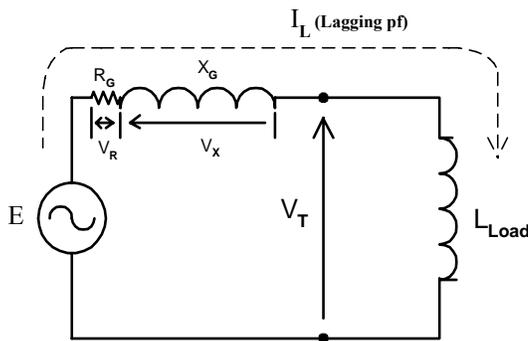
(Unity pf) = Facteur de puissance unité     $R_{Load}$  = Résistance de charge

**Figure 17**

**Alternateur avec charge à facteur de puissance unité**

**4.11.3 Charge en retard à facteur de puissance nul**

Si la charge est inductive, comme sur la figure 18 ci-dessous, le courant inductif entraîne une chute de tension  $V_x$  aux extrémités de  $X_G$ , qui est un élément bien plus réactif. Cette chute de tension est exactement opposée à la tension aux bornes et une importante diminution de cette tension aux bornes peut être constatée. Là encore, le stabilisateur automatique de tension décèle la tension aux bornes diminuée  $V_T$  et envoie un signal de rétroaction à l'excitatrice pour augmenter le courant de champ.



(Lagging pf) = Facteur de puissance en retard     $L_{Load}$  = Inductance de charge

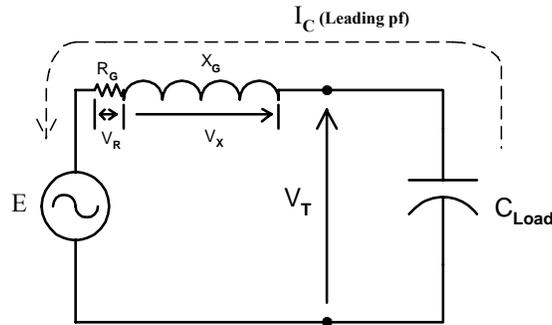
**Figure 18**

**Alternateur avec charge en retard**

Si la charge est capacitive, comme sur la figure 19 ci-dessous, le courant capacitif entraîne une chute de tension  $V_x$  aux extrémités de  $X_G$ , qui est un élément bien plus réactif. Nous avons cependant vu au chapitre sur les principes fondamentaux de l'électricité que les condensateurs sont des sources de courant en avance. Le courant de charge capacitive fonctionne en s'opposant aux pertes causées par les

Notes

courants inductifs. Le champ de l'alternateur principal reçoit donc de l'aide et la tension aux bornes  $V_T$  de cet alternateur envoie un signal de rétroaction à l'excitatrice pour augmenter le courant de champ.

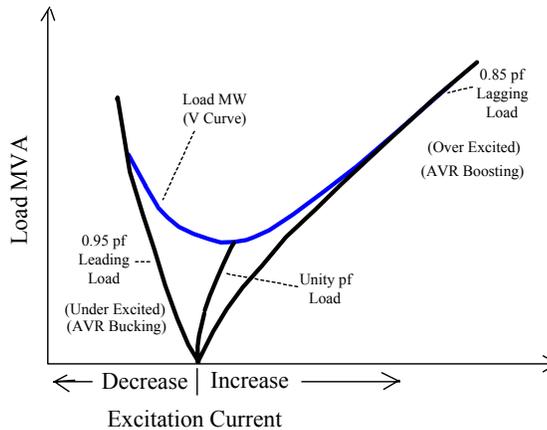


Leading pf = Facteur de puissance en avance    C Load = Condensateur de charge

**Figure 19**

**Alternateur avec charge en avance**

L'effet général sur le courant d'excitation applicable en fonction des différentes charges est illustré par la courbe V d'un alternateur, à la figure 20.



Load MVA = Charge MVA    0.95 pf Leading Load = Charge en avance à 0,95 x facteur de puissance  
 (Under excited) (AVR Bucking) = (Sous excitation) (stabilisateur automatique de tension entravant)  
 (Over excited) (AVR Boosting) = (Surexcitation) (stabilisateur automatique de tension stimulant)  
 Load MV (V Curve) = Charge MV (courbe V)    Unity pf Load = Charge à facteur de puissance unité  
 0.85 pf Lagging Load = Charge en retard 0,85 x facteur de puissance

**Figure 20**

**Courbe V d'un alternateur représentative**

Si plusieurs alternateurs sont couplés avec un bus local (fini), des précautions doivent être prises pour assurer qu'ils usent de la même tension de référence et des mêmes paramètres de rétroaction, sinon ils risquent d'osciller ou de lutter entre eux en s'opposant aux changements apportés par le stabilisateur automatique de tension à son propre alternateur. Le stabilisateur sur lequel est établie la valeur du

paramètre de tension la plus élevée peut tenter de forcer des mégavoltampères sur les autres alternateurs, ce qui risque d'amener les stabilisateurs de ces alternateurs à diminuer la tension.

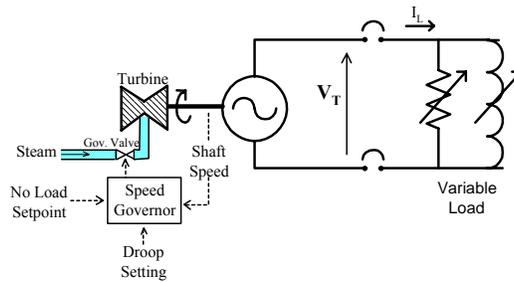
À mesure que le réseau électrique connecté augmente en taille (se rapproche de l'infini), l'effet que le stabilisateur automatique de tension d'un seul alternateur peut avoir sur la tension du réseau général diminue évidemment. La valeur du paramètre de tension peut même servir de soutien au stabilisateur. Si cette valeur est augmentée, le courant d'excitation est augmenté. Cette surexcitation augmente la sortie du stabilisateur, comme l'indique la courbe V de la figure 20. Ce soutien supplémentaire du stabilisateur aide à augmenter la tension du réseau de distribution électrique, mais demeure indépendant de la taille des alternateurs et des contraintes thermiques (ce que nous examinerons plus loin).

Il est important par dessus tout que le stabilisateur automatique de tension et l'excitation continuent d'être utilisés tant que le disjoncteur de l'alternateur est encore fermé et que cet alternateur est en parallèle avec un réseau électrique extérieur. Une perte de l'excitation risque de faire fonctionner l'alternateur comme un moteur à induction. Cela a une influence sur la stabilité du réseau électrique connecté (la charge en mégavoltampères est élevée) et peut provoquer une surchauffe du rotor et du stator à cause de la forte intensité du courant dans le noyau.

#### **4.12 COMMANDE DU RÉGULATEUR DE VITESSE D'UN ALTERNATEUR**

Lorsqu'un alternateur démarre ou est en charge, la vitesse de sa turbine est commandée par le degré d'ouverture des vannes de commande du flux de vapeur. Ces vannes sont commandées au moyen d'un signal d'erreur de vitesse produit par un mécanisme de surveillance de la vitesse et de la charge. Ce mécanisme de surveillance et de commande est le régulateur de vitesse (voir figure 21).

## Notes



Steam = Vapeur    Gov. Valve = Vanne du régulateur    Turbine = Turbine    Shaft Speed = Vitesse de l'arbre  
 Speed Governor = Régulateur de vitesse    Droop Setting = réglage du fléchissement  
 No load Setpoint = Point de réglage à vide    Variable Load = charge variable

Figure 21

**Régulateur de vitesse d'un alternateur**

Le régulateur de vitesse est un dispositif de commande proportionnelle qui compare la vitesse réelle de la turbine avec le point de réglage du paramètre en charge nulle et le paramètre du fléchissement de vitesse nécessaire. Le terme fléchissement de vitesse, qui est expliqué plus loin en détail, s'applique dans ce cas à la diminution de la vitesse de l'arbre de l'alternateur à mesure que la charge (le couple de sortie nécessaire) augmente.

Le régulateur de vitesse vise cinq objectifs :

- Permettre de synchroniser l'alternateur.
- Intervenir de façon que le groupe turbine-alternateur fournisse à la demande les MW nécessaires pour la clientèle.
- Changer la charge de l'alternateur.
- Effectuer toute correction de fréquence nécessaire.
- Commander le groupe turbine-alternateur en cas de perturbation.

**4.12.1 Fléchissement de la vitesse**

Le régulateur de vitesse ouvre ou ferme les vannes de vapeur en fonction de la diminution ou de l'augmentation de la vitesse décelée par rapport au changement total permis entre la charge nulle et la pleine charge. La commande de rétroaction du régulateur de vitesse continue de régler les vannes de vapeur jusqu'à ce que l'erreur de vitesse soit de zéro. Le changement de vitesse permis est déterminé par le

paramètre de fléchissement de vitesse. Ce fléchissement est défini comme suit :

$$\text{Speed Droop} = \frac{\text{Total drop in speed (NL to FL)}}{\text{Rated Speed}}$$

$$= \left( \frac{\text{NL Speed} - \text{FL Speed}}{\text{Rated Speed}} \right) \%$$

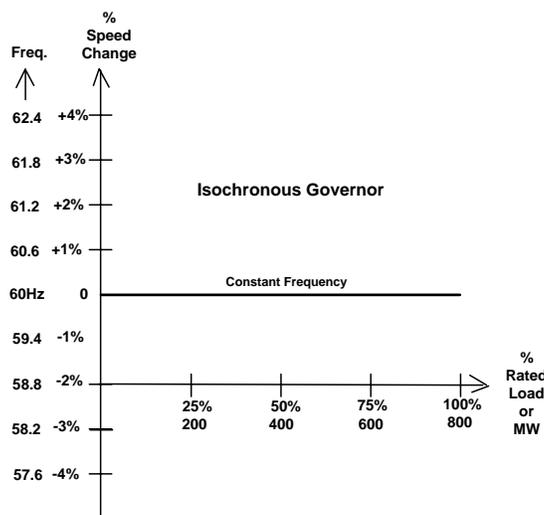
**While Generator goes from No Load to Full Load**

Speed Droop = Fléchissement de la vitesse  
 Total droop in speed (NL to FL) = Fléchissement total de la vitesse (entre charge nulle et pleine charge)  
 Rated speed = vitesse nominale    NL Speed = Vitesse à charge nulle    FL Speed = Vitesse à pleine charge  
 Rated Speed = Vitesse nominale  
 While Generator goes from No Load to Full Load = Pendant que l'alternateur passe de la charge nulle à la pleine charge

Le fléchissement de vitesse prend parfois le nom de bande proportionnelle. Un régulateur de vitesse avec 2 % de fléchissement de vitesse ou 2 % de bande proportionnelle signifie la même chose.

#### 4.12.2 Régulateur de vitesse isochrone

Examinons le cas simple d'un régulateur de vitesse avec un fléchissement de vitesse nul (figure 22). Nous avons là un régulateur de vitesse isochrone, car la vitesse est constante quelle que soit la charge de l'alternateur.



Freq = Fréquence    Speed Change = Changement de la vitesse    Isochronous Governor = Régulateur isochrone  
 Constant Frequency = Fréquence constante    Rated Load or MW = Charge ou MW nominale

**Figure 22**  
**Régulateur de vitesse isochrone**

Cette sorte de commande de régulation fonctionne à fréquence constante et porte parfois le nom de régulateur proportionnel et intégral. Elle n'est utilisée qu'avec les alternateurs individuels qui ne

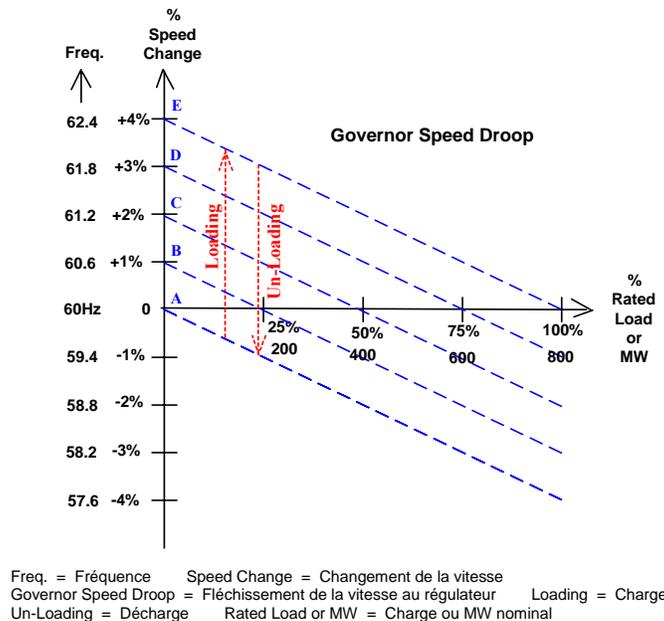
## Notes

font partie d'aucun réseau à partage de charge. Les alternateurs de secours sont souvent dotés de ce dispositif pour pouvoir conserver une fréquence c. a. constante, quelle que soit la charge.

Si plusieurs alternateurs sont couplés avec un bus unique, elles ne peuvent pas subir de fléchissement de vitesse à pente nulle. Le réseau est dans ce cas instable de façon inhérente. Une très faible perturbation de fréquence fait qu'une des machines prend toute la charge. Les régulateurs de vitesse s'efforcent de vouloir corriger le problème, ce qui provoque de brusques échanges de charge entre les alternateurs.

#### 4.12.3 Pourcentage de fléchissement de la vitesse

Si une pente est ajoutée au fléchissement de la vitesse, nous obtenons une caractéristique similaire à celle représentée par la figure 23 ci-dessous. Cinq courbes de fléchissements (A à E) sont établies, toutes avec la même pente. La courbe A nous indique un fléchissement de 4 % par rapport à la charge nominale totale. Ce type de paramètre est utilisé par la plupart des alternateurs couplés avec le réseau électrique. Nous verrons pourquoi plus loin.



**Figure 23**

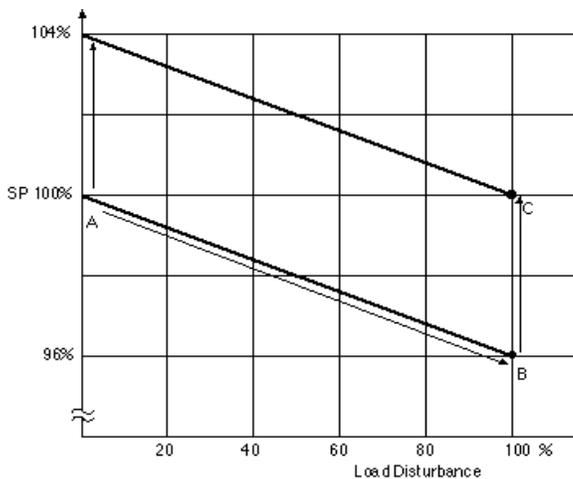
#### Courbes de fléchissement de vitesse rattachées à un régulateur de vitesse

À l'origine, lorsque l'alternateur tourne à vide, le point de réglage du régulateur de vitesse est en A, à 60Hz à vide. Si le point de réglage à vide augmente de 1 %, le fléchissement est rattaché à la courbe B. Les vannes de vapeur s'ouvrent proportionnellement pour amener la

charge à 25 %, point où le signal d'erreur est de nouveau à zéro et la fréquence à 60 Hz. Cela peut se dérouler ainsi jusqu'au point de réglage E, à 4 %, où la sortie totale se stabilise à 100 % de la charge nominale et à 60 Hz.

Évidemment, le processus permettant d'atteindre la pleine charge est plutôt lent. La vitesse de mise en charge de l'alternateur (vitesse de changement du point de réglage à vide) est déterminée par des données informatiques adressées au régulateur de vitesse pour adaptation en fonction de l'alimentation en vapeur.

Notons qu'avec un alternateur unique couplé avec un circuit de charge, la vapeur alimentant la turbine ne peut être utilisée que pour accélérer ou ralentir cette turbine. Elle ne peut pas servir à modifier la charge. C'est le principal inconvénient des alternateurs uniques fonctionnant au moyen d'un pourcentage de fléchissement de la vitesse par rapport au mode isochrone. La figure 24 ci-dessous illustre l'effet d'une charge importante appliquée brusquement à un alternateur (point B). Le point de réglage à vide doit être placé plus haut pour ramener la fréquence à 60 Hz (point C).



Load Disturbance = Perturbation de la charge

**Figure 24**

**Alternateur unique - Correction de fréquence**

Avant de voir l'effet du changement des paramètres rattachés au fléchissement de la vitesse ou du changement de la charge avec paramètres constants (et charge nulle), nous devons examiner attentivement ce qui arrive réellement au groupe turbine-alternateur. Remarquons qu'un changement de vitesse de 4 % équivaut presque à 100 % du mouvement de la vanne de vapeur (partant du principe qu'il ne faut que très peu de vapeur lorsque la charge est nulle).

#### 4.12.4 Pendant le démarrage

Le régulateur de vitesse doit amener la rotation de la turbine de quelques tr/min à la vitesse de synchronisation (1 800 tr/min). À cause de la petite quantité de vapeur (puissance) nécessaire, des courbes indépendantes de fléchissement élevé (pour une large plage de commande de vitesse) sont utilisées. Ces courbes permettent de commander les vannes de façon très précise en dirigeant très peu de vapeur vers la turbine pendant que la machine accélère de 0 % à 90 % de la vitesse nominale.

#### 4.12.5 Fonctionnement normal

Une fois que la turbine a atteint à peu près 90 % de la vitesse nominale, le signal d'erreur produit par le dispositif de contrôle diminue et la commande de vitesse de fonctionnement normal (ou de faible écart de vitesse) prend le relais en se basant sur une courbe de fléchissement faible. Les paramètres de fléchissement permettent alors de traiter les grandes variations d'ouverture de la vanne de vapeur entre charge nulle et pleine charge.

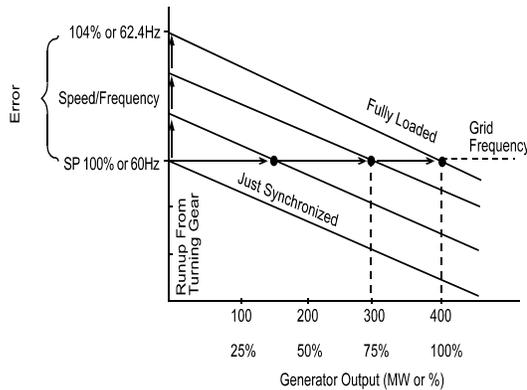
Notons par ailleurs que lorsque le disjoncteur de couplage de l'alternateur est ouvert (n'importe quand) avec l'alternateur en charge, la fréquence en charge nulle est beaucoup trop élevée pour l'alternateur et les transformateurs de sortie et de service raccordés. Le point de réglage à vide doit être établi de nouveau par ordinateur, soit à sa valeur à vide, soit à la valeur permettant de soutenir la charge nécessaire.

Ce que nous appelons fonctionnement normal englobe les différents effets de la régulation en fonction du nombre d'alternateurs connectés au réseau.

Il est plus facile de commencer avec un réseau de très grande taille (réseau infini) pour étudier les interactions entre la vitesse et la charge et de continuer avec des réseaux de plus en plus petits pour examiner les différences qui se produisent alors.

#### 4.12.6 Fonctionnement en parallèle avec un bus de grande taille (bus infini)

Avec les grands réseaux, la tension et la fréquence restent à peu près constantes, quelle que soit le circuit de charge raccordé à l'alternateur. L'alternateur traite la charge de la façon indiquée par les flèches de la figure 25 ci-dessous.



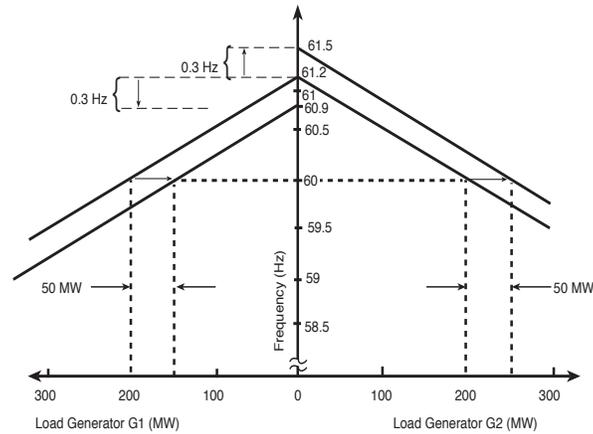
Error = Erreur    104% or 62.4Hz = 104 % ou 62,4 Hz    Speed Frequency = Fréquence-vitesse    SP 100% or 60Hz = Vitesse à 100 % ou 60 Hz    Full Loaded = Pleine charge    Grid Frequency = Fréquence du réseau électrique    ..... Synchronized = .....Synchronisé    Runup From Turning Gear = Démarrage à partir de la vitesse la plus lente    Generator Output (MW or %) = Sortie de l'alternateur (MW ou %)

**Figure 25**  
**Alternateur couplé avec un circuit de charge de très grande taille**

L'alternateur raccordé est contraint d'effectuer un partage de la charge totale conformément aux points de réglage des fléchissements qui lui sont rattachés, la fréquence du réseau restant établie à 60 Hz. Voyons la figure 26, qui s'applique à deux alternateurs en parallèle (nous pourrions d'ailleurs avoir n'importe quel nombre d'alternateurs). Il est possible de choisir la valeur à laquelle les alternateurs pourront effectuer un partage de la charge en établissant l'emplacement du point de réglage à vide. Dans le cas qui nous intéresse, le point de réglage à vide de l'alternateur G2 a été élevé et celui de l'alternateur G1 a été abaissé pour qu'une charge de 50 MW soit déplacée de G1 à G2.

Ce changement du point de réglage en charge à vide pour changer la charge de l'alternateur doit avoir lieu plusieurs fois par jour dans les centrales hydroélectriques ou dans les centrales thermiques consommant du combustible fossile, mais les centrales nucléaires sont habituellement plus stables dans ce domaine. Dans les premières centrales, ce type de changement a lieu à cause des crêtes de la demande. Dans les secondes, il a lieu à cause d'anomalies physiques propres au nucléaire.

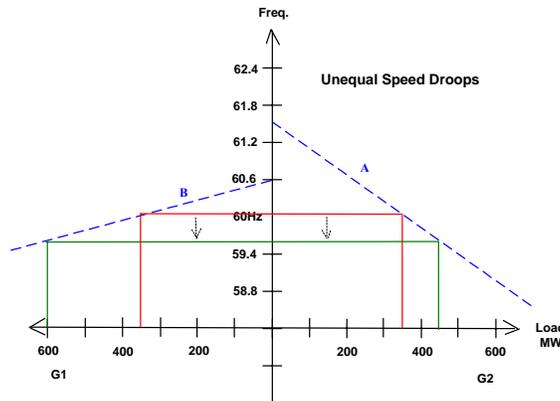
Notes



Frequency Hz = Fréquence en Hz    Load Generator G1 (MW) = Charge de l'alternateur G1 (MW)  
 Load Generator G2 (MW) = Charge de l'alternateur G2 (MW)

**Figure 26**  
**Changement de la distribution de la charge avec un bus infini**

La figure 26 montre clairement qu'une augmentation de la charge nécessite une augmentation du point de réglage à vide. Pour rendre un alternateur plus sensible aux changements de fréquence, la pente est diminuée tel que le montre la figure 25 ci-dessous.



Freq. = Fréquence    Unequal Speed Droops = Fléchissement inégaux de la vitesse    Load MW = MW de charge

**Figure 27**  
**Effet de la pente de fléchissement sur la charge**

L'alternateur G1 de la figure 27 est caractérisé par un fléchissement de vitesse plus faible que G2. Il réagit plus facilement aux changements que G2, dont le fléchissement de vitesse est plus prononcé. Dans cet exemple, une augmentation de charge de 350 MW est ainsi partagée : 250 MW supplémentaires pour G1 et 100 MW supplémentaires pour G2. La fréquence du réseau diminue dans le même temps à un peu moins de 59,5 Hz.

Les chiffres de cet exemple ont été exagérés pour les besoins de la démonstration des effets de pente. En réalité, comme les alternateurs alimentant les réseaux sont nombreux et que ces réseaux sont de grande taille, il faudrait une grave perturbation de la charge pour que la fréquence diminue autant. Mais cela permet de voir les effets du fléchissement en pourcentage et de comprendre pourquoi les fléchissements rattachés aux gros alternateurs couplés avec les grands réseaux doivent être les mêmes. Si les mêmes paramètres sont attribués aux alternateurs, ceux-ci partagent la charge à égalité - en fonction de leurs capacités - et contribuent à égalité à stabiliser la charge pendant les perturbations du réseau.

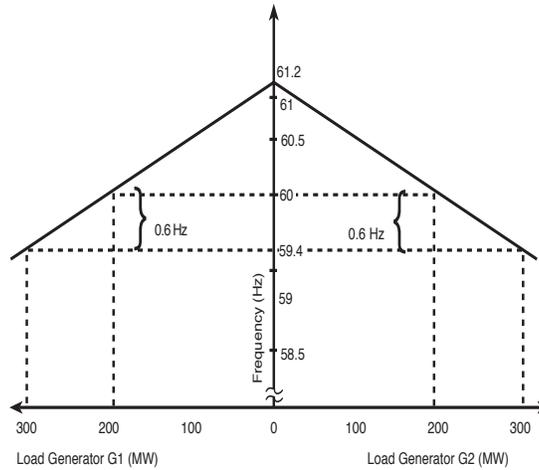
#### 4.12.7 Fonctionnement en parallèle sur un bus fini

La dernière partie traite de la situation idéale représentée par un alternateur couplé avec un réseau de très grande taille et ayant très peu d'influence sur la tension ou la fréquence générale. Voyons maintenant la situation normale, dans laquelle :

- l'impédance est significative (longues lignes de transport) entre les alternateurs en parallèle et le réseau infini;
- ou
- les alternateurs en parallèle groupés en îlots et ne sont pas raccordés au réseau infini.

L'action du régulateur de vitesse vue précédemment s'applique toujours, quelle que soit la taille du réseau électrique. Sachant cela, voyons ce qui se passe avec les petits réseaux électriques. Cette action peut être immédiate, à cause de perturbations importantes dans la centrale ou d'une panne de ligne de transport. Plus le réseau électrique est grand, plus l'influence de la fréquence de fonctionnement augmente. Avec le petit réseau de l'exemple ci-dessous (figure 28), nous avons une augmentation de la charge de 400 MW à 600 MW et la fréquence descend à 59,4 Hz.

Notes

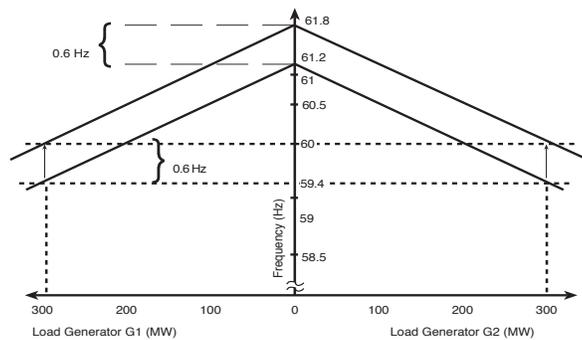


Frequency Hz = Fréquence en Hz    Load Generator G1 (MW) = Charge de l'alternateur G1 (MW)  
 Load Generator G2 (MW) = Charge de l'alternateur G2 (MW)

**Figure 28**

**Augmentation de la charge avec un bus fini**

Pour ramener la fréquence de sortie à 60 Hz, les points de réglage à vide doivent être élevés pour que les deux courbes de fléchissement de vitesse soit élevées et que chacun des deux alternateurs fournisse 300 MW à 60 Hz. Pour ce faire, le point de réglage de la charge et de la fréquence ou la fréquence à vide de chaque régulateur de vitesse doit être augmentée de 0,6 Hz pour passer de 61,2 Hz à 61,8 Hz. C'est la valeur du fléchissement par les régulateurs de vitesse pendant l'augmentation de la charge. La figure 29 illustre la restauration de la fréquence.



Frequency Hz = Fréquence en Hz    Load Generator G1 (MW) = Charge de l'alternateur G1 (MW)  
 Load Generator G2 (MW) = Charge de l'alternateur G2 (MW)

**Figure 29**

**Restauration de la fréquence**

Maintenant que nous avons vu le scénario de la commande par le stabilisateur automatique de tension et celui de la commande par le

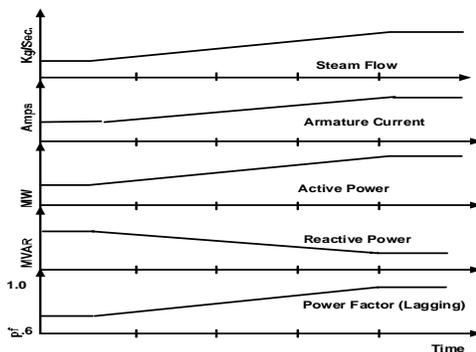
régulateur de vitesse, nous pouvons combiner les deux pour obtenir une vue plus complète.

### 4.13 COMMANDE COMBINÉE D'UN STABILISATEUR AUTOMATIQUE DE TENSION ET D'UN RÉGULATEUR DE VITESSE

Les changements des paramètres électriques ayant lieu pendant la variation de la quantité de vapeur ou pendant la variation du niveau d'excitation peuvent être mieux vus si l'un de ces deux éléments reste constant en même temps que l'autre varie et que les effets obtenus sont combinés, ce qui permet d'examiner la stabilité d'un système de distribution électrique. Pour commencer, partons du principe que l'alternateur est couplé avec un réseau infini. Il n'a ainsi que très peu d'effets sur la tension et la fréquence générale.

#### 4.13.1 Réglage du flux de vapeur sans changement de l'excitation

Supposons que le flux de vapeur soit augmenté en élevant le point de réglage du fléchissement de vitesse établi sur le régulateur de vitesse. Nous pouvons dans ce cas prédire les effets (voir la figure 30) suivants :



Steam Flow = Flux de vapeur    Armature Current = Courant d'induit    Active Power = Puissance active  
 Reactive Power = Puissance réactive    Power Factor (Lagging) = Facteur de puissance (en avance)    Time = Temps  
 MVAR = Mégavoltampères    Amps = Ampères

**Figure 30**  
**Augmentation du flux de vapeur à excitation constante**

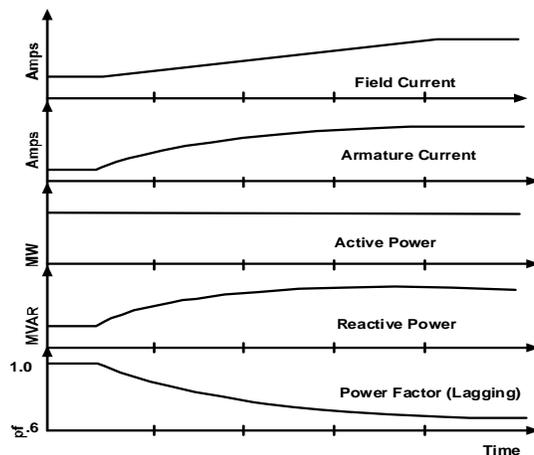
- Les conditions initiales sont celles d'une augmentation du flux de vapeur.
- L'excitation est constante, donc le champ est inchangé.

Notes

- Puissance active : l'élément MW du courant de stator augmente pendant que l'élément mégavoltampères réactifs des MW augmente à cause de l'augmentation du flux de vapeur. La fréquence reste constante.
- Avec l'augmentation de la puissance de sortie en MW, la réaction d'induit augmente. L'alternateur est maintenant sous-excité (en avance) et son angle de charge augmente. L'habituel facteur de puissance en retard (0,85) se déplace vers le facteur de puissance unité et donc la puissance de sortie en mégavoltampères réactifs diminue en se rapprochant de zéro.
- L'élément MW du courant de stator augmente pendant que l'élément mégavoltampères réactifs du courant de stator diminue. Le changement de l'élément MW est cependant plus important que celui de l'élément mégavoltampères réactifs (près du facteur de puissance unité), donc l'effet net est que le courant de stator augmente.

#### **4.13.2 Réglage de l'excitation sans changement du flux de vapeur**

Voyons maintenant l'augmentation de l'excitation en élevant le point de réglage du stabilisateur automatique de tension tout en maintenant le flux de vapeur constant. Voir la figure 31 ci-dessous.



MVAR = Mégavoltampères    Amps = Ampères    Field Current = Courant de champ  
 Armature Current = Courant d'induit    Active Power = Puissance active    Reactive Power = Puissance réactive  
 Power Factor (Lagging) = Facteur de puissance (en retard)    Time = Temps

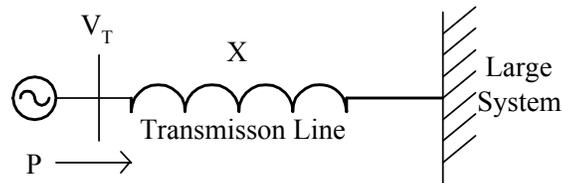
**Figure 31**

**Effet - avec le temps - d'une augmentation de l'excitation avec un flux de vapeur constant**

- L'augmentation de l'excitation constitue l'élément de départ. Elle est effectuée en augmentant le courant de champ (point de réglage de la tension du stabilisateur automatique de tension).
- Le flux de vapeur est constant.
- L'augmentation de l'excitation a lieu sans changer le nombre de MW. Cela signifie que l'alternateur est maintenant surexcité au regard du niveau de réaction d'induit. L'alternateur va donc dans le sens du retard et l'angle de charge diminue. Comme le facteur de puissance initial est de 1,0, l'alternateur se met à avoir du retard et commence à débiter des mégavoltampères réactifs. L'élément MW du courant de stator n'a pas changé, mais l'élément mégavoltampères réactifs du courant de stator augmente. Par conséquent, l'amplitude du courant de stator augmente.
- La puissance active est constante car le flux de vapeur n'a pas changé.
- Il découle de l'argument déjà développé que l'alternateur est maintenant surexcité au regard du niveau de réaction d'induit. Il va donc dans le sens d'un retard par rapport au facteur de puissance de 1,0 d'origine et commence à débiter des mégavoltampères.

#### 4.14 STABILITÉ DES ALTERNATEURS

Étudions maintenant le régime établi et la stabilité dynamique d'un alternateur dont le stabilisateur automatique de tension et le régulateur de vitesse sont tous deux en fonction (situation normale). Il peut être montré que la puissance fournie à une charge par un alternateur (voir la figure 32) est à peu près proportionnelle au carré de la tension aux bornes et inversement proportionnelle à l'impédance entre l'alternateur et le réseau qu'il alimente.

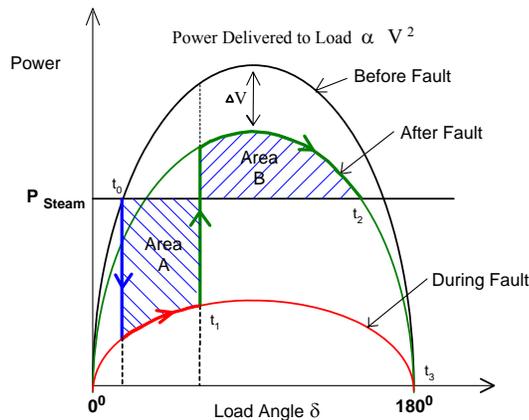


Transmission Line = Ligne de transport    Large System = Grand réseau

**Figure 32**

#### Transfert de puissance d'un alternateur

Si nous traçons le rapport entre la puissance de sortie d'un alternateur et l'avance de cet alternateur sur le réseau électrique (angle de charge), nous obtenons une courbe sinusoïdale. Ce type de courbe permet de définir les caractéristiques de transfert de puissance des alternateurs. Un exemple en est montré à la figure 33.



Power = Puissance    Steam = Vapeur    Load angle = Angle de charge  
 Power Delivered to Load = Puissance fournie à la charge    Before Fault = Avant le défaut  
 After Fault = Après le défaut    During Fault = Pendant le défaut    Area = Zone    Area = Zone

**Figure 33**

#### Courbe de transfert de puissance d'un alternateur

La puissance émise par un inducteur est proportionnelle aux tensions existant de chaque côté de cet inducteur, au sinus de l'angle existant entre ces tensions et inversement proportionnelle à la réactance inductive de cet inducteur.

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin \delta$$

Une courbe de transfert de puissance est une représentation graphique de cette équation pour des valeurs fixes de  $V_1$ ,  $V_2$  et  $X_L$ . C'est un tracé de l'angle de charge par rapport au transfert de puissance de la machine dans une certaine configuration. Si les valeurs rattachées à cette configuration changent, le transfert de puissance et l'angle de charge de la machine changent aussi.

On peut se représenter la courbe de transfert de puissance en imaginant un alternateur pouvant fonctionner sans être synchronisé tout en étant raccordé à un grand réseau électrique par un gros ressort réactif. L'alternateur oscille par rapport au grand réseau en se déphasant complètement à  $180^0$  et en se remettant en phase à  $360^0$ . Dans la réalité, le temps nécessaire pour qu'un alternateur oscille de cette façon est d'environ 2 secondes. Le temps de passage de l'angle de charge de  $0^0$  à  $180^0$  est donc d'environ 1 seconde.

Si un alternateur sur lequel s'appliquerait un flux de vapeur  $P_{\text{steam}}$  était raccordé au grand réseau, il serait possible de le représenter par une courbe ayant la forme d'une longue ligne droite horizontale parce que les vannes de vapeur mettraient plus d'une seconde pour fonctionner et réagir en conséquence.

Idéalement, la charge de l'alternateur ( $P_{\text{steam}}$ ) devrait être à  $90^0$  avec le transfert de puissance maximal. Mais il s'agit d'un état extrêmement instable.

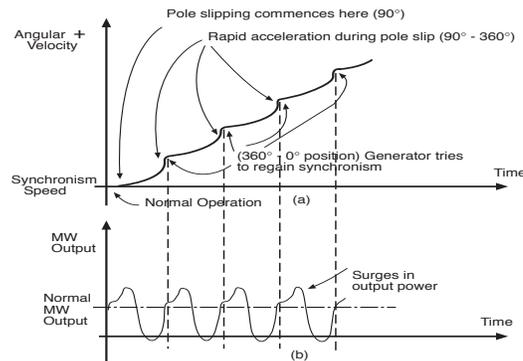
Imaginons au moyen de la courbe qu'une panne de ligne de distribution se produit au moment  $t_0$ . Comme la tension baisse, la capacité de transfert de la puissance chute dramatiquement et la turbine commence à accélérer. La panne est corrigée au moment  $t_1$ . La tension est rétablie, mais pas à sa valeur d'origine, comme d'habitude, parce que la réactance  $X$  est maintenant légèrement plus élevée à cause des pertes subies.

Pendant ce temps ( $t_0$  à  $t_1$ ), la turbine a piégé de l'énergie en provenance du flux de vapeur (voir la zone A). Elle débite cette énergie dans la zone B de la courbe. Si l'alternateur ne parvient pas à transférer complètement cette énergie au moment  $t_2$ , il suit rapidement la courbe en descendant vers les  $180^0$  et se décale par rapport au réseau.

#### 4.15 ALTERNATEUR DÉCALÉ

Les effets du glissement de pôle sont si graves que nous devons les examiner de nouveau. Si l'angle de charge d'un alternateur augmente (soit parce que la charge de l'alternateur est trop élevée par rapport au niveau d'excitation, soit parce que l'angle de charge de l'alternateur est trop grand), les lignes du flux magnétique s'étirent. Revoiyons la figure 15, qui illustre l'étirement de ces lignes avec un alternateur bipolaire dont l'angle de charge est de  $90^\circ$ . Si le rotor continue de prendre de l'avance sur le champ tournant du stator, il peut vite atteindre un angle de charge de  $180^\circ$  (puissance de sortie égale à zéro). Cet effet est illustré à la figure 31. À ce point, il n'existe plus aucune liaison de flux entre le rotor et le stator et il est inutile d'espérer que l'alternateur reste synchronisé. Le glissement de pôle est irrémédiable.

Pendant le glissement de pôle, la vitesse angulaire du rotor n'est pas constante. En fait, le mouvement du rotor est très heurté et impose d'énormes contraintes aux enroulements, accouplements, fondations et autre éléments. La puissance de sortie active se manifeste par des à-coups, comme nous l'avons vu plus haut. La partie (a) de la figure 34 montre la position angulaire du rotor et la partie (b) montre la puissance de sortie active, en fonction du temps pendant le glissement de pôle.



Angular Velocity = Vitesse angulaire    Synchronism Speed = Vitesse de synchronisation    MW Output = Sortie en MW  
 Normal MW Output = Sortie normale en MW    Pole slipping commences here (90°) = Le glissement de pôle commence ici (90°)  
 Rapid acceleration during pole slip (90° - 360°) = Rapide accélération pendant le glissement de pôle (90° à 360°)  
 (360° - 0° position) Generator tries to regain synchronism = (de 360° à 0°) L'alternateur tente de rétablir la synchronisation  
 Time = Temps    Normal Operation = Fonctionnement normal    Surges in output power = Crêtes de puissance de sortie  
 Time = Temps

**Figure 34**

#### Position angulaire du rotor (a) et puissance de l'alternateur en MW (b) avec glissement de pôle

Le point de réglage normal du régulateur de vitesse de l'alternateur est établi de façon que la sortie de vapeur  $P_{\text{steam}}$  permette d'accepter une instabilité possible du système. Le calcul de ce point de réglage

fonctionnel doit tenir compte de l'état des stabilisateurs automatiques de tension. Ces stabilisateurs sont destinés à déceler les baisses de tension pour augmenter l'excitation et élever la tension aux bornes. Cela a pour effet d'augmenter les capacités de transfert (remonter la courbe). Si le stabilisateur automatique de tension est en mode manuel ou si un stabilisateur plus lent est en fonction, le niveau de la sortie de l'ensemble producteur doit être abaissé à cause des marges de stabilité établies. Notons que les stabilisateurs automatiques de tension ont besoin d'au moins 0,25 seconde pour réagir et qu'ils ont très peu d'effet lorsqu'une perturbation est grave.

La tension et la fréquence de l'alternateur sont établies par le système électrique lorsqu'il est connecté à un bus de grande taille (infini). Cependant, si l'alternateur fonctionne individuellement ou s'il est raccordé à un îlot de faible charge, ces deux paramètres doivent être maintenus dans des limites acceptables pour éviter d'endommager le matériel. Nous avons déjà vu les effets destructeurs des tensions et des fréquences trop faibles ou trop fortes et de leur combinaison (volts/hertz). Une perturbation majeure peut brusquement isoler du réseau principal l'alternateur et sa charge locale. La tension augmente alors rapidement et le stabilisateur automatique de tension doit l'abaisser à sa valeur nominale. La vitesse de rotation de la turbine augmente par ailleurs rapidement, ce qui fait augmenter la fréquence et lui fait dépasser la fréquence nominale. Le point de réglage du régulateur de vitesse doit être alors très vite abaissé.

La turbine peut décrocher quelle que soit la puissance de sortie et le régulateur de vitesse doit vite intervenir pour ramener la puissance à zéro. Le décrochement le plus sévère a lieu lors d'un rejet total de la charge ou lorsque l'alternateur décroche à pleine puissance.

Un déclenchement du disjoncteur de l'alternateur peut être amorcé si la puissance produite devient trop importante à cause d'une perturbation majeure accompagnée d'une perte de charge sur le réseau. La totalité du grand réseau devient instable (voir figure 31) à moins d'annuler une certaine partie de la puissance ( $P_{\text{steam}}$ ).

Si un alternateur reçoit le signal d'un calage :

- le ou les disjoncteurs de ce générateur s'ouvrent;
- le rotor de l'alternateur à turbine accélère rapidement;
- un important déséquilibre se produit entre la puissance offerte par la turbine ( $P_{\text{steam}}$ ) et la charge précédente en MW.

Le ralentissement rapide abaisse le point de réglage à vide du régulateur de vitesse pour stabiliser la charge à 60 Hz, en préparation d'une nouvelle opération de synchronisation. Le stabilisateur automatique de tension ramène la tension exercée aux bornes à la tension nominale.

#### **4.16 ALTERNATEURS - PRODUCTION DE CHALEUR ET CONDITIONS DÉFAVORABLES**

La sécurité et l'efficacité du fonctionnement des alternateurs à turbine est de toute première importance dans l'exploitation des centrales électriques. Les limites fonctionnelles de l'équipement constituent l'une des grandes préoccupations. Jusqu'où peut-on pousser un alternateur? Et si les limites fonctionnelles d'un alternateur sont atteintes ou dépassées, quelles en sont les conséquences? Nous allons voir à ce sujet les alternateurs plutôt que les turbines, car la capacité des turbines est bien supérieure à celle des alternateurs, en particulier dans le domaine de la stabilité.

En plus des problèmes de stabilité des groupes turbine-alternateur examinés précédemment, les contraintes dues à la chaleur posent les plus importantes limites au fonctionnement des alternateurs. La chaleur a pour origine les pertes qui se produisent dans le fer (ou le noyau) et dans les enroulements (ou le cuivre) du rotor et du stator.

Les pertes dans le fer sont liées au flux magnétique. Rappelons-nous que la valeur du flux magnétique est proportionnelle à la tension appliquée et inversement proportionnelle à la fréquence :

$$(\phi \propto V/f)$$

À cause des contraintes thermiques et mécaniques, les constructeurs indiquent que la valeur du flux appliqué au noyau de leurs alternateurs ne doit pas rester plus de quelques minutes à 10 % au-dessus de la normale.

Les pertes se produisant dans les enroulements sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant qui circule dans ces enroulements. Les principes fondamentaux de l'électricité nous enseignent que la puissance dissipée par un chauffage d'origine électrique est une puissance active ou réelle, ce qui peut s'exprimer comme suit :

$$P_{\text{chaleur}} = I^2 R \text{ mégawatts)}$$

$$\text{et comme } V = IR$$

$$P_{\text{chaleur}} = V^2 / R \text{ mégawatts}$$

Notes

#### 4.16.1 Limite de chauffage du rotor

Le rotor peut chauffer dans deux cas. Premièrement, lorsque la charge est élevée, à cause du fort courant de champ nécessaire pour contrer la réaction d'induit de l'alternateur. Deuxièmement, lorsque l'alternateur doit fonctionner en mode de surexcitation pour pouvoir produire les mégavoltampères nécessaires, à cause d'une charge trop faible ou trop forte (surtout dans le cas d'une charge trop forte). Cela provoque des pertes dans le noyau à cause de la circulation d'un flux magnétique excessif dans ce noyau. Si un flux excessif est appliqué à l'alternateur (rappelons-nous la figure 6), le noyau du rotor et du stator peut rapidement surchauffer, ce qui peut endommager cet alternateur.

Si la température du rotor est excessive, la durée utile de l'isolant diminue. Par ailleurs, les différences de dilatation provoquées par les différences excessives de température entre les éléments en fer et en cuivre du rotor peuvent fissurer le cuivre ou l'isolant du rotor.

Les constructeurs d'alternateurs indiquent la valeur maximale du courant de champ applicable à leurs machines. Cette limite est imposée par le chauffage  $I_F^2 R_F$  du conducteur du rotor et par la capacité des balais et des bagues de contact, qui ne permettent pas de faire passer des courants de forte intensité vers le rotor.

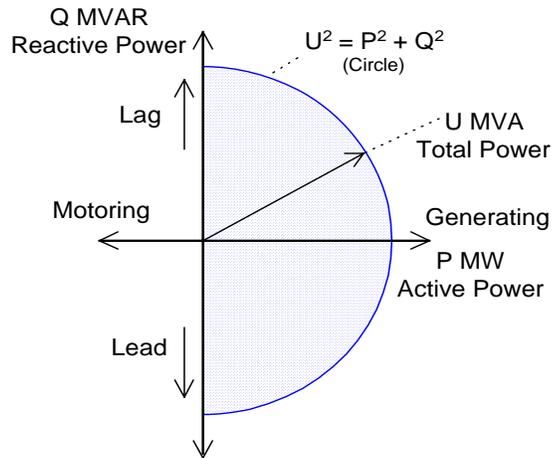
#### 4.16.2 Limites de chauffage du stator

Les pertes par le stator sont surtout des pertes dans le cuivre ( $I_a^2 R$ ). Cependant, si l'excitation est très forte ou très faible, il se produit des pertes dans le noyau. Lorsque l'excitation est très forte (facteur de puissance en retard), les pertes sont du même type que celles indiquées pour le rotor. Lorsque l'excitation est trop faible, les extrémités du noyau du stator surchauffent à cause des formes étirées du flux magnétique.

Si l'alternateur ne subit aucune perte, la totalité de sa puissance de sortie peut être représentée par un cercle (figure 33). La partie gauche du cercle n'est pas montrée parce que l'alternateur n'est pas destiné à fonctionner constamment comme un moteur.

Notes

### 4.16.3 Limite de chauffage des alternateurs



Q MVAR = Mégavoltampères Q    Reactive Power = Puissance réactive    Lag = Retard  
 Motoring = Fonctionnement comme un moteur    Lead = Avance    (circle) = (cercle)    U MVA = Mégavolts U  
 Total Power = Puissance totale    Generating = Production d'électricité    P MW = Mégawatts P  
 Active Power = Puissance active

**Figure 35**  
**Diagramme Q-P élémentaire**

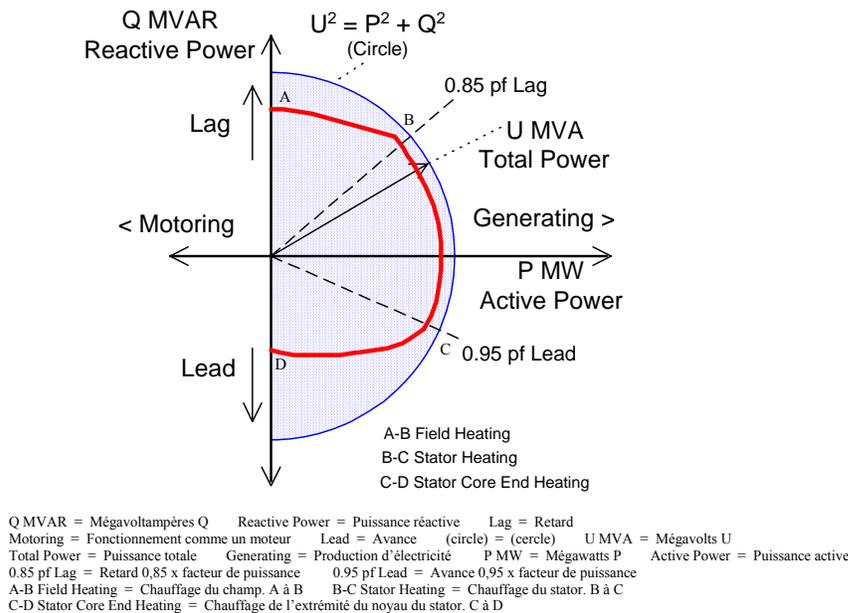
La figure 35 nous montre que la partie de la puissance de sortie de l'alternateur nommée puissance apparente comprend les éléments de puissance active et réactive indiqués ci-dessous :

$$U_{\text{NOMINAL}}^2 = P^2 + Q^2$$

OU

$$\text{MVA}^2 = \text{MW}^2 + \text{MVAR}^2$$

Nous pouvons facilement indiquer l'effet de la chaleur sur les limites de sortie d'un alternateur par superposition sur la figure 35, ce qui donne la figure 36 ci-dessous.



**Figure 36**

### Diagramme Q-P avec limites de chauffage

Le chauffage de l'enroulement du stator est une perte dans le cuivre qui est constante si la tension est constante, comme nous l'avons vu :

$$P_{\text{chaleur}} = I^2 R = V^2 / R$$

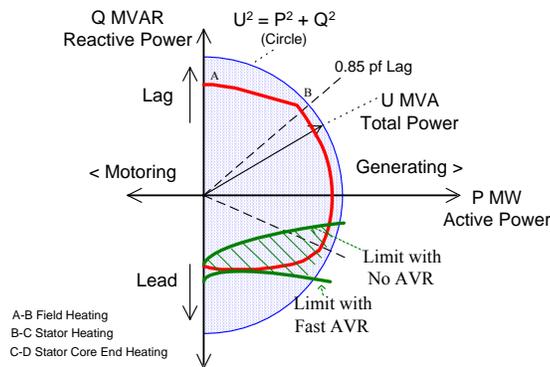
La chaleur de l'enroulement du stator est la limite principale voisine du facteur de puissance unité lorsque le courant réactif est faible. Cela est indiqué dans la région B-C du diagramme.

- Dans la région du facteur de puissance en retard (A-B), l'alternateur est surexcité. Il est souhaitable de se reporter à la figure 20 pour examiner la courbe V et voir l'effet du facteur de puissance sur le courant d'excitation. Un chauffage  $I^2R$  important se produit aux enroulements de champ du rotor et un important flux magnétique circule dans le noyau du rotor et du stator. En conséquence, le chauffage produit dans les conducteurs du rotor et dans le noyau du rotor et du stator constitue un facteur de limite dans la région du facteur de puissance en retard.
- Dans la région du facteur de puissance en avance (C-D), l'alternateur est sous-excité. Il est souhaitable de se reporter de nouveau à la figure 20. Si l'alternateur est sous-excité, des formes de flux magnétique inhabituelles se forment aux spires d'extrémité des enroulements du stator à mesure que le flux s'affaiblit et s'étire. Ces formes inhabituelles provoquent le chauffage de l'extrémité en métal du stator. En conséquence, le

Notes

chauffage produit aux spires d'extrémité du stator constitue un facteur de limite dans la région du facteur de puissance en avance.

- Un autre facteur de limite doit être examiné dans la région extrême du facteur de puissance en avance si l'alternateur est très sous-excité. Cela signifie que l'angle de charge est important et que le flux magnétique du rotor est à la limite de l'étirement. Si l'alternateur subit une forte perturbation quand l'angle de charge est important, il peut se désynchroniser totalement, avec le glissement de pôle que cela entraîne. La portée de la limite de stabilité dans la région d'excitation dépend de certains facteurs, comme la réponse de l'excitatrice et l'agencement du réseau de distribution électrique associé à l'alternateur. Cette limite est indiquée en superposition sur le diagramme de la figure 37 ci-dessous.



Q MVAR = Mégavoltampères Q Reactive Power = Puissance réactive Lag = Retard Motoring = Fonctionnement comme un moteur  
 Lead = Avance (circle) = (cercle) U MVA = Mégavolts U Total Power = Puissance totale Generating = Production d'électricité  
 P MW = Mégawatts P Active Power = Puissance active 0.85 pf Lag = Retard 0,85 x facteur de puissance  
 0.95 pf Lead = Avance 0,95 x facteur de puissance A-B Field Heating = Chauffage du champ. A à B  
 B-C Stator Heating = Chauffage du stator. B à C C-D Stator Core End Heating = Chauffage de l'extrémité du noyau du stator. C à D  
 Limit with No AVR = Limite sans stabilisateur automatique de tension  
 Limit with Fast AVR = Limite avec stabilisateur automatique de tension en mode rapide

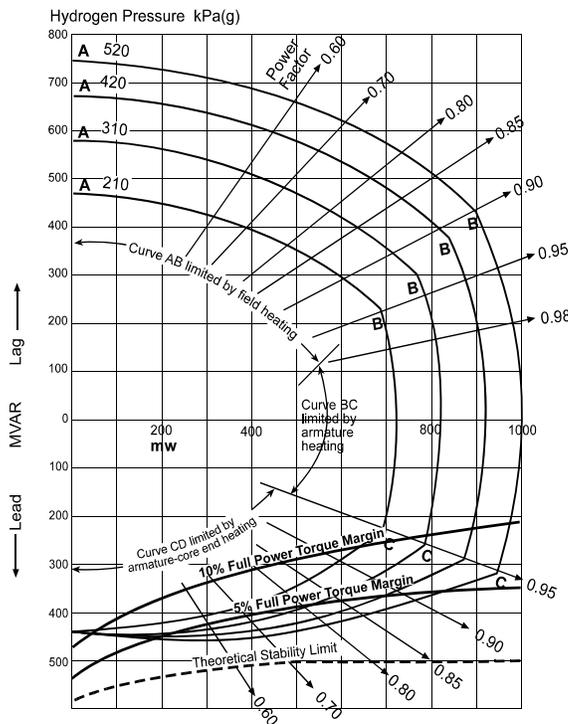
**Figure 37**  
**Diagramme Q-P indiquant la stabilité**

Les limites de stabilité avec ou sans intervention rapide du stabilisateur automatique de tension sont montrées à la figure 35. Comme nous l'avons vu à la rubrique précédente sur le transfert de puissance, lorsque l'angle du facteur de charge est en avance, le champ doit pouvoir être renforcé en fonction de l'étirement du flux magnétique du rotor. Le stabilisateur automatique de tension neutralise toute chute de tension due à la charge et renforce le champ.

#### 4.16.4 Refroidissement du rotor et du stator des alternateurs

Sans vouloir trop compliquer le problème des limites de puissance de sortie associées aux alternateurs, nous devons examiner la question du niveau de refroidissement du stator et du rotor.

L'enroulement du stator est refroidi par circulation d'eau à travers les conducteurs en cuivre creux. Le rotor est refroidi par circulation forcée d'hydrogène (H<sub>2</sub>) à travers le compartiment étanche du rotor et du stator (figure 39). L'hydrogène circule à travers des fentes spéciales aménagées dans le noyau du rotor et à travers l'espace séparant le rotor du stator. Le refroidissement se fait évidemment par expansion de l'hydrogène. Son efficacité est donc proportionnelle à la diminution de la pression de l'hydrogène. Chaque tranche de diminution de pression de 7 kPa se traduit par un gain de 1 % à la sortie de l'alternateur. Les lignes de pression d'hydrogène sont indiquées à la figure 38, ce qui donne un diagramme QP plus complet, bien qu'un peu encombré.



Lead = Avance MVA = Mégavoltampères Lag = Retard Hydrogen Pressure kPa(g) = Pression d'hydrogène kPa(g)  
 Power Factor = Facteur de puissance Curve A-B limited by Field Heating = Courbe A à B limitée par le chauffage du champ  
 Curve B-C limited by Armature Heating = Courbe B à C limitée par le chauffage de l'induit  
 Curve C-D limited by stator Core End Heating = Courbe C à D limitée par le chauffage de l'extrémité du stator  
 10% Full Power Torque Margin = Marge de couple à 10 % de la puissance maximale  
 5% Full Power Torque Margin = Marge de couple à 5 % de la puissance maximale  
 Theoretical Stability Limit = Limite de stabilité théorique

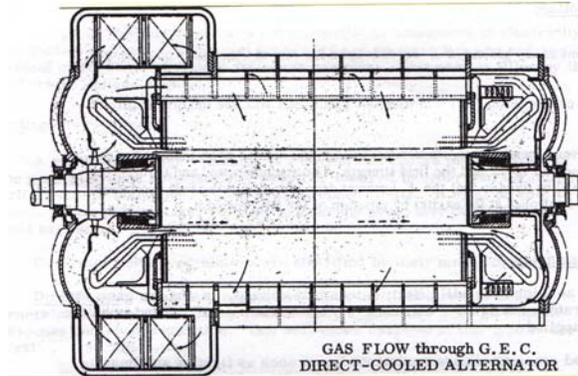
**Figure 38**

#### Diagramme Q-P avec lignes de pression H<sub>2</sub>

Nous venons de voir que le stator est directement refroidi par de l'eau circulant à travers les enroulements et dans une certaine mesure par de

Notes

l'hydrogène circulant autour des enroulements. Des flexibles en plastique sont utilisés pour raccorder les canalisations d'eau aux enroulements du stator. Il est essentiel d'utiliser de l'eau dont la conductivité est très basse pour minimiser les pertes par courant de fuite. Si la limite de conductivité est dépassée, du courant risque de circuler à travers l'eau traversant les enroulements, provoquant une augmentation du chauffage des enroulements et une diminution de la puissance de sortie.



GAS FLOW through G.E.C. DIRECT-COOLED ALTERNATOR  
= CIRCULATION DU GAZ À TRAVERS UN ALTERNATEUR G.E.C. À REFROIDISSEMENT DIRECT

**Figure 39**

**Coupe transversale d'un alternateur**

L'hydrogène est utilisé comme moyen de refroidissement pour deux raisons principales :

- Sa conductivité thermique est élevée (six fois celle de l'air), ce qui lui permet d'effectuer de très rapides échanges de chaleur.
- Sa densité est faible (un quatorzième de celle de l'air) et donc l'effet de tourbillonnement ou de freinage qu'il oppose au rotor en rotation est faible.

L'hydrogène offre un avantage supplémentaire du fait qu'il doit être utilisé dans un espace clos et étanche à l'épreuve de la crasse et de l'humidité, ce qui contribue à diminuer l'usure de la machine et donc à amoindrir les opérations d'entretien et de dépannage.

L'hydrogène a pour inconvénient d'être explosif s'il est mélangé à l'air dans un rapport de 4 % à 74 %. Cela ne pose aucun problème en temps normal, tant que la pureté de l'hydrogène est maintenue à un pourcentage égal ou supérieur à 95 %. Pendant les interventions, du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est utilisé comme tampon pour chasser l'hydrogène du boîtier de l'alternateur, puis de l'air est utilisé pour

chasser le CO<sub>2</sub>. L'opération est effectuée en sens inverse pour réintroduire l'hydrogène : le CO<sub>2</sub> est injecté en premier puis il est chassé par l'hydrogène.

Des précautions doivent être prises pour assurer la pureté de l'hydrogène, pour plusieurs raisons :

- L'air diminue les capacités de refroidissement et augmente la friction (par tourbillonnement), comme nous l'avons vu. Mais en plus de l'augmentation de la température, n'oublions pas qu'un mélange hydrogène/air à 74 % d'hydrogène est explosif.
- L'humidité diminue par ailleurs les capacités de refroidissement et augmente les pertes par effet de tourbillonnement. Elle a un effet encore plus dangereux du fait qu'elle diminue les capacités d'isolation entre les enroulements électriques et le noyau du rotor et du stator. Cela peut provoquer des pannes d'enroulement ou endommager l'alternateur.

#### 4.17 ARRÊT DES ALTERNATEURS

Ce module nous a permis d'examiner toutes les facettes du démarrage et de l'utilisation des alternateurs. Nous allons maintenant le conclure en voyant rapidement les interventions permettant d'arrêter un alternateur en toute sécurité.

Pour mettre hors-circuit un groupe turbine-alternateur faisant partie d'un réseau doté de deux alternateurs ou plus, le couple d'entraînement produit par la force motrice (vapeur) doit être réduit jusqu'à ce que la puissance de sortie de l'alternateur soit nulle. Cela pour deux raisons :

Le rotor se mettrait à tourner trop vite à la mise hors-circuit.

La brusque suppression de la production électrique d'un alternateur forcerait les autres alternateurs encore en fonction à effectuer une brusque compensation. Cela produirait une importante secousse sur le réseau électrique, car les régulateurs de vitesse tenteraient de réagir pour remédier à la perte d'énergie.

À ce point, le disjoncteur de l'alternateur peut être ouvert pour déconnecter cet alternateur du réseau. La tension de sortie peut être diminuée jusqu'à zéro en supprimant l'excitation du champ du rotor et la force motrice (vapeur) peut être mise à zéro. Lorsque la turbine est arrêtée, le groupe turbine-alternateur doit être raccordé à l'entraînement mécanique pour tourner à faible vitesse et empêcher le

Notes

fléchissement ou la destruction de l'arbre à cause de la chaleur encore présente dans les aubes de la turbine, dans l'arbre lui-même et dans le noyau et les conducteurs du rotor et du stator.

#### 4.18 QUESTIONS DE RÉVISION - ALTERNATEURS

1. Expliquer ce qui se passe dans un alternateur si le stabilisateur automatique de tension est en fonction avec un point de réglage normal et que l'excitation est appliquée à la machine tournant lentement.
2. Indiquer quatre paramètres électriques devant être établis de façon appropriée avant qu'un alternateur puisse être couplé sur un réseau électrique. Énoncer les conséquences si ces paramètres ne sont pas établis de façon appropriée.
3. Un synchroscope permet de connaître l'ampleur et la direction du manque de concordance entre deux des quatre paramètres électriques nécessaires pour la synchronisation. Indiquer les deux paramètres mesurés par le synchroscope et expliquer comment ces paramètres apparaissent sur l'instrument
4. Donner une brève description de ce qui arrive à la sortie d'un alternateur (MW et MVA réactifs), au courant de champ et à l'ouverture de la vanne du régulateur de vitesse lorsque l'alternateur est couplé sur un bus hors tension auquel est raccordée un charge inductive. Partir du principe que le stabilisateur automatique de tension et le régulateur de vitesse fonctionnent bien.
5. Lorsque les alternateurs sont couplés sur des bus hors tension, les charges sont si possible déconnectées des bus. La charge est ensuite ajoutée lentement au bus. Expliquer pourquoi.
6. Définir les termes bus fini et bus infini.
7. Expliquer brièvement de quelle façon le stabilisateur automatique de tension commande la tension de sortie des gros alternateurs.
8. Expliquer la fonction du régulateur de vitesse de la turbine lorsque la machine n'est pas connectée à un réseau électrique et lorsqu'elle synchronisée avec un bus infini.
9. La sortie d'un groupe turbine-alternateur de grande taille est de 500 MW et son facteur de puissance est en retard à 0,9. Expliquer ce qui arrive à la sortie, à la puissance, à la puissance réactive, à la tension aux bornes et à la fréquence si les vannes du régulateur de vitesse sont ouvertes de façon que le flux de vapeur dirigé sur la turbine augmente de 5 %. Partir du principe que la machine est connectée sur un bus infini à travers un

Notes

- inducteur (un transformateur) et que le régulateur de vitesse et le stabilisateur automatique de tension fonctionnent bien.
10. Indiquer les cinq facteurs qui ont une influence sur la stabilité du régime établi d'un alternateur. Quel est le rapport existant entre ces facteurs?
  11. La puissance de sortie et le rapport de la tension à la fréquence établissent deux importantes limites au fonctionnement des alternateurs. Expliquer pourquoi chacun de ces éléments constitue une limite et indiquer les conséquences d'un dépassement de ces limites.
  12. Définir le terme rejet de charge et décrire brièvement les changements des paramètres de puissance, de puissance réactive, de facteur de puissance, de vitesse et de tension aux bornes d'un alternateur qui subit un rejet de charge.
  13. De la chaleur est produite dans le fer du stator, dans l'enroulement du stator, dans l'enroulement du rotor et dans l'hydrogène présent dans les alternateurs. Expliquer comment elle est produite dans chacun de ces éléments.
  14. Les alternateurs sont dotés de deux circuits de suppression de la chaleur. Donner le nom de ces deux circuits et indiquer quelles sources de chaleur (voir le problème précédent) ils sont destinés à traiter.
  15. Il est important que la conductivité du circuit de refroidissement des pertes  $I^2R$  dans le stator soit la plus faible possible. Expliquer pourquoi et indiquer les conséquences si cette conductivité augmente.
  16. L'hydrogène du circuit de refroidissement à l'hydrogène doit rester pur. Toute entrée d'air ou d'eau doit être empêchée. Expliquer les conséquences d'une pénétration d'air ou d'eau dans le circuit de refroidissement à l'hydrogène.

**PAGE VOLONTAIREMENT LAISSÉE EN BLANC**

Notes

## 5 PROTECTION ÉLECTRIQUE

### 5.1 INTRODUCTION

Le 9 novembre 1965, sur 80 000 miles carrés, en Ontario et aux États-Unis, 30 millions de personnes ont été privées d'électricité pendant plus d'une demi-journée. Cette incroyable panne de courant a définitivement modifié les principes de la protection électrique et a entraîné la création de la plupart des protections de notre époque. Sans entrer dans le détail des raisons de cette panne, disons que tout a commencé à la centrale hydroélectrique Sir Adam Beck, à cause d'un système de protection mal adapté qui était en place à travers tout le Canada et chez nos voisins du sud. Plusieurs événements se sont enchaînés à partir d'un relais réglé à une valeur trop faible au regard du courant débité à la sortie de la centrale. De nombreux éléments (on pourrait d'ailleurs dire l'absence de nombreux éléments) se sont combinés en une cascade catastrophique (ce que nous allons voir dans ce module). À cette époque, personne ne souciait beaucoup de la vitesse de réaction ou de la sélectivité des protections ni de certains autres facteurs. Ce module va nous permettre de découvrir et comprendre assez bien tous ces phénomènes.

Dans les centrales électriques, tous les circuits électriques et toutes les machines peuvent tomber en panne. En général, les pannes sont causées par une rupture de l'isolant placé entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs (les causes de ce genre de défaut sont elles-mêmes diverses). Si une telle panne se produit, l'excès de courant qui se met à circuler à travers une résistance relativement faible peut provoquer de graves dommages, à moins qu'un remède ne soit rapidement apporté.

Nos centrales électriques sont surtout équipées de circuits et de dispositifs triphasés pouvant subir les trois types suivants de panne :

- panne par défaut entre phase et terre
- panne par défaut entre phases
- panne par défaut dans le circuit triphasé avec ou sans liaison à la terre.

Ce module va nous permettre d'étudier le but et les qualités essentielles des protections électriques, les types de défaut auxquels il faut s'attendre et les divers moyens de protéger l'équipement contre ces défauts.

## 5.2 BUT DES PROTECTIONS ÉLECTRIQUES

La fonction des relais de protection consiste à assurer la mise hors fonction rapide de tout élément défectueux en vue de protéger cet élément et le reste du réseau électrique contre tout dommage ou toute instabilité électrique.

Chaque élément électrique doit être doté d'une protection destinée à couper son alimentation au cas où il serait défectueux ou subirait une surcharge.

Cette protection est nécessaire pour assurer que :

- **tout dommage soit minimisé** à l'élément en panne et que la panne n'ait aucune effet destructeur sur les autres éléments (par exemple, si un moteur tombe en panne, il doit être isolé avant que le bus de son alimentation ne se détériore à son tour);
- **tout élément non touché par la panne reste en fonction** (reprenant l'exemple précédent, si un moteur tombe en panne, lui seul doit être isolé, pas la totalité du bus, qui doit continuer à alimenter les éléments fonctionnant bien);
- **les limites de fonctionnement de tout élément soient respectées** (reprenant le même exemple, même en partant du principe que la plupart des moteurs peuvent fonctionner un court instant en étant surchargés, l'alimentation du moteur doit impérativement être coupée avant que la surcharge ne soit trop forte, pour éviter tout dommage);
- **la stabilité du réseau électrique soit maintenue** (comme nous l'avons vu avec le module précédent sur les alternateurs, si aucun remède n'est apporté en cas de problème ou si le remède est apporté trop lentement, le réseau électrique devient instable. L'instabilité provoque une perturbation générale du réseau électrique qui dure tant que la stabilité n'est pas rétablie. Les capacités de production électrique sont alors inévitablement amoindries, ce qui provoque la perturbation d'un très grand nombre d'appareils et de dispositifs électriques).

## **5.3 QUALITÉS ESSENTIELLES DES PROTECTIONS ÉLECTRIQUES**

Maintenant que nous connaissons le but fondamental des protections électriques, voyons les quatre qualités permettant d'atteindre ce but :

### **5.3.1 Vitesse**

Lorsque des défauts électriques ou des courts-circuits se produisent, le dommage causé dépend largement de leur durée. Il est donc souhaitable d'interrompre au plus vite tout défaut de ce genre. Depuis 1965, de grands progrès ont été effectués dans ce sens. Des relais de détection ultra-rapide peuvent maintenant réagir en 10 millisecondes et le relaiement lui-même peut avoir lieu en 2 millisecondes. La mise en place de zones de protection (que nous allons examiner plus loin) permet d'amoinrir les besoins en matière de relais à action différée.

### **5.3.2 Fiabilité**

Il est indispensable que les protections fonctionnent parfaitement à n'importe quel moment où leur intervention est nécessaire, sinon les conséquences peuvent être très graves. La fiabilité nécessaire est assurée grâce à la redondance des protections A et B et à la redondance des alimentations électriques.

### **5.3.3 Sécurité**

Les protections ne doivent isoler que l'équipement défectueux et ne doivent en aucun cas intervenir inutilement sur l'équipement intact. Cet objectif est atteint grâce à un chevauchement des zones de protection.

### **5.3.4 Sensibilité**

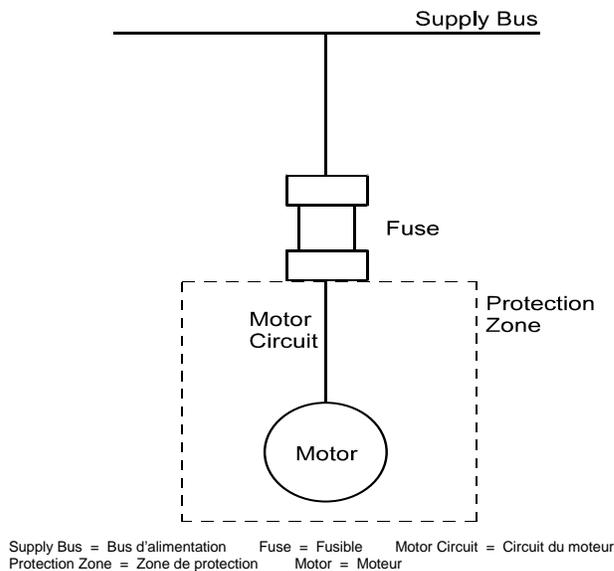
Les protections doivent pouvoir faire la distinction entre un fonctionnement normal et un fonctionnement défectueux. Elles doivent déceler les défauts et y réagir en amorçant tout déclenchement nécessaire avant que la situation ne devienne dangereuse. Elles ne doivent cependant pas être sensibles au point d'intervenir inutilement. Certaines charges nécessitent normalement des courants de grande intensité au démarrage. Les protections ne doivent pas confondre ces charges avec celles causées par des défauts, tout en continuant de pouvoir déceler celles qui nécessitent leur intervention. La capacité de relaiement permettant de satisfaire aux besoins liés à la sensibilité est assurée grâce à la mise en œuvre de zones de protection.

## 5.4 ZONES DE PROTECTION

L'idée maîtresse de la mise en œuvre des zones de protection vient du fait que chaque élément d'un réseau électrique (bus, transformateur, moteur et alternateur) se distingue des autres éléments par ses caractéristiques. Les protections peuvent être construites pour être plus rapides et donc plus sûres et plus sensibles à condition de n'être rattachées qu'à un seul élément.

Si nous cherchons à examiner un réseau électrique du point de vue des zones de protection, nous devons commencer par avoir une image assez claire de l'endroit où doivent normalement être établies les limites de ces zones.

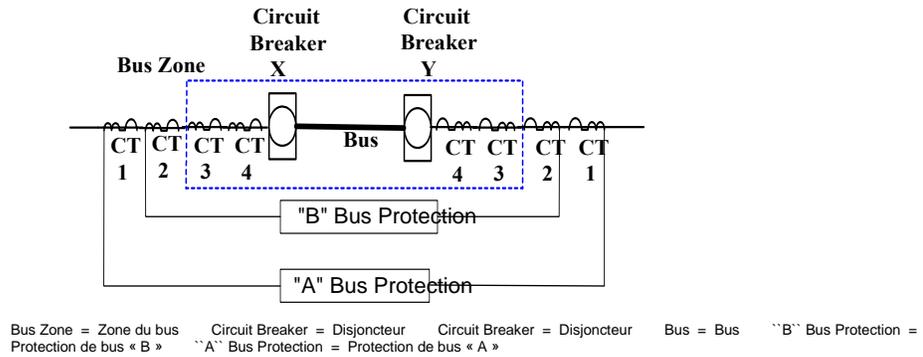
Avec les circuits simples, comme celui du moteur schématisé ci-dessous, le fusible ou le disjoncteur thermique constitue la limite de la zone protégée. La capacité nominale de ce fusible ou de ce disjoncteur est établie de façon à ne protéger que ce moteur.



**Figure 1**  
**Zone de protection simple**

Le fusible est un type de protection très rudimentaire. Avec la plupart des circuits de protection, l'intensité et la tension doivent être abaissées au moyen de transformateurs d'intensité et de transformateurs de tension. La figure 2 ci-dessous illustre un circuit de protection c. a.

Notes

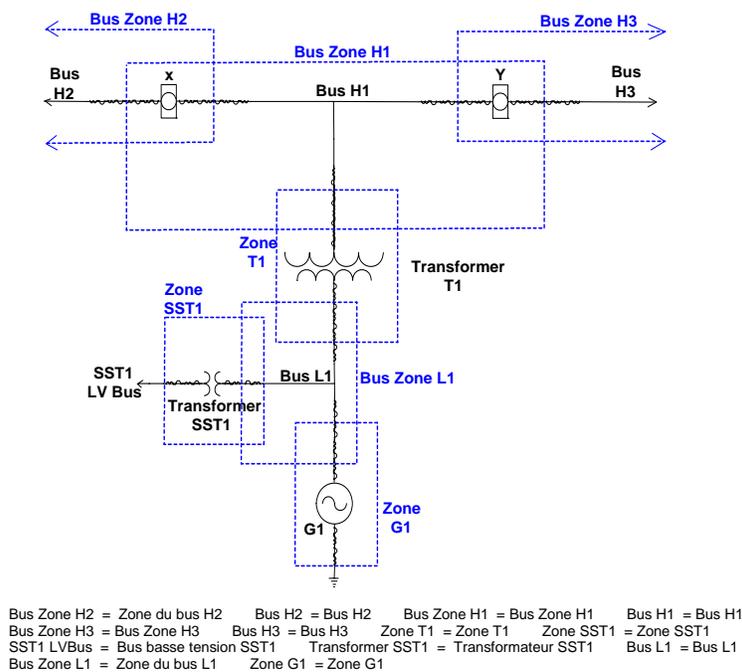
**Figure 2****Zones de protection d'un Bus**

Nous allons examiner les protections des bus de façon plus détaillée à la rubrique suivante, mais il est important de noter pour l'instant que les transformateurs d'intensité CT1 et CT2 des disjoncteurs X et Y fournissent le courant nécessaire à la protection de zone. Les éléments compris dans la zone protégée sont les suivants :

- Le bus
- Les disjoncteurs X et Y

Les protections du bus A et B déclenchent l'ouverture des disjoncteurs X et Y si un défaut est décelé sur les éléments compris dans la zone protégée encadrée. Ces dispositifs peuvent par ailleurs être conçus pour ne déceler que les défauts du bus et pour ne réagir qu'en fonction de ces défauts, ce qui peut les rendre très précis et très rapides. Les objectifs de vitesse, de sécurité et de sensibilité visés par la protection sont maintenant atteints. Nous verrons plus loin la fiabilité de la protection obtenue grâce à la redondance permise par les transformateurs d'intensité multiples

La figure 3 nous permet d'avoir une vue d'ensemble de l'interconnexion des zones protégées. Ce schéma illustre la division d'un réseau électrique en zones de protection standard.



**Figure 3**  
**Zones en chevauchement**

Certains principes importants doivent être notés à partir du schéma précédent.

- Chaque élément est rattaché à une zone de protection spéciale. Comme nous l'avons vu, cela permet d'augmenter la vitesse, la sécurité et la sensibilité.
- Les zones se chevauchent pour qu'aucun élément ne demeure sans protection. Cela permet d'augmenter la sécurité.
- Les limites des zones sont définies par les transformateurs d'intensité. Des transformateurs d'intensité permettent d'obtenir la protection nécessaire en fonction de l'amplitude et de l'angle de phase du courant circulant dans chaque circuit du réseau électrique. La protection peut ainsi fonctionner de façon très sélective (comme nous le verrons aux rubriques suivantes sur les protections spécifiques). Un fonctionnement très sélectif permet d'augmenter la vitesse et la sensibilité de la protection tout en assurant la sécurité contre les déclenchements inutiles.
- Les zones de protection peuvent être adaptées de façon à produire des signaux de sortie spéciaux, comme une perte de champ avec un alternateur, un court-circuit à la terre avec un transformateur, etc. Cela permet d'augmenter la vitesse et la sensibilité.

- Les transformateurs d'intensité sont redondants et permettent d'obtenir des protections A et B redondantes. Cela permet d'augmenter la fiabilité, comme nous le verrons plus loin.

## 5.5 PROTECTION DES DISJONCTEURS

La division en zones ne peut donner de bons résultats que si la sortie des protections fonctionne de façon absolument sûre. C'est logique. Avec la protection du bus de la figure 2, par exemple, l'ouverture des disjoncteurs X et Y doit être déclenchée au moment même où un défaut se produit, sinon la zone adjacente, qui alimente l'endroit où s'est produit le défaut, doit être isolée. De la même façon, avec le disjoncteur de la figure 3, la zone adjacente H2 doit être isolée si le disjoncteur X ne s'ouvre pas. Cependant, pour maintenir la vitesse et la sécurité dans les zones de protection, l'utilisation des protections de secours à action différées doit être minimisée. L'ajout de tout dispositif à action différée provoque une diminution de la vitesse et la zone de secours ainsi créée provoque par ailleurs une diminution de la sécurité à cause de sa plus grande taille. La solution consiste à ajouter une protection indépendante au disjoncteur lui-même pour s'assurer qu'il s'ouvrira de façon appropriée ou que les éléments adjacents seront bien mis hors fonction s'il le faut.

Les protections contre les pannes de disjoncteur sont des protections très rapides destinées à se déclencher pour isoler les disjoncteurs qui ne s'ouvrent pas lorsqu'ils le devraient. Si par exemple le disjoncteur X de la figure 3 ne s'ouvre pas pour contrer un défaut dans sa zone, tous les appareils raccordés aux bus H2 et H1 reçoivent un signal de déclenchement par l'intermédiaire de la protection contre les pannes de disjoncteur.

Un disjoncteur est censé être en panne s'il se comporte comme suit après que le signal de déclenchement ait été produit :

- Il n'a pas commencé à s'ouvrir dans un temps établi (par des interrupteurs situés dans le disjoncteur).
- Il ne s'est pas complètement ouvert dans un temps établi (par des interrupteurs situés dans le disjoncteur).
- Le courant n'a pas été coupé par le disjoncteur dans un temps établi (par des interrupteurs situés dans le disjoncteur).

Les protections contre les pannes de disjoncteur sont utilisées à toutes les tensions, mais de façon prédominante avec les circuits dont la tension est de 13,8 kV ou plus. Plus les effets d'une panne de

disjoncteur sur un réseau électrique risquent d'être importants, plus la nécessité d'utiliser ce type de protection très rapide contre les pannes de disjoncteur s'impose. Les circuits dont la tension est inférieure à 13,8 kV peuvent utiliser des protections de secours à action différée, à condition que le temps d'intervention en cas de panne ne soit pas critique.

### 5.5.1 Protections redondantes A et B

Les rubriques précédentes nous ont permis d'examiner la mise en œuvre de zones de protection très rapides et discrètes. Chaque zone est toujours dotée de deux protections très rapides et redondantes. Les lettres A et B sont souvent attribuées à ces protections, mais n'importe quelles lettres pourraient convenir (C et D, R et S, etc.). L'utilisation combinée d'une protection très rapide et d'une protection de secours pourrait constituer une autre solution que la protection redondante. Mais à cause d'une vitesse plus lente, cette solution n'est utilisée que dans le cas où les appareils n'ont pas un effet très important sur le réseau de distribution électrique.

Les protections redondantes sont fonctionnellement identiques mais sont physiquement différentes. Elles ont les six caractéristiques suivantes en commun :

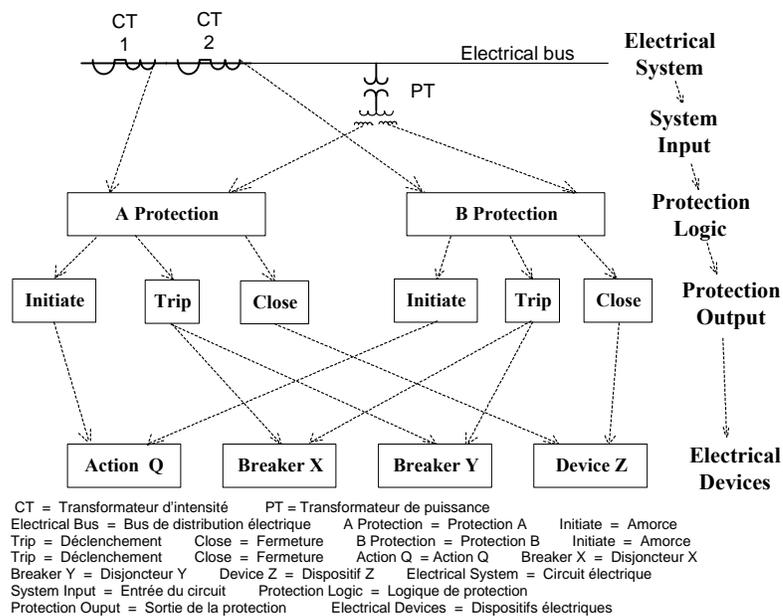
- Elles sont fonctionnellement identiques. Les protections redondantes ont toutes les deux le même objectif et l'une comme l'autre peut être mise hors service sans que la protection de l'équipement ne soit amoindrie.
- Elles sont physiquement différentes. Elles sont différemment agencées et utilisent des types de relais différents. Si une protection fait défaut à cause d'un problème de circuit (harmoniques dans la forme d'onde du courant), il y a moins de risque pour que l'autre protection fasse défaut elle aussi. Souvent, une protection utilise un relais électro-mécanique et l'autre utilise un relais à transistors.
- Elles sont alimentées par des batteries indépendantes. Pour que la redondance soit maintenue, des batteries indépendantes doivent alimenter individuellement chaque protection.
- Leur câblage emprunte des trajets différents. Les appareils et leur câblage sont physiquement séparés pour atténuer les risques de panne commune.

Notes

- Leurs signaux d'entrée sont indépendants. Les protections utilisent des signaux produits par des transformateurs d'intensité et de tension indépendants. Les données produites par d'autres appareils et constituant des signaux d'entrée pour les protections (positions de palettes, sondes de température, asservissements mécaniques, etc.) sont également redondantes.
- Leurs signaux de sortie sont indépendants. Les protections se caractérisent également par des signaux de sortie indépendants à l'adresse des disjoncteurs ou autre dispositifs électriques.

Les dispositifs sont assez souvent dotés de bobines de déclenchement indépendantes pour faciliter la séparation totale des éléments.

La figure 4 ci-dessous illustre le principe des protections redondantes (A et B).



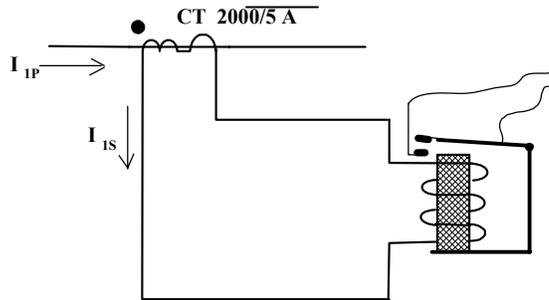
**Figure 4**  
**Protection A et B**

## 5.6 PROTECTIONS DES BUS

La meilleure façon d'étudier les circuits de protection électrique consiste à commencer par examiner les protections de bus, car ces éléments sont les plus faciles à protéger. Ces protections fonctionnent sur le principe du relais de surintensité.

Figure 5 : un relais de surintensité est un dispositif électromagnétique dans lequel du courant circulant dans une bobine enroulée autour

d'un noyau en métal produit un flux magnétique dans ce noyau. Lorsque le courant atteint une certaine intensité, le flux magnétique attire un induit (volet métallique) qui ferme un contact fixé au relais.



CT 2000/5 A = Transformateur d'intensité 2000/5 A

**Figure 5**  
**Relais de surintensité**

Ce schéma montre deux autres éléments. Le premier élément à noter est le sens indiqué pour les transformateurs d'intensité. Si le courant  $I_{1P}$  circule dans le primaire en allant vers le repère primaire, le courant  $I_{1S}$  circule simultanément en sortant du circuit par le repère secondaire. Cet important principe doit être retenu. Les transformateurs d'intensité transforment le courant en amplitude, mais en conservant la même forme d'onde et le même rapport de phase. Nous pouvons imaginer le courant d'arrivée  $I_{1P}$  et le courant de sortie  $I_{1S}$  instantanément réduit dans un rapport de 2 000 à 5.

Le deuxième élément à noter est le rapport de transformation indiqué sous la forme : 2 000/5 A. Il s'agit d'une indication standard signifiant que 2 000 ampères au primaire produisent 5 ampères au secondaire.

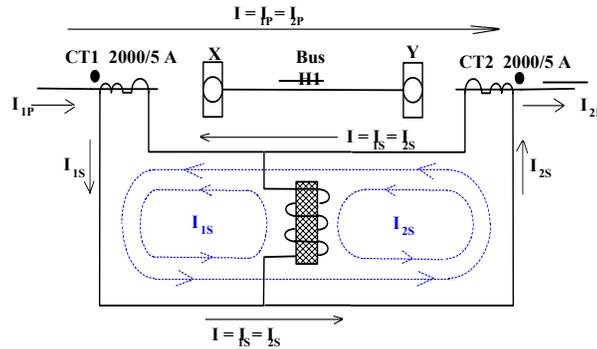
### 5.6.1 Protection différentielle des bus

La protection différentielle utilise le relais de surintensité que nous venons de voir. Pour faciliter les explications, nous n'examinerons qu'une phase, sachant que les autres sont identiques.

Le relais différentiel est alimenté par des transformateurs d'intensité situés hors des limites du bus protégé. Si nous nous rappelons la convention sur les repères des transformateurs d'intensité, nous pouvons voir à la figure 6 ci-dessous que si un courant  $I_{1P}$  circule dans le bus, un courant équivalent  $I_{1S}$  circule dans l'enroulement secondaire du transformateur d'intensité CT1. De la même façon, un courant  $I_{2P}$  circule en sortant du bus et un courant  $I_{2S}$  correspondant circule dans le secondaire (notons le sens). Si le bus est en bon état, le courant d'appel est égal au courant de sortie et un courant circule dans le secondaire de

Notes

la manière indiquée. Aucun courant ne circule dans le relais de surintensité. Notons que la circulation du courant dans le relais de surintensité est égale à la différence (d'où le nom de relais différentiel) des courants d'appel. Dans ce cas, ils sont égaux et la différence de courant est égale à zéro.

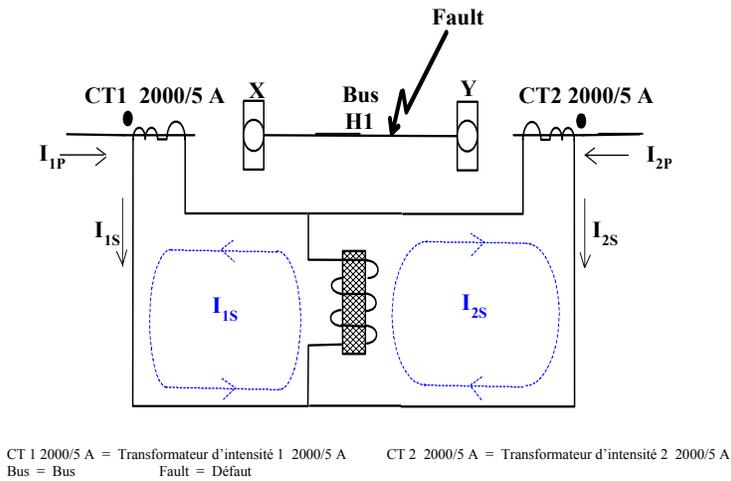


CT 1 2000/5 A = Transformateur d'intensité 1 2000/5 A    CT 2 2000/5 A = Transformateur d'intensité 2 2000/5 A    Bus = Bus

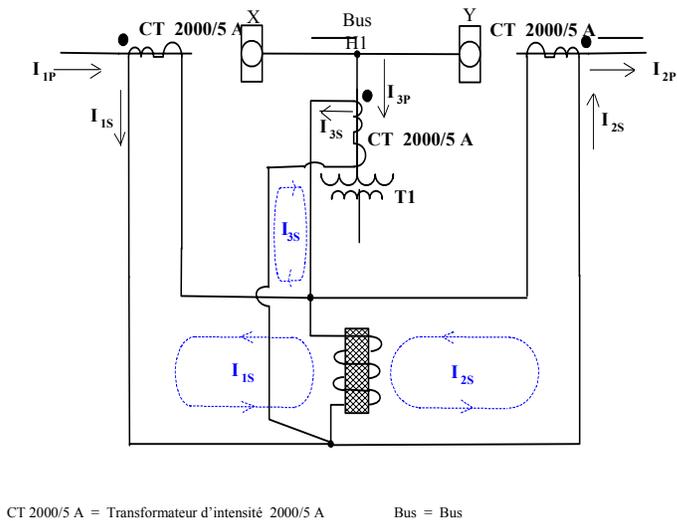
**Figure 6**  
**Protection différentielle**

Si le bus de la figure a un défaut (entre les phases ou entre une phase et la terre), le courant n'est pas le même à son entrée qu'à sa sortie. La différence constatée par le relais ( $I_{1S} - I_{2S}$ ) n'est donc pas égale à zéro. Si le défaut est si important que le relais d'intensité est sollicité, la protection différentielle commande l'ouverture des disjoncteurs X et Y, empêche ces disjoncteurs de se refermer, amorce la protection pour défaut de disjoncteur et amorce toute action nécessaire pour mettre en œuvre la protection de la zone concernée.

La figure 7 montre le sens du courant pour le défaut le plus grave, qui est un défaut interne du bus signalé aux deux extrémités de ce bus. Notons en examinant attentivement la figure que n'importe quel nombre de disjoncteurs ou de transformateurs pourrait être ajouté au bus. Il suffirait de bien s'assurer que le rapport des transformateurs d'intensité et les repères soient appropriés et que les circuits secondaires soient ajoutés en parallèle. La figure 8 donne un exemple de l'aspect que pourrait avoir ce circuit si un transformateur était alimenté par le bus.



**Figure 7**  
**Fonctionnement de la protection différentielle**



**Figure 8**  
**Protection différentielle élaborée**

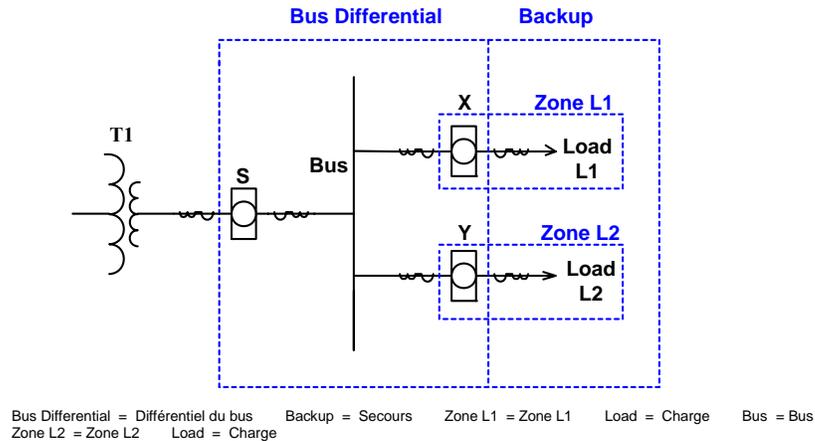
### 5.6.2 Protection de secours de bus

La protection d'un bus devrait normalement comprendre les deux relais différentiels à haute vitesse que nous venons de voir. Cela aurait l'aspect d'une protection de bus redondante A et B. Voir la configuration de cette protection à la figure 2 précédente.

Souvent, avec les bus basse tension (13,8 kV et moins), aucune protection contre les pannes de disjoncteur n'est associée aux disjoncteurs (X et Y dans la figure précédente). Dans ce cas, les protections redondantes (A et B) ne peuvent pas être utilisées. Une zone de protection dotée de protections redondantes et d'aucune

Notes

protection contre les pannes de disjoncteur ne peut fonctionner que si les disjoncteurs ne tombent jamais en panne. Une des deux protections doit donc prendre la forme d'une protection de secours pour le cas où un disjoncteur refuserait de s'ouvrir. Cela entraîne la création d'une zone de chevauchement plus importante, comme le montre la figure 9.

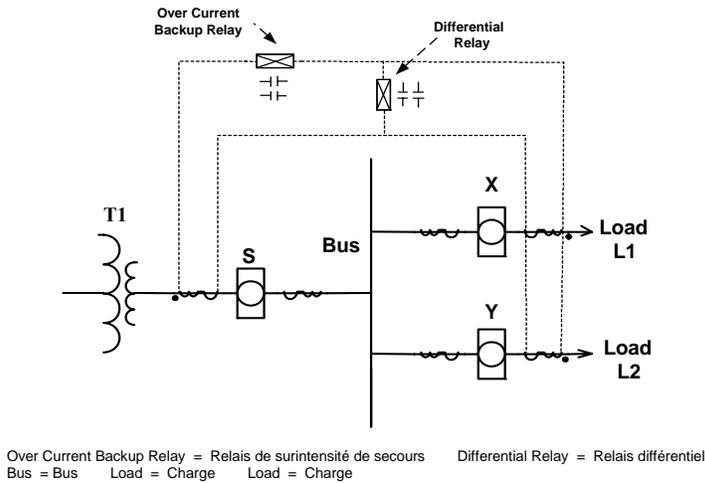


**Figure 9**

#### Zones de protection de bus dotée d'une protection de secours

La figure 9 montre la zone de protection différentielle de bus standard et la zone de protection de bus supplémentaire, qui englobe les charges L1 et L2 d'alimentation par le bus.

Supposons qu'un défaut (entre les phases ou entre une phase et la terre) ou une surcharge électrique se produise à l'alimentation L1. La protection de L1 doit intervenir pour ouvrir le disjoncteur X. Si ce disjoncteur ne s'ouvre pas dans un certain temps, la protection de secours du bus intervient pour ouvrir le disjoncteur d'alimentation S et couper toutes les alimentations du bus. La figure 10 ci-dessous montre un agrandissement de la protection de secours du bus.

**Figure 10****Protection de secours de surintensité**

Le relais de secours de surintensité voit passer la totalité du courant alimentant le bus, tandis que le relais différentiel ne voit passer que la différence entre le courant d'alimentation et le courant de charge, comme nous l'avons vu précédemment. Les paramètres du relais de protection de secours de surintensité sont assez difficiles à établir. Ils sont habituellement associés à un élément d'action instantanée et différée. Après tout, l'objectif visé est qu'en cas de défaut, les disjoncteurs X et Y interviennent avant que la protection de secours ne se mette en fonction et ouvre le disjoncteur S de l'alimentation principale.

- Le paramètre de surintensité instantanée doit être établi à une valeur supérieure à celle de l'arrivée de courant prévue ou de la charge prévue sur le bus et à une valeur inférieure à celle du niveau minimale de défaut du bus. Pour assurer la coordination, ce paramètre doit également être établi à une valeur supérieure à celle de tout paramètre de charge individuelle. Si cela est impossible, l'élément instantané est bloqué.
- Les paramètres de surintensité à action différée doivent être coordonnés avec toutes les charges alimentées par le bus pour permettre aux protections indépendantes (Zone L1 et L2 de la figure 9) de fonctionner en premier.

**5.6.3 Défaut à la terre des bus**

Les défauts de bus entre phase et terre sont beaucoup plus fréquents qu'entre deux ou trois phases. Ils sont habituellement provoqués par une rupture d'isolant par une matière étrangère ou par l'humidité.

Comme ces défauts ont de graves effets, ils doivent être immédiatement isolés du réseau électrique. Le relais différentiel examiné précédemment est utilisé pour protéger le bus contre ces défauts.

#### 5.6.4 Protection des bus contre la sous-tension

De nombreux bus sont protégés contre la sous-tension pour deux raisons :

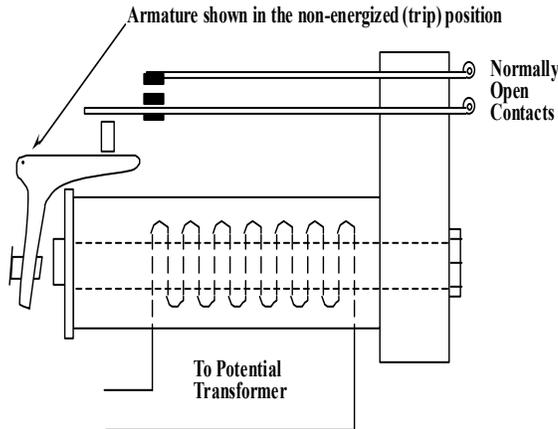
- De nombreuses charges, en particulier les moteurs, sont susceptibles d'être en sous-tension. Lorsque la tension appliquée aux bornes d'un moteur diminue, ce moteur tente de fournir le même couple pour une charge donnée et tire plus de courant pour y arriver. Cela entraîne une surchauffe des enroulements du moteur, ce qui détériore l'isolant et raccourcit la vie utile de ce moteur.
- Ce type de protection présente un autre avantage : il empêche le redémarrage automatique de toutes les charges au même moment lorsque la tension d'un réseau est restaurée. Les charges sont habituellement remises en fonction lentement pour permettre à l'alternateur concerné de stabiliser sa production de puissance avant que d'autres charges soient placées sur cet alternateur (les limites thermiques imposées à la vitesse de mise en fonction et hors-fonction des charges aident de toute façon à faire face au problème). Si les charges sont toutes automatiquement remises en fonction en même temps sur un bus qui vient d'être remis sous tension, la tension appliquée à ce bus risque fort de chuter, et les charges risquent fort d'être isolées de nouveau par des déclenchements de sous-tension. La remise en charge automatique lorsque la tension est rapidement restaurée présente un autre danger : les tensions d'alimentation et de charge sont déphasées, ce qui impose des surintensités et des contraintes mécaniques à la machine.

La protection contre la sous-tension peut être mise en œuvre au moyen d'un relais électromagnétique (la figure 11 en montre un exemple). Ce relais retient l'induit sur la bobine tant que la tension reste supérieure à la valeur désirée (le contacteur normalement ouvert du relais est maintenu fermé).

Si la tension chute trop, la bobine ne peut plus retenir l'induit et le contacteur du relais s'ouvre. Ce type de protection comprend un relais temporisé (habituellement un temporisateur) destiné à l'empêcher de fonctionner lorsque la tension est transitoire (si la tension est

rapidement restaurée, le déclenchement n'a pas lieu). La chute de tension et l'action différée sont choisies de façon que la remise en fonction de la charge ne provoque pas une demande excessive sur le réseau.

Notes



Armature show in the non-energized (Trip) position = Induit montré dans la position hors tension (déclenchement)  
 Normally Open Contacts = Contacts normalement ouverts To Potential Transformer = Vers le transformateur de tension

**Figure 11**

**Relais de protection contre la sous-tension**

**5.7 PROTECTION DES TRANSFORMATEURS**

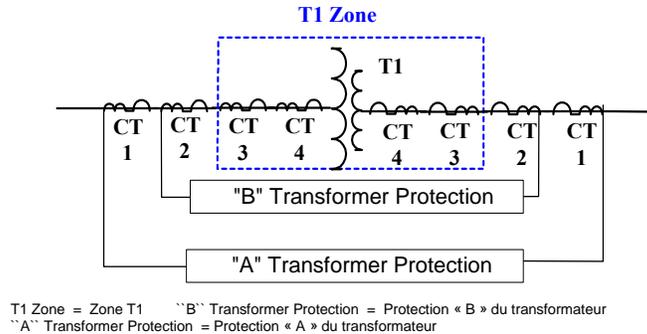
Les transformateurs sont bien sûr un peu plus difficiles à protéger électriquement que les bus de distribution électrique d'une seule pièce.

- L'intensité du courant d'appel de magnétisation est très forte à la mise sous tension des transformateurs.
- Le rapport de l'entrée à la sortie des transformateurs peut être changé au moyen des changeurs de prise hors tension et sous tension.
- Les courants d'entrée et de sortie sont souvent associés à un agencement différent des phases (parfois une transformation Y-Δ a lieu).
- Les transformateurs sont influencés par les excès de flux magnétique (tension et fréquence élevées).
- Les transformateurs sont influencés par la surchauffe.

Pour examiner les protections des transformateurs, nous allons procéder par analogie avec les protections des bus que nous venons de voir. Les transformateurs utilisent des protection redondantes et leurs

Notes

zones de protection (similaires à celles des bus) peuvent être vues à la figure 12 ci-dessous.



**Figure 12**  
**Zone de protection d'un transformateur**

### 5.7.1 Protection des transformateurs contre la surintensité instantanée

La surintensité instantanée vient habituellement d'un défaut provoquant une circulation de courant largement supérieure à la normale. Ces défauts (entre les phases ou entre une phase et la terre) peuvent se produire entre les enroulements ou entre un enroulement et le noyau ou le boîtier. Des dommages catastrophiques peuvent être provoqués par des défauts de courant de forte intensité sans ce type de protection.

Ces types de défauts peuvent être rapidement décelés au moyen d'un circuit de protection différentielle. Des relais électromagnétiques à action rapide peuvent dans ce cas être utilisés pour isoler le transformateur touché.

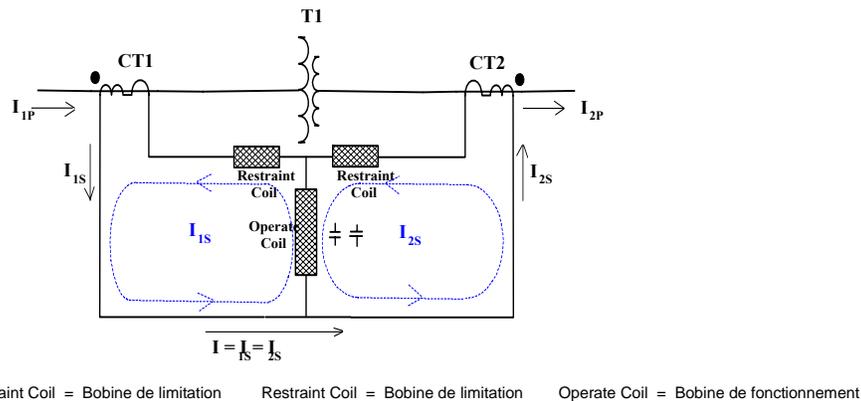
### 5.7.2 Protection différentielle des transformateurs

Comme les bus, les transformateurs sont protégés par des relais différentiels. Les défauts entre enroulements (courts-circuits) et à la terre qui se produisent à l'intérieur des transformateurs peuvent être décelés par ces circuits de protection. Si ces défauts ne sont pas décelés et que le transformateur n'est pas rapidement isolé, le dispositif risque d'être gravement endommagé.

N'oublions pas qu'un relais différentiel est fondamentalement un relais de surintensité instantanée associé à la différence d'intensité entre le courant qui entre et celui qui sort de la zone à protéger. La protection différentielle (figure 13) des transformateurs est fondamentalement la même que celle des bus, mais avec les différences que nous allons

maintenant examiner de plus près. Ces différences sont directement liées aux trois caractéristiques suivantes.

- Un transformateur est doté d'un rapport de spires qui fait que le courant n'est pas le même à l'entrée qu'à la sortie. Les caractéristiques des transformateurs d'intensité ne sont pas exactement établies en fonction de leur rapport de spires, et un certain déséquilibre de courant se produit toujours dans la bobine fonctionnelle du relais différentiel des transformateurs.
- Un transformateur a besoin d'un courant de magnétisation. Une petite quantité de courant circule toujours dans le primaire d'un transformateur, même avec un secondaire en circuit ouvert.
- Un transformateur se caractérise par un courant d'appel. Lorsqu'un transformateur est mis sous tension, il lui faut un certain temps pour que le champ magnétique alterne de façon symétrique dans le noyau. La valeur et la durée de ce courant d'appel dépend du champ résiduel présent dans le noyau et du moment exact du cycle c. a. où le transformateur est remis sous tension. Avec les gros transformateurs, ce courant d'appel peut être initialement dix et même vingt fois plus fort que le courant de fonctionnement à pleine charge et il peut s'écouler plusieurs minutes avant qu'il ne diminue au point d'être négligeable.



**Figure 13**

### Protection différentielle d'un transformateur

Les relais différentiels pour transformateur sont dotés de bobines de limitation, comme l'illustre la figure 13. L'intensité du courant de fonctionnement doit être fixée à une valeur plus élevée (d'un certain pourcentage) que celle du courant circulant dans les bobines de limitation. Les relais différentiels pour transformateur portent pour cette raison le nom de relais différentiels compensés. En nous reportant de nouveau à la figure 13, nous pouvons constater que lors

Notes

de la mise sous tension initiale du transformateur, aucun courant ne circule dans le transformateur d'intensité CT2. Le courant  $I_{1S}$  du secondaire de CT1 circule à travers les bobines de fonctionnement et de commande et empêche toute commande de déclenchement, à moins que l'intensité du courant ne soit très forte. Les bobines de compensation empêchent également les relais de fonctionner lors des changements de prise, pendant lesquels le rapport entre le courant d'entrée et de sortie change continuellement.

Les relais différentiels pour transformateur font usage d'un élément qui n'est pas montré sur le schéma : le deuxième harmonique retardateur.

Lors de la mise sous tension initiale des transformateurs, une saturation magnétique du noyau se produit et la forme d'onde du courant d'appel de forte intensité qui circule à ce moment est déformée. On dit de cette forme d'onde qu'elle comprend un deuxième harmonique fort. Les relais différentiels pour transformateur font usage de ce fait connu pour accentuer l'effet retardateur lorsqu'ils décèlent ce deuxième harmonique. Lorsqu'un transformateur est mis sous tension, cette fonction supplémentaire empêche de l'isoler par déclenchement à cause d'un courant de magnétisation trop fort, mais elle n'augmente pas la durée de la temporisation.

Comme le relais différentiel n'intervient pas en fonction d'un courant de charge ou de défauts se produisant hors des zones protégées, il peut être réglé pour fonctionner avec un courant de faible valeur et donc entrer rapidement en action en cas de problème. Il est inutile de retarder l'intervention du relais et donc un relais de type à action rapide peut être utilisé.

### 5.7.3 Relais à gaz pour transformateurs

Les relais à gaz des transformateurs sont des dispositifs de protection installés en haut de l'intérieur des transformateurs remplis d'huile. Ils ont deux fonctions. Ils décèlent les accumulations lentes de gaz et déclenchent une alarme lorsqu'une quantité donnée de gaz a été recueillie. Ils réagissent également aux brusques changements de pression qui accompagnent toute production rapide de gaz (à cause d'un grave défaut intérieur) et interviennent rapidement pour que le transformateur soit déconnecté.

Un début de défaut ou un défaut en développement provoque habituellement une lente formation de gaz (la formation de gaz sera examinée plus loin dans cette rubrique). Des exemples de début de défaut sont donnés ci-après:

- Circulation de courant à travers des structures de soutien ou d'isolation défectueuses.
- Joints défectueux aux bornes des enroulements provoquant de la surchauffe.
- Problèmes mineurs aux changeurs de prise.
- Défauts au noyau.

Les défauts qui provoquent la formation rapide d'une grande quantité de gaz sont des défauts majeurs. Des exemples de défaut de ce genre sont donnés ci-après :

- Courts-circuits entre les spires des enroulements et entre les enroulements.
- Circuits ouverts provoquant la formation d'arcs dévastateurs.

Si un transformateur n'est pas déconnecté lorsqu'il présente un défaut, de graves dommages peuvent se produire à cause d'une forte pression de gaz et d'huile et à cause de l'effet de la panne électrique.

#### **5.7.4 Gaz produits à cause de défauts**

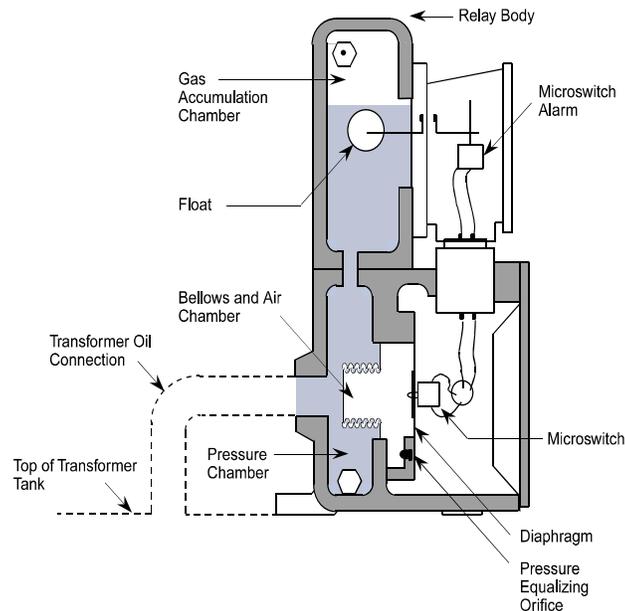
Les défauts électriques de l'intérieur des transformateurs provoquent la production de gaz ionisés. Un important volume de gaz est souvent produit dans les phases initiales des défauts causés par la dégradation de l'huile. Les gaz produits montent dans l'huile et atteignent le haut de la cuve du transformateur où ils sont recueillis par le relais à gaz. Une fois qu'un volume de gaz suffisant s'est accumulé, une alarme est déclenchée par des contacts de l'intérieur du relais à gaz.

Si une alarme est déclenchée par un relais à gaz, il est nécessaire de prélever un échantillon du gaz produit et de l'analyser. Cette analyse et les informations sur la vitesse d'accumulation du gaz permettent de déterminer la suite à donner. Si le défaut semble se développer, le transformateur doit être mis hors service. Si aucune intervention n'a lieu après le déclenchement de cette alarme précoce, de graves dommages peuvent se produire à cause de la progression du défaut.

### Fonctionnement des relais à gaz pour transformateur

Un relais à gaz pour transformateur normal comprend deux chambres ayant chacune une fonction distincte. La coupe simplifiée d'un relais à gaz est montrée à la figure 14.

Le relais est constitué d'une chambre d'accumulation de gaz directement montée sur une chambre de pression. La chambre d'accumulation recueille lentement le gaz produit. Un flotteur placé dans cette chambre en partie remplie d'huile se déplace à mesure que le volume de gaz augmente. Ce flotteur commande un microcontact d'alarme lorsque la quantité de gaz recueilli atteint un volume établi à l'avance. Un indicateur couplé au flotteur donne par ailleurs un moyen de surveiller la vitesse de production du gaz.



Gas Accumulation Chamber = Chambre d'accumulation du gaz    Float = Flotteur    Bellows and Air Chamber = Soufflet et chambre d'air  
Transformer Oil Connection = Connexion d'huile du transformateur    Top of Transformer Tank = Haut du réservoir du transformateur  
Pressure Chamber = Chambre de pression    Microswitch Alarm = Microcontact d'alarme    Microswitch = Microcontact  
Diaphragm = Diaphragme    Pressure Equalizing Orifice = Orifice d'égalisation de pression

**Figure 14**

### Relais à gaz pour transformateur représentatif

La deuxième chambre (la chambre de pression) est directement reliée au circuit d'huile du transformateur. Elle est verticalement raccordée à la chambre d'accumulation pour offrir un trajet au gaz qui s'élève. Un soufflet pneumatique placé dans la chambre de pression est utilisé comme détecteur de changement de pression. Toute augmentation brusque de la pression d'huile comprime le soufflet et force l'air qui s'y trouve à déplacer un diaphragme. Le mouvement du diaphragme est transmis à un microcontact qui amorce le déclenchement de l'isolation du transformateur.

Certaines hausses de pression instantanées, comme celles des coups de béliers donnés par les pompes de circulation d'huile, sont normales et les relais doivent être réglés pour ne pas en tenir compte. En pratique, il est nécessaire de s'assurer que le relais est réglé pour n'intervenir qu'à environ 7 KPa (1 psi) de plus que la pression de crête des pompes de circulation d'huile.

Les augmentations de pression dangereuses causées par des défauts majeurs sont dissipées par une soupape de sûreté située en haut de la cuve du transformateur. Cette soupape est constituée d'un diaphragme étanche placé dans un tuyau dont l'extrémité est dirigée vers un endroit éloigné du transformateur. Si une augmentation trop forte de la pression se produit, le diaphragme cède et les gaz et l'huile chaude s'échappent en faisant courir un risque d'incendie.

### 5.7.5 Surcharge thermique des transformateurs

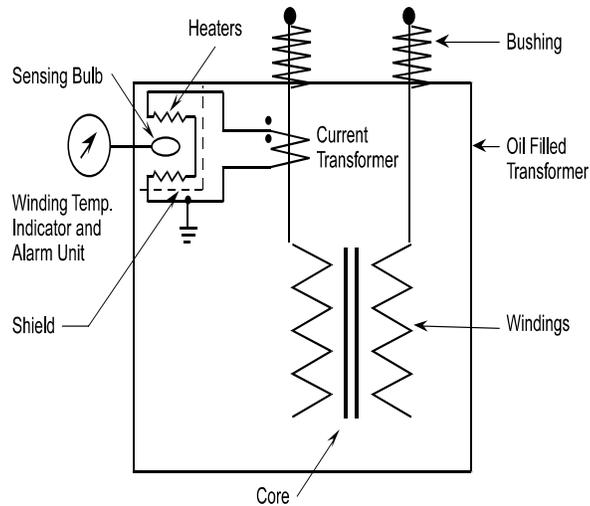
Dans les transformateurs de puissance, la chaleur est produite par la circulation du courant dans les enroulements primaires et secondaires et aux connexions intérieures, à causes des pertes  $I^2R$ . Si les charges sont faibles, la quantité de chaleur produite est faible. Mais à mesure que les charges augmentent, la quantité de chaleur produite devient importante. À pleine charge, les enroulements fonctionnent à leur température de calcul ou presque. La plaque signalétique d'un transformateur indique la température maximale de fonctionnement permise pour les enroulements et les connexions et indique la méthode de refroidissement employée pour supprimer la chaleur produite en charge. La température maximale de fonctionnement normalement attribuée aux gros transformateurs de puissance est d'environ 105 °C, avec pour hypothèse une température ambiante maximale de 40 °C.

La température est mesurée et indiquée par un dispositif intégrant une sonde et un dispositif d'alarme à enroulements. La figure 15 illustre l'agencement d'un tel dispositif. Le but de ce dispositif est de donner une image thermique du point le plus chaud de l'intérieur du transformateur. Le bulbe sensible du dispositif est placé dans un boîtier situé près du haut de la cuve du transformateur. Ce boîtier est immergé dans l'huile chaude du transformateur. Une bobine chauffante alimentée par un transformateur d'intensité sensible à la charge est placée autour du bulbe sensible pour produire une augmentation locale de température à une valeur supérieure à la température générale de l'huile. L'action de la bobine chauffante couplée à la chaleur produite par l'huile entourant le bulbe sensible permet à la sonde de simuler l'évolution des points chauds associés à la température des enroulements.

## Notes

Le fonctionnement d'un transformateur à une tension de seulement 10 % supérieure à la tension nominale peut provoquer une importante augmentation de la température, ce qui peut déclencher une alarme de température excessive. Toute surtension peut provoquer des problèmes de changement de prise ou de régulation de tension. Tout fonctionnement à température excessive de ce genre peut physiquement endommager l'isolant et diminuer sa durée utile et donc diminuer la durée utile du transformateur.

Une augmentation de température de 8 à 10 % supérieure à la valeur nominale de fonctionnement peut, si elle persiste, diviser la durée utile d'un transformateur par deux.



Sensing Bulb = Bulbe sensible    Winding Temp. Indicator and Alarm Unit = Indicateur de température d'enroulements et dispositif d'alarme  
 Shield = Boîtier    Heaters = Corps chauffants    Current Transformer = Transformateur d'intensité  
 Core = Noyau    Bushing = Fourreau    Oil Filled Transformer = Transformateur rempli d'huile    Windings = Enroulements

**Figure 15**

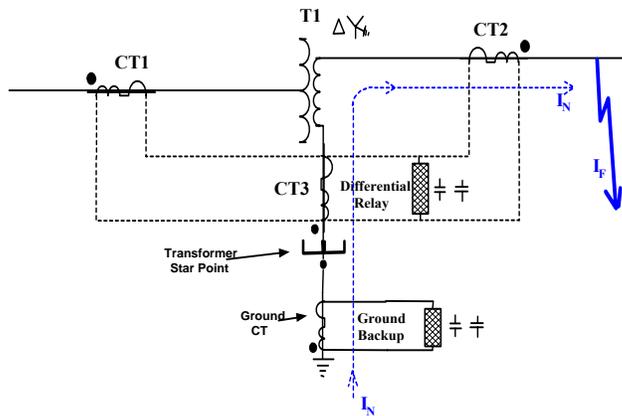
**Sonde de température d'enroulements de transformateur**

**5.7.6 Protection des transformateurs contre les défauts à la terre**

La plupart des transformateurs de puissance sont connectés en étoile-étoile (Y-Y) ou en étoile-triangle (Y- $\Delta$ ). Si un transformateur est connecté en étoile avec mise à la terre, comme celui de la figure 16, il représente une source de courant tellurique ( $I_N$ ) pour le réseau électrique. Un courant tellurique peut se produire à n'importe quel endroit du réseau à cause d'un défaut entre phase et terre, d'une forte résistance ou d'une rupture de phase. En temps normal, le défaut ou le problème à l'origine d'un courant tellurique est vite supprimé par les protections propres à l'appareil concerné (bus, moteur, alimentateur, etc.). Si le problème persiste, il provoque une surintensité et un déséquilibre de charge au transformateur alimentant l'élément où le problème s'est déclaré. Cela crée des contraintes supplémentaires et

provoque la surchauffe du noyau et des enroulements. La protection différentielle du transformateur ne détecte pas le courant tellurique venant du neutre et du bus. Nous pouvons voir à la figure 16 que le courant passe par CT3 et sort par CT2, et qu'il circule donc hors de la zone différentielle.

Pour résoudre ce problème, les transformateurs en étoile avec mise à la terre sont dotés d'un transformateur d'intensité extérieur connecté entre le centre de l'étoile et la terre. Tout courant passant par ce transformateur d'intensité passe par le relais de secours de surintensité à action différée, qui ouvre les disjoncteurs d'alimentation des transformateurs.



Transformer Star Point = Point de raccordement de l'étoile du transformateur      Ground CT = Transformateur d'intensité de terre  
 Differential Relay = Relais différentiel      Ground Backup = Protection de secours contre les défauts à la terre  
 CT1 = Transformateur d'intensité 1      CT2 = Transformateur d'intensité 2      CT3 = Transformateur d'intensité 3

**Figure 16**

### Protection des enroulement en étoile contre les défauts à la terre

## 5.8 PROTECTION DES MOTEURS

La protection des moteurs change beaucoup d'un moteur à l'autre. Cela dépend de la taille du moteur et de la tension qu'il utilise. Nous ne verrons par conséquent dans cette rubrique que les protections les plus courantes.

### 5.8.1 Protection des moteurs contre la surintensité instantanée

La surintensité instantanée est habituellement provoquée par un défaut (entre phases ou entre une phase et la terre) au cours duquel la circulation du courant est largement supérieure à la normale. Sans ce type de protection, des dommages peuvent se produire à cause de la

Notes

surchauffe des enroulements et à cause des brûlures associées aux défauts mettant en cause de fortes intensités.

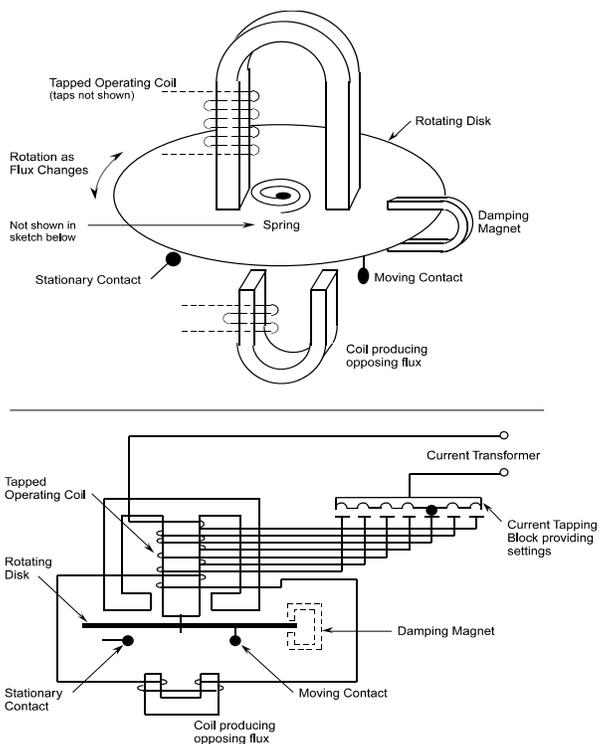
Ce type de défaut peut être décelé rapidement par une protection différentielle utilisant des transformateurs d'intensité à équilibrage de noyau, comme nous le verrons plus loin, et peut être éliminé avant que de graves dommages ne se produisent. Dans ce cas, des relais électromagnétiques à action rapide sont utilisés pour isoler le moteur touché.

### **5.8.2 Protection des moteurs contre la surintensité prolongée**

Si un moteur électrique fonctionne continuellement à une intensité légèrement supérieure à l'intensité nominale, il peut subir des dommages thermiques. L'isolant peut se dégrader et finir par produire à l'intérieur du moteur des défauts pouvant provoquer une diminution de sa durée utile. Habituellement, les moteurs électriques sont dotés d'une plaque signalétique indiquant un facteur de service nominal. Ce facteur représente la limite de charge permise en continu sans risquer d'endommager le moteur. Par exemple, un moteur électrique normal est destiné à supporter une surcharge continue d'environ 15 % sans être endommagé (son facteur de service est donc égal à 115 %). S'il fonctionne continuellement à cette valeur ou au-dessus, il risque de subir des dommages thermiques. Pour que ce moteur soit protégé, il est indispensable de s'assurer que cette situation ne se produise pas. Le déclenchement de la mise hors tension du moteur doit donc avoir lieu avant que la limite de surcharge (facteur de service) ne soit atteinte.

Le relais le plus couramment utilisé dans ce but est le relais à disque d'induction. Avec ce relais (figure 17), le courant circule dans deux bobines pour produire des flux magnétiques opposés, ce qui impose un couple au disque. Plus l'intensité du courant du moteur augmente, plus ce couple augmente.

Si le couple du disque dépasse celui du ressort, le disque se met à tourner. Si le contact mobile touche le contact fixe, la mise hors tension est déclenchée.



Tapped Operating Coil (taps not show) = Bobine de fonctionnement à prises (prises non montrées)  
 Rotation as Flux Changes = Rotation en fonction des changements de flux  
 Not Show in sketch below = Non montré dans le croquis ci-dessous    Stationary Contact = Contact fixe    Spring = Ressort  
 Rotating Disk = Disque rotatif    Damping Magnet = Aimant d'amortissement    Moving Contact = Contact mobile  
 Coil Producing opposing flux = Bobine de production de flux opposé    Tapped Operating Coil = Bobine de fonctionnement à prises  
 Rotating Disk = Disque rotatif    Stationary Contact = Contact fixe  
 Coil Producing opposing flux = Bobine de production de flux opposé    Moving Contact = Contact mobile  
 Damping Magnet = Aimant d'amortissement    Current Tapping Block providing settings = Bloc de prises pour réglage  
 Current Transformer = Transformateur d'intensité

**Figure 17**  
**Relais à disque d'induction**

Une sélection de prise et un réglage de la temporisation peuvent permettre de changer la durée du retard du relais. Le principal avantage du relais à disque d'induction temporisé sur le relais d'intensité vient du fait que la vitesse de rotation est proportionnelle à l'intensité du courant du moteur. Ainsi, en cas de forte surintensité, le déclenchement de l'ouverture du disjoncteur du moteur est instantané, tandis que toute intensité légèrement supérieure à la valeur nominale n'entraîne de déclenchement qu'après plusieurs secondes (ou plusieurs minutes).

### 5.8.3 Surcharge thermique

Le relais de surcharge thermique est un autre type de relais couramment employé avec les protections temporisées contre les surcharges. Avec ce type de relais, le courant du moteur ou une fraction de ce courant (par l'intermédiaire d'un transformateur d'intensité) passe par un corps chauffant monté en série sur

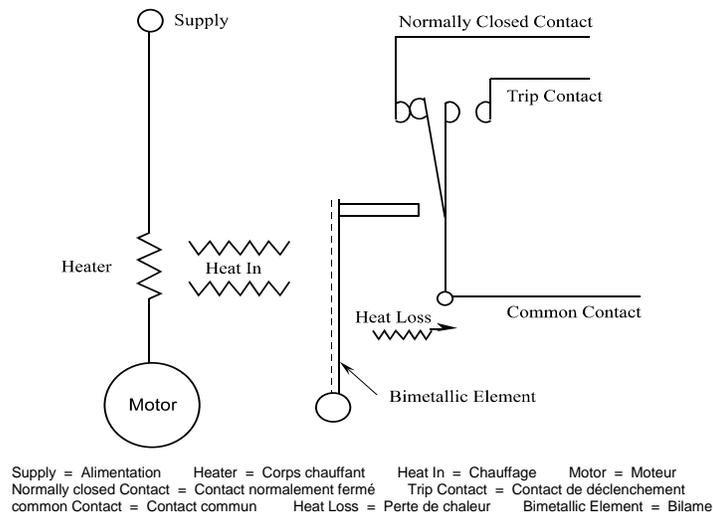
## Notes

l'alimentation du moteur. La figure 18 illustre un relais de surcharge thermique simplifié.

Le corps chauffant (chauffé par l'action  $I^2R$ ) est utilisé pour chauffer un bilame qui commande le déplacement d'un contact de relais. Un bilame est constitué de deux matériaux à taux de dilatation différent collés l'un à l'autre. Lorsque ces deux matériaux sont chauffés, l'un se dilate plus que l'autre et l'ensemble se courbe.

Si l'intensité est normale ou si une surcharge se produit pendant un court instant, le bilame ne se courbe pas assez pour que le contact de relais change de position.

Une intensité excessive augmente la chaleur du bilame, se qui entraîne l'ouverture et/ou la fermeture du ou des contacteurs de relais et le déclenchement de la mise hors tension du moteur.



**Figure 18**

### Relais de surcharge thermique

La réaction d'un relais de surcharge thermique est normalement différée, car le corps chauffant et le bilame ont besoin de temps pour chauffer. Ce relais doit être adapté aux caractéristiques thermoélectriques du moteur en usant de précautions, sinon ce moteur risque d'être endommagé lors d'un démarrage à rotor bloqué.

Ce type de relais peut être utilisé comme protection directe contre le courant excessif produit à travers les moteurs par des défauts électriques ou par une surcharge des moteurs. Par ailleurs, ce type de relais est souvent utilisé en association avec une protection à action différée contre la surintensité. Des relais de surcharge thermique utilisant des corps chauffants montés sur conducteur et des bilames

déclenche une alarme en cas de surcharge continue. Ce dispositif donne au technicien la possibilité de corriger le problème avant le déclenchement de l'alarme.

Comme nous l'avons vu, la surcharge thermique peut être une cause de déclenchement pendant les démarrages répétitifs ou les surcharges des moteurs. Ce genre de déclenchement est suivi d'un verrouillage empêchant la fermeture du contacteur du moteur. Après ce verrouillage, le moteur ne peut être remis en marche que par un réenclenchement manuel. Le technicien ou le surveillant doit s'assurer physiquement que le moteur a bien eu le temps de se refroidir et que la cause de la surcharge a bien été supprimée. S'il est persuadé que le moteur n'est concerné par aucun défaut permanent, il peut réenclencher le relais de ce moteur.

Notons que si un déclenchement pour surintensité instantanée se produit, aucune tentative ne doit être effectuée pour fermer le contacteur du moteur. Ce genre de déclenchement ne se produit qu'en cas de défaut au moteur ou au câble d'alimentation et doit être suivi d'une réparation avant toute tentative de réenclenchement du relais.

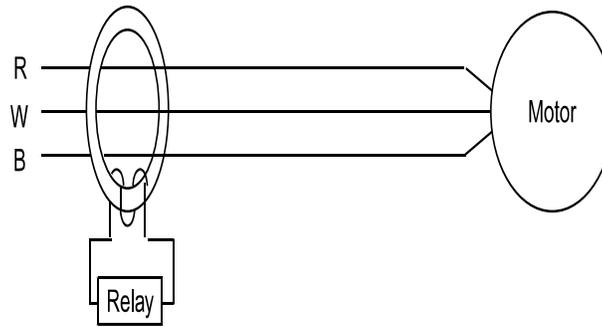
#### **5.8.4 Protection des moteurs contre les défauts à la terre**

Comme dans le cas de la surintensité instantanée, il est extrêmement important que les défauts à la terre soient très vite décelés et contrôlés pour empêcher le matériel d'être endommagé. Une matière isolante détériorée par la chaleur (à cause d'un fonctionnement prolongé en surcharge), fragilisée (à cause du vieillissement), humide ou mécaniquement détériorée peut être la cause d'un défaut à la terre.

Les dispositifs de protection contre les défauts à la terre utilisent la protection différentielle pour déceler les défauts et isoler les appareils touchés. Avec les moteurs, la méthode courante consiste à utiliser un transformateur d'intensité à équilibrage de noyau de la façon illustrée par la figure 19. Le signal de sortie de ce transformateur est la différence ou le déséquilibre du courant entre les trois phases. Si aucun défaut à la terre n'existe, aucun déséquilibre de courant n'existe, et donc aucun courant ne circule dans le circuit de protection.

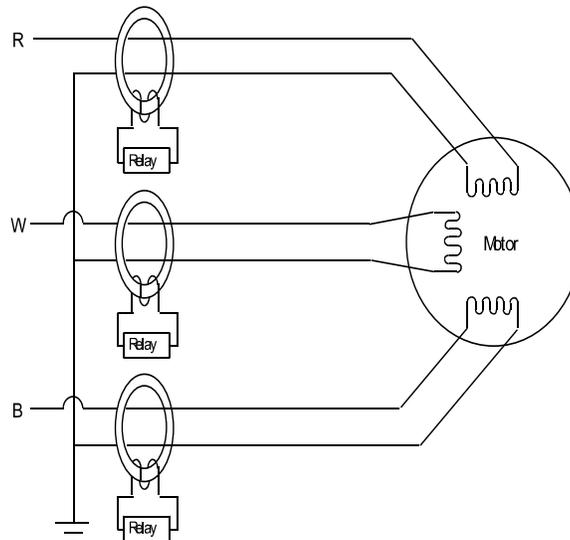
Si un défaut à la terre se développe, un déséquilibre du courant se produit et un courant circule dans le circuit de protection, ce qui déclenche l'ouverture du disjoncteur d'alimentation. La figure 20 illustre un dispositif de protection de ce genre, avec chaque enroulement du moteur protégé individuellement (ce dispositif n'est pas normalement utilisé avec les petits moteurs, mais il peut l'être avec la protection des très gros moteurs).

Notes



Relay = Relais    Motor = Moteur

**Figure 19**  
**Protection de trois phases à la fois contre les défauts à la terre**



Relay = Relais    Relay = Relais    Relay = Relais    Motor = Moteur

**Figure 20**  
**Protection individuelle des phases contre les défauts à la terre**

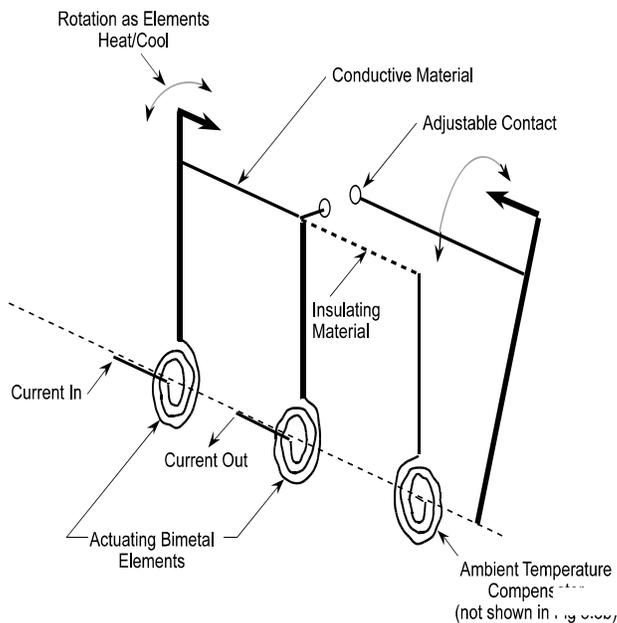
### 5.8.5 Protection des moteurs contre le calage

Le calage (ou le blocage) du rotor d'un moteur peut être défini comme la mise sous tension des circuits de ce moteur sans que son rotor ne tourne. Les moteurs ont particulièrement tendance à surchauffer pendant le démarrage à cause de la forte intensité associée à ce moment à un faible débit d'air de refroidissement (dû à la faible vitesse du moteur et donc au peu d'air fourni par les ventilateurs). C'est d'ailleurs pourquoi il n'est pas permis de tenter de démarrer certains gros moteurs plus d'un certain nombre de fois sans un certain temps de refroidissement. Le calage d'un moteur peut cependant se produire pendant une période de fonctionnement normale. Une panne

mécanique (palier grippé, surcharge, corps étranger dans une pompe, etc.) peut par exemple provoquer le calage d'un moteur. La perte d'une phase électrique quand un moteur ne tourne pas ou lorsqu'il est surchargé peut également provoquer un calage de ce moteur.

La durée normale de démarrage d'un moteur est inférieure à dix secondes. Si le démarrage ne dure pas plus longtemps, le moteur ne risque pas d'être endommagé par la surchauffe venant d'une surintensité. Un moteur en fonction peut habituellement caler pendant vingt secondes et même plus sans que son isolant ne soit trop détérioré.

Les relais de calage sont utilisés pour protéger les moteurs au démarrage au lieu des relais thermiques standard, dont l'action est trop retardée. Le relais de calage permet à un moteur de tirer pendant un court instant le courant nécessaire à son démarrage (ce courant est plusieurs fois supérieur au courant de charge normale), mais déclenche la mise hors fonction de ce moteur si un courant de forte intensité est tiré pendant trop de temps. Le relais de calage fonctionne sur le principe du relais de surcharge thermique, mais en réagissant plus vite que le relais thermique standard.



Rotation as elements Heat/Cool = Rotation en fonction du réchauffement ou du refroidissement  
 Conductive Material = Matériau conducteur    Adjustable Contact = Contact réglable    Insulating Material = Matériel isolant  
 Current In = Courant d'arrivée    Current Out = Courant de sortie    Actuating Bimetal Elements = Bilame de commande  
 Ambient temperature Compensator (not shown) = Compensateur de température ambiante (non montré)

**Figure 21**  
**Relais de calage**

## Notes

La représentation schématique d'un relais de calage est montrée à la figure 21 pour référence. Le passage direct d'une partie du courant du moteur à travers les bilames de ce relais produit un chauffage immédiat, de la même manière que dans les enroulements de ce moteur.

Ce type de relais n'entre habituellement en fonction que si l'intensité du courant du moteur est supérieure à 3 fois celle du courant de fonctionnement normal et il est mis hors fonction si l'intensité du courant du moteur est inférieure à 2 fois celle du courant de fonctionnement normal. Cette commutation est effectuée grâce à un contact à relais supplémentaire. Si le moteur fonctionne normalement, le courant de ce dispositif passe à travers la résistance et contourne le bilame.

### 5.8.6 Protection des moteurs contre l'excès de flux magnétique

Comme nous l'avons vu avec le module sur la théorie du moteur électrique, le courant tiré par un moteur est à peu près proportionnel au flux magnétique nécessaire pour faire tourner son rotor. Le flux traversant le noyau est par ailleurs à peu près proportionnel au carré de la vitesse de glissement.

$$I \propto f \propto s^2$$

Évidemment, l'excès de flux magnétique est le plus important lors du calage ou du blocage du rotor, c'est-à-dire lorsque le glissement est maximal. Le relais de calage vu précédemment protège contre cet excès. Mais il existe un autre cas où le moteur peut subir un excès de flux magnétique.

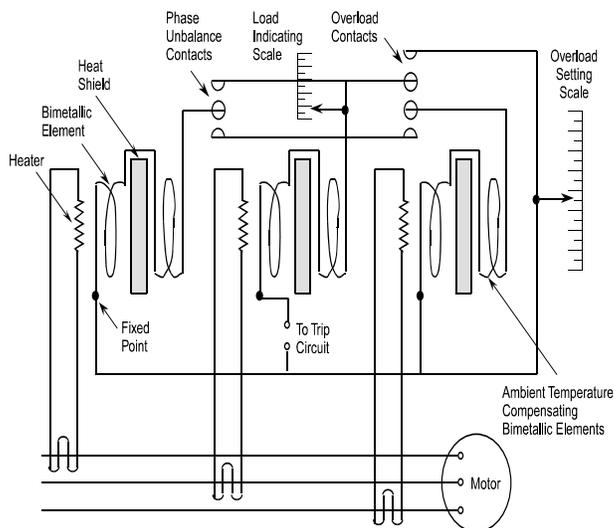
Si l'une des trois phases de l'alimentation rencontre une forte résistance ou est en circuit ouvert (à cause d'un fusible grillé, d'une connexion desserrée, etc.), le flux magnétique se déséquilibre et le rotor se met à glisser encore plus par rapport à la vitesse du champ du stator. La vitesse de rotation du rotor (c.-à-d. de l'arbre) diminue tandis que le courant de l'alimentation augmente et provoque une surchauffe des enroulements et du noyau en fer. Une importante vibration provoquée par un déséquilibre des forces magnétiques peut par ailleurs endommager les enroulements et les paliers du moteur.

Cet état de fonctionnement avec une phase ouverte porte bizarrement le nom de fonctionnement en monophasé, bien qu'en réalité deux phases sont encore utilisées.

Si le moteur continue de fonctionner avec une ligne ouverte, l'intensité du courant tiré sur les deux lignes en bon état devient plus de deux fois supérieure à celle du courant normal pour une charge donnée. Cela provoque une surchauffe rapide et inégale dans le moteur ainsi qu'une détérioration de l'isolant et des enroulements, une diminution de la durée utile du moteur et une déformation thermique.

Si le couple demandé par la charge dépasse celui réellement produit, le moteur cale. Il tire alors un courant égal au courant nominal à rotor bloqué, dont l'intensité est en moyenne 3 à 6 fois supérieure à celle du courant à pleine charge. Cela amène une surchauffe des enroulements et cause une détérioration de l'isolant. Si le défaut (circuit ouvert) s'est produit avant que le démarrage du moteur ne soit tenté, il est probable que ce moteur refusera de se mettre à tourner.

Avec ce dispositif, la construction du relais de déséquilibre de phases utilisé comme moyen de protection est similaire à celle du relais de calage, mais son point de déclenchement est établi à 20 % du courant à pleine charge. Le fonctionnement du relais est représenté schématiquement aux figure 22a et 22b (pour référence seulement). Si le courant d'une seule phase d'alimentation du moteur est coupé, le corps chauffant refroidit. Le bilame se déforme et entraîne la fermeture du contacteur de déséquilibre, ce qui déclenche l'arrêt du moteur. Ce relais protège également contre la surcharge thermique grâce aux corps chauffants pouvant fermer le contacteur de déclenchement en cas de surcharge. Nous examinerons par ailleurs un bilame de compensation destiné à compenser les changements de température ambiante pour empêcher tout déclenchement inutile.

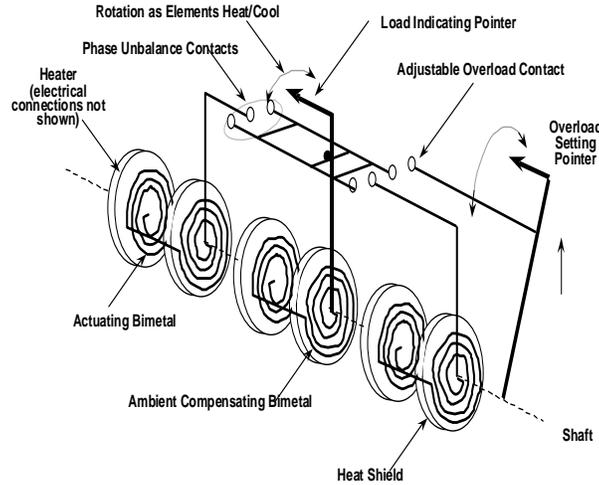


Notes

Heater = Corps chauffant    Bimetallic Element = Bilame    Heat Shield = Écran thermique  
 Phase Unbalance Contacts = Contacts de déséquilibre des phases    Load Indicating Scale = Échelle d'indication de charge  
 Overload Contacts = Contact de surcharge    Overload Setting Scale = Échelle de réglage de la surcharge  
 Fixed Point = Point fixe    To Trip Circuit = Vers le circuit de déclenchement  
 Ambient Temperature Compensating Bimetallic Elements = Bilame de compensation de température ambiante    Motor = Moteur

**Figure 22a**

**Protection contre les déséquilibres de phase et contre les surcharges**



Rotation as Element Heat/Cool = Rotation en fonction du réchauffement ou du refroidissement de l'élément  
 Phase Unbalance Contacts = Contacts de déséquilibre des phases  
 Heater (electrical connections not show) = Corps chauffant (connexions électriques non montrées)  
 Actuating Bimetal = Bilame de commande    Ambient Compensating Bimetal = Bilame de compensation de température ambiante  
 Heat Shield = Écran thermique    Load Indicating Pointer = Indicateur de charge  
 Adjustable Overload Contact = Contact de surcharge réglable    Overload setting Pointer = Indicateur de surcharge    Shaft = Axe

**Figure 22b**

**Protection contre les déséquilibres de phase et contre les surcharges**

**5.9 PROTECTION DES ALTERNATEURS**

Les dispositifs de protection des alternateurs se caractérisent par des similarités et des chevauchements par rapport à ceux des moteurs électriques. Cela est avantageux car les alternateurs ne sont pas tous protégés au moyen de tous les dispositifs indiqués dans cette rubrique. Les dispositifs de protection des alternateurs sont en fait très nombreux, mais seuls les plus courants sont examinés ici.

**5.9.1 Classes de déclenchement de protection des alternateurs à turbine**

Les déclenchements de protection des alternateurs sont répartis en différentes classes établies en fonction de différentes réactions, selon les causes et les possibilités de dommage. Les quatre classes de déclenchement (A, B, C et D) sont examinées ci-dessous.

Classe A. Les déclenchements de classe A sont destinés à déconnecter l'alternateur du réseau de distribution électrique et à arrêter le groupe

turbine-alternateur (c.-à-d. à mettre hors fonction la turbine et à ouvrir le relais d'induction). Ces déclenchements sont habituellement provoqués par la protection électrique de l'alternateur, par la protection électrique du transformateur principal, par un défaut à la terre ou par tout élément ayant une influence directe sur la sécurité liée à la production électrique de l'alternateur.

Classe B. Les déclenchements de classe B sont destinés à déconnecter l'alternateur du réseau de distribution électrique, mais en laissant le groupe turbine-alternateur fournir la charge de l'alternateur. Ces déclenchements sont habituellement provoqués par des défauts du réseau de distribution électrique, ce qui provoquent donc la suppression de cette charge.

Classe C. Les déclenchements de classe C sont provoqués par une surexcitation de l'alternateur et ne se produisent que si l'alternateur n'est pas couplé au réseau de distribution électrique (tout en pouvant continuer à fournir sa charge).

Cette surexcitation est habituellement causée par l'application manuelle d'une excitation excessive ou par l'application du courant d'excitation à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisation (ce que nous reverrons plus loin dans ce module).

Classe D. Les déclenchements de classe D sont destinés à mettre hors fonction la turbine puis l'alternateur s'il a fonctionné comme un moteur. Ces déclenchements sont associés aux problèmes mécaniques subis par le groupe turbine-alternateur.

Chacun de ces types de déclenchement, avec leurs causes et leurs effets exacts, feront l'objet d'une étude plus poussée lors du programme de formation propre à la centrale à laquelle vous êtes rattaché.

### **5.9.2 Surintensité des alternateurs**

Comme nous l'avons vu avec les rubriques précédentes, la surintensité appliquée aux enroulements à cause des surcharges ou des défauts provoque de graves dommages. L'alternateur doit être isolé du réseau électrique et l'excitation de champ doit être supprimée le plus vite possible pour amoindrir le plus possible les dommages.

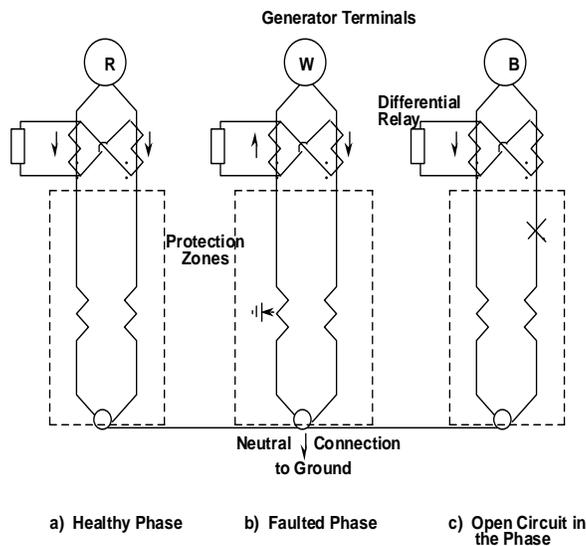
Pendant les démarrages ou les arrêts, le champ peut être accidentellement appliqué alors que la fréquence est inférieure à 60 Hz. Les protections normales peuvent dans ces conditions ne pas fonctionner ou ne pas être assez sensibles. Une protection sensible

contre la surintensité (également appelée surintensité supplémentaire de démarrage) est habituellement utilisée au cas où la fréquence est d'environ 56 Hz ou moins.

### 5.9.3 Protection différentielle des alternateurs

La protection différentielle peut servir à détecter des défauts dans les enroulements des alternateurs, comme les défauts à la terre, les courts-circuits et les circuits ouverts. Ces défauts peuvent être causés par un isolant endommagé par le vieillissement, de la surchauffe, une surtension, un isolant humide ou des dommages mécaniques.

Des exemples d'application de protection différentielles sont illustrés à la figure 23 sous la forme d'un agencement pour alternateur doté de plusieurs enroulements - deux par phase (raison pour laquelle ce type de protection porte également le nom de protection à enroulements auxiliaires).



Generator terminals = Bornes de l'alternateur      Protection zones = Zones de protection      Differential Relay = Relais différentiel  
 Neutral Connection to Ground = Connexion du neutre à la terre      Healthy Phase = Phase en bon état  
 Faulted Phase = Phase en défaut      Open Circuit in the Phase = Phase avec circuit ouvert

**Figure 23**

### Protection différentielle à enroulements auxiliaires

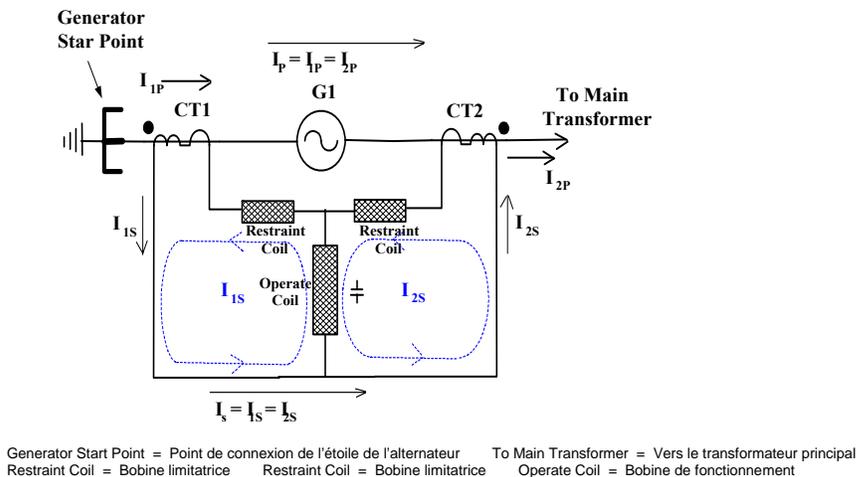
Dans la partie a) de la figure 23, le courant passant par les deux enroulements est équilibré et donc le courant passant par le circuit de protection l'est aussi. Le relais différentiel n'est donc pas déclenché dans ce cas.

Dans la partie b) de la figure 23, un défaut à la terre s'est produit à un des enroulements. Le sens de circulation du courant de défaut indique un déséquilibre du courant. Cela provoque un déséquilibre du courant

dans le circuit de protection et le relais différentiel est déclenché. Dans le même ordre d'idée, un court-circuit qui se produirait dans un des enroulements provoquerait un déséquilibre du courant dans les enroulements de protection, ce qui déclencherait le relais différentiel.

Dans la partie c) de la figure 23, un circuit ouvert s'est formé, empêchant le courant de circuler dans un des enroulements. Là encore, le déséquilibre du courant provoque le déclenchement du relais différentiel.

La protection différentielle (figure 24) des alternateurs dotés d'un seul enroulement par phase est similaire à celle des transformateurs vue précédemment. Cet agencement permet de déclencher une mise hors fonction très rapide de l'alternateur, du relais d'induction et de la turbine (déclenchement de classe A). Il permet de minimiser les dommages causés par la surchauffe ou par la formation d'arcs si l'isolant est déjà endommagé.



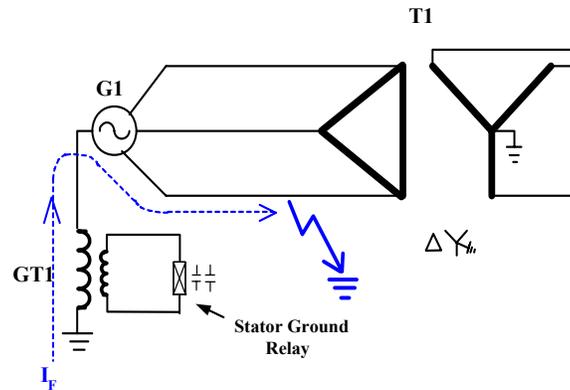
**Figure 24**

### Protection différentielle d'un alternateur

#### 5.9.4 Protection des alternateurs contre les défauts à la terre

Les alternateurs sont habituellement connectés aux enroulements en triangle des transformateurs principaux à câblage en triangle-étoile. Ce genre de connexion permet à l'alternateur de produire un courant à trois phases presque équilibrées, même si la charge est déséquilibrée au primaire du transformateur principal. Cela permet d'atténuer les contraintes, les vibrations et la surchauffe des enroulements du stator lorsque le réseau est déséquilibré ou a un défaut. Cependant, si l'alternateur est connecté sur des enroulements câblés en triangle, une protection indépendante doit être utilisée contre les défauts au stator. Toute résistance à la terre tire électriquement le triangle vers la terre,

ce qui peut passer inaperçu pour le relais différentiel. Le relais de terre du stator déclenche la mise hors fonction de l'alternateur avant que de graves dommages ne se produisent. Ce relais est souvent doté d'un dispositif de commande de niveau d'alarme permettant de régler le problème avant que ne soient réunies les conditions d'un déclenchement.



GT1 = Transformateur de terre Stator Ground Relay = Relais de terre du stator

**Figure 25**

### Protection à la terre du stator d'un alternateur

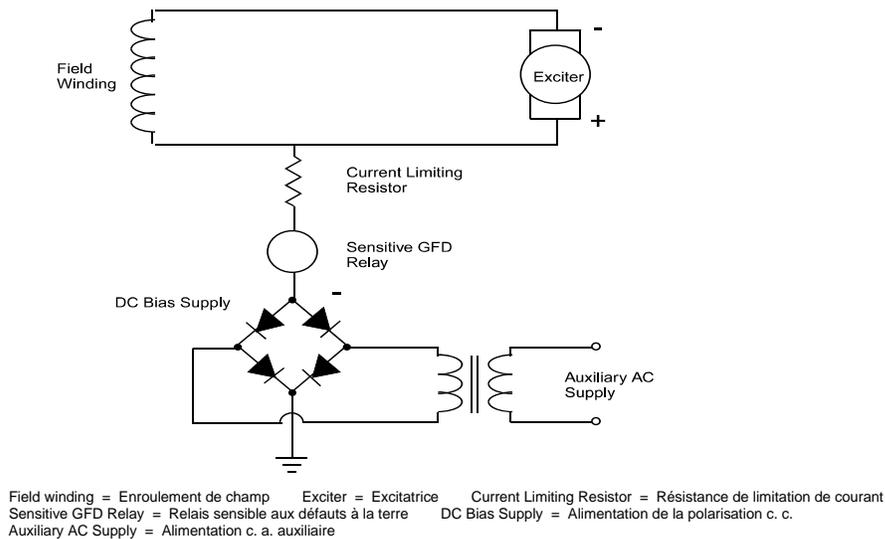
La figure 25 illustre un circuit de protection à la terre avec connexion du neutre de l'alternateur par l'intermédiaire d'un transformateur de mise à la terre du neutre. Dans certains endroits, une résistance de terre est utilisée avec un transformateur d'intensité.

Les causes possibles de défaut à la terre sont l'isolant endommagé par le vieillissement, la surchauffe ou la surtension, l'isolant humide et les dommages mécaniques. Si les défauts ne font pas l'objet d'un traitement adéquat lorsqu'ils se produisent, la surchauffe causée par la surintensité risque d'endommager l'isolant ou des dommages dus à la formation d'arcs risquent de se produire si l'isolant a déjà été endommagé.

#### 5.9.5 Protection à la terre du rotor

Dans les alternateurs, les enroulements du rotor produisent le champ magnétique aux pôles. Avec les alternateurs à quatre pôles (60 Hz et 1 800 tr/min, habituellement), un défaut à la terre se produisant seul dans le rotor n'a en général pas d'effets nuisibles. Mais si un deuxième défaut à la terre se produit, les conséquences peuvent être désastreuses. Un tel défaut peut provoquer le contournement d'une partie de l'enroulement du rotor, ce qui risque de déformer la forme du flux qui sans cela serait équilibrée. Une vibration excessive et même un contact entre le rotor et le stator peuvent alors se produire.

Un moyen de détecter le premier défaut à la terre offre une protection contre les effets d'un deuxième défaut à la terre au rotor. La figure 26 illustre un circuit de détection de défaut à la terre simplifié. Ce circuit est connecté au positif de la source d'excitation.



**Figure 26**

**Circuit de détection de défaut à la terre au rotor**

Un défaut à la terre se produisant à n'importe quel endroit du circuit d'excitation ou de l'enroulement du rotor entraîne la circulation d'un courant par la résistance chutrice (la tension produite à l'endroit du défaut s'ajoute à la tension de polarisation et entraîne la circulation d'un courant dans le circuit de défaut à la terre), par le relais du circuit de défaut à la terre, par la mise à la terre de l'alimentation de la polarisation et par l'endroit où s'est produit le défaut. La circulation du courant par le relais du circuit de défaut à la terre déclenche une alarme.

**5.9.6 Protection des alternateurs contre le déséquilibre de phase**

Si un alternateur subit un déséquilibre à cause d'une charge mal répartie ou d'un défaut, ce déséquilibre se manifeste par un courant c. a. dans le champ du rotor. Avec les alternateurs à quatre pôles tournant à 1 800 tr/min utilisés dans les centrales nucléaires, la fréquence de ce courant est deux fois supérieure à celle du réseau électrique, soit 120 Hz. Si l'alternateur continue de fonctionner avec un déséquilibre de phase, le rotor surchauffe rapidement à cause du courant induit additionnel (ce courant entraîne également un chauffage des autres éléments intérieurs de l'alternateur). Cela provoque un chauffage rapide et inégal à l'intérieur de l'alternateur, suivi d'une

Notes

détérioration de l'isolant et des enroulements (et donc d'une diminution de la durée utile de la machine) et une déformation thermique peut se produire.

Par ailleurs, les forces magnétiques déséquilibrées apparaissant dans l'alternateur à cause de ce courant provoquent une vibration excessive. Cette vibration peut user ou endommager les paliers, ce qui peut diminuer la durée utile de la machine et provoquer un déclenchement pour cause de vibration excessive.

Un relais spécial destiné à déceler ce type de courant et portant le nom de relais d'intensité inverse est utilisé pour déceler le déséquilibre des phases dans l'alternateur. Le terme inverse est un terme mathématique qui ne sert qu'à décrire l'effet du déséquilibre d'un circuit à trois phases symétriques.

Le déséquilibre des phases est le plus critique lorsqu'il est provoqué par un circuit ouvert à l'un des enroulements, et il peut n'être décelé par aucune autre protection. La distribution inégale des charges, les défauts au réseau de distribution électrique et les défauts aux enroulements constituent d'autres causes de déséquilibre des phases.

### **5.9.7 Protection des alternateurs contre la perte de champ**

Si l'excitation d'un alternateur devient insuffisante pour une charge donnée, la tension diminue aux bornes de cet alternateur, qui se met à fonctionner avec un facteur de puissance ayant moins d'avance et avec un angle de charge plus grand. Si cet angle de charge devient trop important, une perte de stabilité et un glissement de pôle se produisent et le groupe turbine-alternateur se met vite en survitesse en même temps qu'un courant d'arc c. a. de forte intensité circule dans le rotor.

Les pertes de champ peuvent être causées par une panne d'excitatrice ou de redresseur, une panne de stabilisateur automatique de tension, une ouverture accidentelle de disjoncteur de champ, des courts-circuits aux courants de champ, un mauvais contact des balais sur les bagues ou une perte de l'alimentation c. a. des excitatrices (soit de l'alimentation électrique de la centrale, soit du courant d'excitation produit par l'alternateur).

Un relais pouvant déceler les conséquences d'une perte de champ (comme la circulation d'un courant réactif dans la machine, les changements d'impédance intérieures causés par les modifications du champ ou les diminutions de tensions de champ) peut être utilisé pour déceler les pertes de champ. Un interrupteur de fin de course rattaché à

un disjoncteur de champ pour indiquer si ce disjoncteur est ouvert peut signaler l'absence de champ à l'alternateur.

Notes

### 5.9.8 Protection des alternateurs contre la surexcitation

Si l'alternateur est contraint de produire une tension supérieure à la tension nominale, mais à la vitesse nominale (ou une tension égale à la tension nominale, mais à une vitesse inférieure à vitesse nominale), le courant de champ doit être augmenté pour passer au-dessus de la normale (la tension produite est proportionnelle à la fréquence et au flux). L'excès de courant circulant dans le rotor et la tension produite provoque une magnétisation excessive du fer du stator de l'alternateur et des noyaux en fer des transformateurs de service principaux et individuels. La chaleur produite alors peut endommager ces éléments. La surtension peut également détériorer l'isolant et donc provoquer des défauts et la formation d'arcs.

Ce problème peut toucher les alternateurs connectés au réseau de distribution électrique qui éprouvent des problèmes de régulation de tension. Il peut également toucher les machines qui doivent de nouveau démarrer ou être synchronisées à la suite d'un déclenchement (le disjoncteur de champ doit s'ouvrir au moment du déclenchement de la mise hors fonction de la turbine). Si le disjoncteur de champ s'ouvre, une résistance de décharge de champ est montée sur le circuit du rotor pour empêcher la tension aux bornes d'atteindre un niveau dangereux.

La surexcitation au démarrage peut être causée par des problèmes d'équipement ou par des erreurs humaines entraînant l'application prématurée d'une excitation excessive (l'excitation ne doit pas être appliquée à l'alternateur tant que sa vitesse n'a pas atteint une vitesse presque égale à la vitesse de synchronisation).

Un relais de tension et de fréquence spécial est utilisé pour déceler cet état et déclencher la mise hors fonction de l'alternateur s'il détecte un dépassement de tension et/ou de fréquence.

### 5.9.9 Protection des alternateurs contre la sous-fréquence

Si l'alternateur est couplé avec un réseau de distribution électrique stable, la fréquence et la tension de ce réseau restent habituellement constantes. Toute diminution trop importante de la fréquence du système indique une importante diminution de la charge. Cette diminution peut être la cause d'un grave problème sur le réseau électrique et n'est évidemment pas d'une très grande utilité pour ce qui est de l'alimentation d'un réseau placé au bord de l'effondrement.

Notes

L'alternateur doit dans ce cas être déconnecté du réseau. Ce réseau (ou tout au moins une partie de ce réseau) peut bien s'effondrer. Le système peut lentement rétablir les conditions prévalant avant l'effondrement (au moyen d'alternateurs prêts à restaurer l'alimentation).

Comme nous l'avons vu plus haut, si un alternateur connecté au réseau de distribution électrique et dont la vitesse est inférieure à la vitesse nominale (à cause d'une baisse de fréquence sur le réseau électrique) reçoit un courant d'excitation suffisant pour produire la tension nominale, le niveau d'excitation est en réalité plus élevé que celui nécessaire à la vitesse de synchronisation. La surexcitation et les problèmes décrits plus haut peuvent dans ce cas s'ensuivre.

Un relais de tension et de fréquence spécial est utilisé pour comparer la tension et la fréquence et déclencher la mise hors fonction de l'alternateur si une tension ou une fréquence établie est dépassée.

#### **5.9.10 Protection des alternateurs contre le décalage**

Ce dispositif est destiné à empêcher les alternateurs de continuer à fonctionner s'ils subissent un glissement de pôle. Le glissement de pôle est provoqué par les chocs rotatifs d'origine mécanique se produisant sur la turbine et provoquant un décalage en avance ou en retard par rapport au synchronisme. Cela peut être la conséquence d'un fonctionnement en sous-excitation (voir la rubrique sur la perte de champ) ou d'un défaut encore laissé sans remède au circuit de distribution électrique.

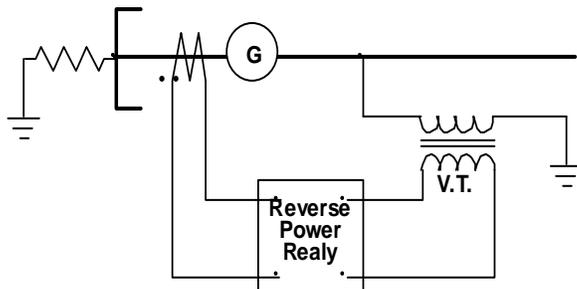
Les relais destinés à déceler les changements d'impédance des alternateurs peuvent être utilisés pour déceler ces changements lorsque des glissements de pôles se produisent. Cette protection peut être assurée d'une autre façon par la surveillance des pertes d'excitation permise par le dispositif de protection contre la perte de champ pour déclencher la mise hors fonction de l'alternateur si l'excitation est trop faible (c.-à-d. lorsque le glissement de pôle est imminent). Cela a été déjà examiné à la rubrique de ce module traitant de la perte de champ.

#### **5.9.11 Protection des alternateurs contre l'inversion de puissance**

Il arrive parfois qu'un alternateur se mette à fonctionner comme un moteur synchrone, autrement dit qu'il passe de l'état de producteur à celui de consommateur d'électricité. À la suite du déclenchement d'un réacteur ou de l'abaissement ou du réglage de la puissance à un niveau très bas, il est avantageux de faire passer le groupe turbine-alternateur

concerné à l'état de moteur. Cela n'est cependant pas souhaitable lors des urgences ou lorsque l'alternateur doit fonctionner en mode d'attente. Les alternateurs ne sont pas destinés à fonctionner comme des moteurs et peuvent être gravement endommagés si la force motrice leur est appliquée dans le mauvais sens.

Le relais directionnel est un dispositif qui permet de signaler le moment où un alternateur passe de l'état d'exportateur à celui d'importateur d'électricité. Comme son nom l'indique, le relais directionnel entre en fonction lorsque la circulation du courant s'inverse par rapport à la normale. Cette caractéristique peut être mise à contribution pour protéger les alternateurs, comme dans le cas de la mise en attente des alternateurs ou lorsque des modes d'asservissement et d'alarme permissifs sont associés au fonctionnement de groupes turbines-alternateurs devant fonctionner comme des moteurs. La figure 27 illustre un circuit de protection représentatif contre l'inversion de puissance, avec un transformateur d'intensité et un transformateur de tension chargés d'alimenter le relais et donc de protéger l'alternateur. Le relais intervient dès que la circulation d'un courant négatif est décelée.



Reverse Power Relay = Relais d'inversion de puissance V.T. = Transformateur de tension

**Figure 27**  
**Protection contre l'inversion de puissance**

## 5.10 QUESTIONS DE RÉVISION - PROTECTION ÉLECTRIQUE

1. Un bus de distribution électrique doté de deux alimentations et de quatre alimentateurs est protégé par une protection différentielle. Tracer le schéma de la connexion des transformateurs de courant et du relais différentiel. Indiquer la zone protégée par ce relais.
2. Un bus de distribution électrique est doté de relais de protection dont les fonctions de protection sont indiquées ci-dessous. Expliquer la raison de chacune de ces protections.
  - a. Protection différentielle
  - b. Protection de secours contre la surintensité
  - c. Protection contre les défauts à la terre
  - d. Protection contre la sous-tension
3. Les relais à gaz des transformateurs ont deux fonctions indépendantes. L'une est une alarme d'accumulation de gaz. L'autre est un déclenchement en cas d'accumulation excessive de gaz. Indiquer brièvement les types de défauts décelés au moyen de chacune de ces fonction.
4. En plus d'être protégés par un relais à gaz, les transformateurs sont protégés par des relais dont les fonctions sont indiquées ci-dessous. Expliquer brièvement pourquoi chaque fonction est nécessaire.
  - a. Protection contre la surintensité instantanée
  - b. Protection différentielle
  - c. Protection contre la surcharge thermique
  - d. Protection contre les défauts à la terre
5. Les gros moteurs à induction sont dotés des protections suivantes. Expliquer la raison de chacune de ces protections.
  - a. Protection contre la surintensité instantanée
  - b. Protection contre la surcharge thermique
  - c. Protection contre les défauts à la terre
  - d. Protection contre le calage
  - e. Protection contre l'excès de flux magnétique (déséquilibre de phase)

6. Dans certaines installations, un relais de surintensité temporisé est utilisé au lieu d'une des protections de moteur standard suivantes. Sélectionner la protection que le relais de surintensité temporisé peut remplacer.
7. Expliquer le but des relais associés à chaque fonction de protection d'alternateur suivante.
  - a. Protection contre la surintensité
  - b. Protection différentielle
  - c. Protection contre les défauts à la terre
  - d. Protection contre le déséquilibre de phase
  - e. Protection contre la perte de champ
  - f. Protection contre la surexcitation
  - g. Protection contre la sous-fréquence
  - h. Protection contre le glissement de pôle
  - i. Protection contre l'inversion de puissance
  - j. Protection contre les défauts à la terre au rotor
8. Les déclenchements associés aux alternateurs principaux sont classés en 4 classes (A, B, C et D). La définition de chaque classe de déclenchement est donnée ci-après. Indiquer quelle classe de déclenchement entre en jeu pour chaque condition de la liste donnée après les définitions.

Classe A. Les déclenchements de classe A sont destinés à déconnecter l'alternateur du réseau de distribution électrique et à arrêter le groupe turbine-alternateur (c.-à-d. à mettre hors fonction la turbine et à ouvrir le relais d'induction).

Classe B. Les déclenchements de classe B sont destinés à déconnecter l'alternateur du réseau de distribution électrique, mais en laissant le groupe turbine-alternateur fournir la charge de l'alternateur.

Classe C. Les déclenchements de classe C sont provoqués par une surexcitation de l'alternateur et ne se produisent que si l'alternateur n'est pas couplé au réseau de distribution électrique (tout en pouvant continuer à fournir sa charge).

Classe D. Les déclenchements de classe D sont destinés à mettre hors fonction la turbine puis l'alternateur s'il a fonctionné comme un moteur.

Notes

- a. Un défaut différentiel d'alternateur (A)
- b. Un défaut mécanique dans la turbine (D)
- c. Un défaut au poste de manœuvre ayant provoqué l'ouverture du disjoncteur de l'alternateur (B)
- d. Une surexcitation (C)
- e. Un rejet de la charge de l'alternateur (D)
- f. Protection différentielle des transformateurs de service individuels (A)