



# Couplage des alternateurs

par

Claude Chevassu

<b>1</b>	<b>Introduction :</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Couplage, marche à vide</b>	<b>5</b>
2.1	Conditions électriques de couplage en parallèle :	5
2.2	Manœuvres de couplage d'un alternateur :	6
2.3	Cas des alternateurs triphasés :	8
<b>3</b>	<b>Principaux appareils de synchronisation :</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Marche en charge :</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Répartition des puissances entre les moteurs de deux alternateurs couplés en parallèle :</b>	<b>10</b>
5.1	Généralités :	10
5.2	Statisme :	10
5.3	Stabilité du couplage :	12
5.4	Couplage en parallèle des systèmes à statisme positif :	14
5.5	Influence de la « paresse » des régulateurs :	16
5.6	Pratique du couplage :	18
<b>6</b>	<b>Diagramme de la marche en parallèle :</b>	<b>18</b>
<b>7</b>	<b>Fonctionnement optimal à réaliser :</b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>Comment on réalise le fonctionnement optimal :</b>	<b>20</b>
<b>9</b>	<b>Mise en charge et découplage d'un alternateur :</b>	<b>21</b>
<b>10</b>	<b>Stabilité de la marche en parallèle :</b>	<b>25</b>
<b>11</b>	<b>Stabilité statique. Puissance synchronisante. Couple synchronisant :</b>	<b>27</b>
11.1	Stabilité statique :	27
11.2	Puissance synchronisante :	27
11.3	Couple synchronisant :	27
<b>12</b>	<b>Conséquences des fautes de couplage :</b>	<b>28</b>
12.1	Inégalité des tensions :	28
12.2	Différence de phases entre la F.É. M. E de l'alternateur et la tension U entre barres :	28
12.3	Différence des fréquences :	29
<b>13</b>	<b>Oscillations ou pompages des alternateurs en parallèle :</b>	<b>29</b>
13.1	Oscillations propres ou libres :	29
13.2	Oscillations forcées imputables au moteur :	30
13.3	Oscillations imputables au régulateur :	30
<b>14</b>	<b>Protection des alternateurs :</b>	<b>31</b>
14.1	Généralités :	31

<b>14.2</b>	<b>Protection et surveillance des petits alternateurs et services auxiliaires de centrales électriques :</b>	<b>31</b>
<b>15</b>	<b>Coupleurs automatiques :</b>	<b>34</b>
<b>15.1</b>	<b>Généralités :</b>	<b>34</b>
<b>15.2</b>	<b>Performances des dispositifs SYNALFA 2407 :</b>	<b>35</b>
15.2.1	Processus de couplage manuel :	35
15.2.2	Réglage des régulateurs :	36
<b>15.3</b>	<b>Description générale :</b>	<b>36</b>
15.3.1	Description de la partie coupleur :	36
15.3.2	Synchroniseur :	37
15.3.3	Détection d'écart de fréquence :	37
15.3.4	Trigger de synchro :	38
15.3.5	Discriminateur $\pm$ vite :	39
15.3.6	Actionneurs :	39
15.3.7	Le coupleur proprement dit :	40
15.3.8	Rappel des conditions à remplir pour réaliser un couplage correct :	41
15.3.9	Ordre de couplage :	41
15.3.10	Constitution du coupleur (se reporter à la Figure 40) :	42
<b>15.4</b>	<b>Description du répartiteur de charges actives :</b>	<b>45</b>
15.4.1	équirépartition :	45
15.4.2	Description de l'équirépartiteur :	46
15.4.3	Transformateurs d'intensité :	46
15.4.4	Relayage :	47
15.4.5	Détecteurs d'écarts de puissance :	47
15.4.6	Amplificateur différentiel :	48
15.4.7	D.E.F.(Détecteurs d'écart de fréquence) :	49
15.4.8	Discriminateur :	49
15.4.9	Actionneurs :	50
<b>15.5</b>	<b>Modes spéciaux de répartition des charges :</b>	<b>51</b>
15.5.1	1 <sup>ère</sup> répartition spéciale :	51
15.5.2	Source à courant constant :	52
15.5.3	Comparateur de puissance Tristat :	52
15.5.4	2 <sup>ème</sup> répartition spéciale :	52
<b>15.6</b>	<b>Principes de construction :</b>	<b>53</b>
15.6.1	Technologie :	53
15.6.2	Alimentations :	53
<b>15.7</b>	<b>Règles générales de mise en service :</b>	<b>53</b>
15.7.1	Réglages préalables des régulateurs de vitesse et de tension :	53
15.7.2	Réglages des potentiomètres d'actionneur :	53
<b>16</b>	<b>Excitation des alternateurs :</b>	<b>55</b>
16.1.1	Pourquoi une excitation variable :	55
<b>16.2</b>	<b>Description des différentes sortes de source de puissance :</b>	<b>57</b>
16.2.1	Excitatrice à courant continu :	58
16.2.2	Alternateur-exciteur débitant sur redresseurs :	58
16.2.3	Auto-alimentation :	59
16.2.4	Auto-alimentation à dérivation pure :	59
16.2.5	Auto-alimentation avec compoundage série :	60
16.2.6	Auto-alimentation avec compoundage parallèle :	61
<b>16.3</b>	<b>Théorie simplifiée du compoundage :</b>	<b>62</b>
16.3.1	Compoundage série :	62
16.3.2	Compoundage parallèle :	64

<b>17</b>	<b>Exemple de système d'excitation : l'E.S.C.R.T. :</b>	<b>65</b>
<b>17.1</b>	<b>Performances de la régulation :</b>	<b>65</b>
17.1.1	En régime établi :	65
17.1.2	En régime variable :	66
<b>17.2</b>	<b>Principe de fonctionnement de l'excitation et de la régulation (type ESCRT) :</b>	<b>66</b>
17.2.1	Fonctionnement :	68
17.2.2	Fonctionnement à vide :	68
17.2.3	Fonctionnement en charge sans régulation :	69
17.2.4	Transformateur de courant :	69
<b>17.3</b>	<b>Régulation de la tension et répartition des charges réactives :</b>	<b>70</b>
17.3.1	Principe de fonctionnement :	71
<b>17.4</b>	<b>Pont redresseur et détecteur de tension :</b>	<b>72</b>
<b>17.5</b>	<b>Amplificateur à thyristors (AT) :</b>	<b>73</b>
<b>17.6</b>	<b>Déclencheur magnétique pour thyristors (DMT) :</b>	<b>74</b>
17.6.1	Fonctionnement :	77
<b>17.7</b>	<b>Circuit de répartition des charges réactives (CK) :</b>	<b>79</b>
<b>17.8</b>	<b>Circuit de stabilisation ou de courte réaction (CR) :</b>	<b>80</b>
<b>17.9</b>	<b>Autres synoptiques d'excitation d'alternateur :</b>	<b>81</b>

# COUPLAGE DES ALTERNATEURS

## 1 Introduction :

1. Une centrale à courants alternatifs comporte plusieurs alternateurs. Quand, disposant d'une certaine énergie mécanique, on se propose de la transformer en énergie électrique à courants alternatifs, on a généralement le choix entre l'emploi d'un seul alternateur puissant ou la répartition de la puissance électrique entre plusieurs unités.

C'est, le plus souvent, la deuxième solution qui est préférable ; non seulement parce qu'en prévision d'un accident sur l'unique

alternateur il faudrait disposer d'une machine de secours de même puissance, mais encore parce que la puissance demandée par un réseau est très variable : un seul générateur prévu pour la charge maximale fonctionnerait souvent à fraction de charge et son rendement moyen serait médiocre.

2. Les alternateurs sont toujours couplés en parallèle. - On envisage donc l'installation de plusieurs groupes électrogènes, c'est-à-dire d'ensembles moteurs-

générateurs électriques. Une question se pose alors : doit-on les coupler en série, c'est-à-dire de façon telle que leurs F. É. M. s'ajoutent, ou bien en parallèle afin que s'additionnent leurs courants débités ?

Le couplage en série n'est pas utilisé. En effet le graphe vectoriel des F. É. M. (en prenant le courant commun à deux alternateurs comme origine des phases) serait celui de la Figure 1 ci-dessous.

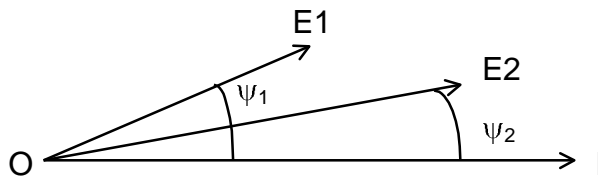


Figure 1

Si l'alternateur 1 prenait de l'avance, l'angle  $\Psi_1$  deviendrait plus grand. La puissance électromagnétique  $E_1 I \cos \Psi_1$  de cet alternateur deviendrait plus petite et il opposerait à la turbine un couple résistant plus

faible, cause d'un nouvel accroissement de vitesse. La marche en série est donc instable et par conséquent inutilisable ( Saut le cas très rare de deux alternateurs mécaniquement accouplés (les

angles  $\Psi_1$  et  $\Psi_2$  sont alors liés entre eux). D'ailleurs le couplage en série servirait à obtenir des tensions élevées, mais c'est ce que permet le transformateur statique.

## 2 Couplage, marche à vide

### 2.1 Conditions électriques de couplage en parallèle :

Condition préalable au couplage. - Soit un générateur G débitant dans un réseau extérieur quelconque. Soit la tension entre les bornes de couplage. Désignons par E, la

f. é. m. du générateur G, par z son impédance intérieure.

Suivant que cette f. é. m. E sera supérieure ou inférieure à U au moment où nous fermerons l'interrupteur de

couplage, la machine G, fonctionnera comme génératrice ou réceptrice et sera parcourue par un courant I donné par a relation :

$$E = U + z I \Rightarrow I = \frac{E - U}{z} \text{ (générateur),}$$

$$E = U - z I \Rightarrow I = \frac{U - E}{z} \text{ (moteur),}$$

Comme l'impédance z du générateur G, est généralement très petite, le courant I peut prendre, pour une différence assez faible

entre E et U, une valeur assez importante et cela brusquement au moment où l'on ferme l'interrupteur.

Ce courant détermine un brusque couple résistant ( $E > U$ ) ou un brusque couple moteur ( $E < U$ ). Dans les deux cas, le groupe subit un à coup

préjudiciable à sa bonne tenue mécanique. C'est pourquoi, lorsqu'on couple un générateur sur des bornes  $AB$  (en parallèle avec d'autres), on donne préalablement à sa F. E. M.  $E$  (tension entre bornes à vide)

une valeur égale à la tension  $U$  entre  $A$  et  $B$ .

En courant alternatif, les tensions et f. é. m. sont périodiques. Les conditions ci-dessus doivent être réalisées à tout instant de leurs périodes ; autrement dit la courbe de la f.

é. m.  $e$  de l'alternateur à coupler doit se superposer à la courbe de la tension  $u$  entre les barres auxquelles sont déjà connectés les autres. Or, pour que deux sinusoïdes se superposent, il faut :

- 1° L'égalité de leurs valeurs maximales, donc de leurs valeurs efficaces ;
- 2° L'égalité de leurs fréquences ;
- 3° Un déphasage nul entre elles.

Telles sont les **conditions électriques** de couplage d'un alternateur  $A_2$  en parallèle avec un alternateur  $A_1$ .

Dans le cas général, l'alternateur  $A_2$  doit être couplé sur des barres  $PM, QN$  entre lesquelles sont connectés d'autres alternateurs. On ramène au point de vue électrique ce cas au précédent en rappelant qu'une tension  $U$  entre barres se comporte vis-à-vis d'un générateur  $G_1$  comme la f. é. m.  $E_2$  égale à  $U$  d'un générateur fictif  $G_2$  qui aurait une résistance intérieure nulle.

En courant alternatif cette condition de polarité, s'appliquant aux valeurs instantanées des F. É. M., se traduira de la façon suivante : les f. é. m. de deux alternateurs en parallèle doivent être en opposition de phase dans le circuit commun aux deux machines et en phase par rapport au réseau extérieur alimenté par les deux alternateurs.

Remarque : Nous avons montré qu'à l'accrochage d'un moteur synchrone le vecteur  $E$  représentant sa F. É. M. devait être en opposition avec le

vecteur  $U$  représentant sa tension aux bornes. L'accrochage d'un moteur synchrone ou le couplage d'un alternateur sur des barres constituent *une seule et même opération*. C'est après le couplage que la machine synchrone fonctionne en alternateur ou en moteur synchrone, suivant qu'on applique à la roue polaire un couple moteur ou un couple résistant.

## 2.2 Manœuvres de couplage d'un alternateur :

Soit un alternateur  $A_2$  que nous proposons de coupler en parallèle avec plusieurs autres connectés aux barres  $PM, QN$  appelées barres *de couplage*. Nous basant sur la remarque ci-dessus, nous représenterons en pointillé l'alternateur  $A_1$  dont la f. é. m.  $E_1$  joue, par rapport à  $A_2$ , le même rôle que la D.D.P.  $U$  entre barres. Effectuons le montage de la fig. 2 où  $I$  désigne des lampes connectées entre les bornes de l'interrupteur de couplage.

a) Mettons en marche l'alternateur  $A_2$  jusqu'à une vitesse voisine de la vitesse du

synchronisme  $N = \frac{60f}{p}$  ( $f$  = fréquence de la D. D. P.  $U$  entre barres).

b) Excitons  $A_2$  de façon que le voltmètre  $V_2$  entre ses bornes donne la même<sup>1</sup> indication que le voltmètre  $V_1$  connecté entre les barres. La première condition du couplage est réalisée. A ce moment, nous observons que les lampes  $I$  marquent des battements. En effet, le circuit fermé  $MA_2NA_1M$  est le siège d'une F. É. M. qui est égale à  $e_1 + e_2$  en valeur instantanée (somme algébrique) et à :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (\text{Figure 3}) \text{ en grandeur vectorielle.}$$

<sup>1</sup> A cet égard, pour éviter une erreur due à la différence d'étalonnage de deux voltmètres, on emploie le même voltmètre pour mesurer  $U_1$  et  $U_2$ .

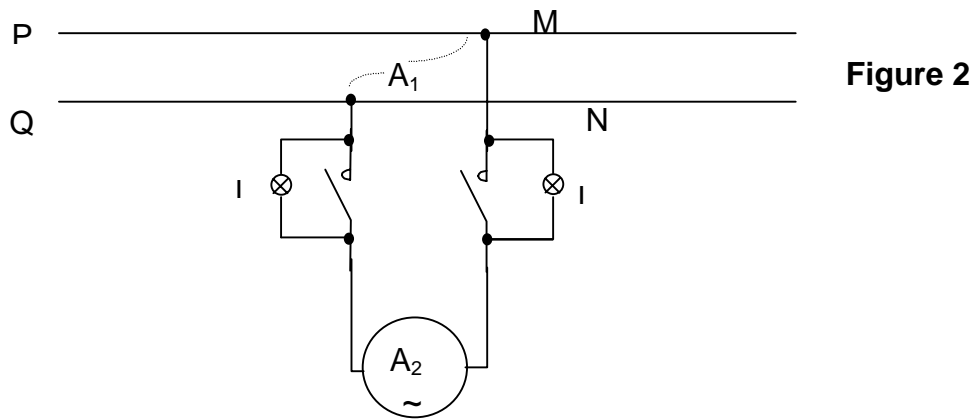


Figure 2

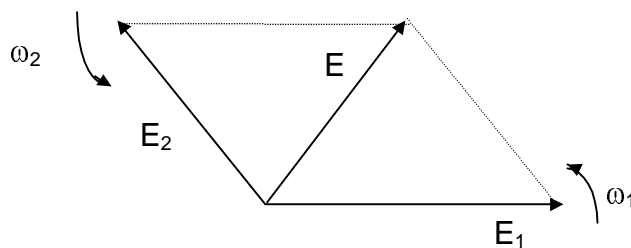


Figure 3

Or, la fréquence de  $E_2$ , n'étant pas égale à celle de  $E_1$ , le vecteur  $E_2$ , par rapport au vecteur  $E_1$  supposé fixe, tourne avec une vitesse angulaire :  $\omega = \omega_2 - \omega_1$ , égale à la différence des pulsations des deux F. É. M. <sup>1</sup>

Donc  $E$  varie entre les limites 0 et  $E_1 + E_2$ . Dans le premier cas, les lampes  $I$  sont à l'extinction, dans le deuxième au maximum d'éclairement.

c) Agissons sur la vitesse de l'alternateur  $A_2$ , de façon à ralentir les battements des lampes. **Nous fermerons l'interrupteur  $K$  de couplage dès qu'une extinction durera trois secondes environ.** En effet c'est à l'extinction que le vecteur  $E$  est nul, c'est-à-dire que les F. É. M.  $E_1$  et  $E_2$ , sont, dans le circuit commun  $MA_1NA_2M$ , en opposition de phase, autrement dit en phase par rapport au réseau extérieur.

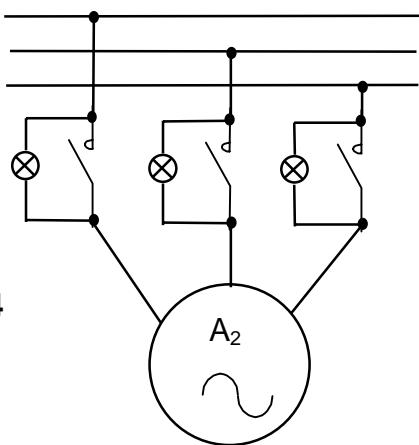


Figure 4

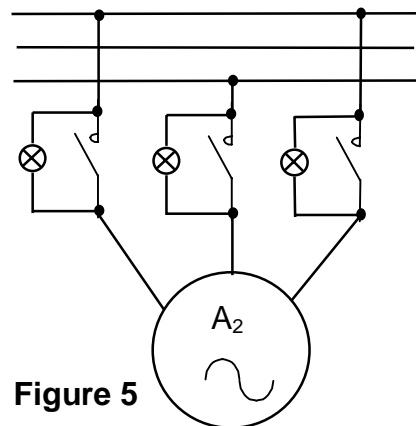


Figure 5

<sup>1</sup> Il s'agit là d'un phénomène de battements. Dans le circuit  $MA_2NA_1M$  agissent deux f.é.m.  $E_1$ ,  $E_2$  de fréquences différentes. La f.é.m. résultante dont la valeur instantanée  $e$  est la somme des valeurs instantanées  $e_1$  et  $e_2$  présente des maximums et des minimums (battements) à une fréquence égale à la différence des fréquences de  $e_1$  et  $e_2$ .

### 2.3 Cas des alternateurs triphasés :

Une opération supplémentaire s'impose, en triphasé, avant le couplage : celle de la reconnaissance de l'ordre des phases.

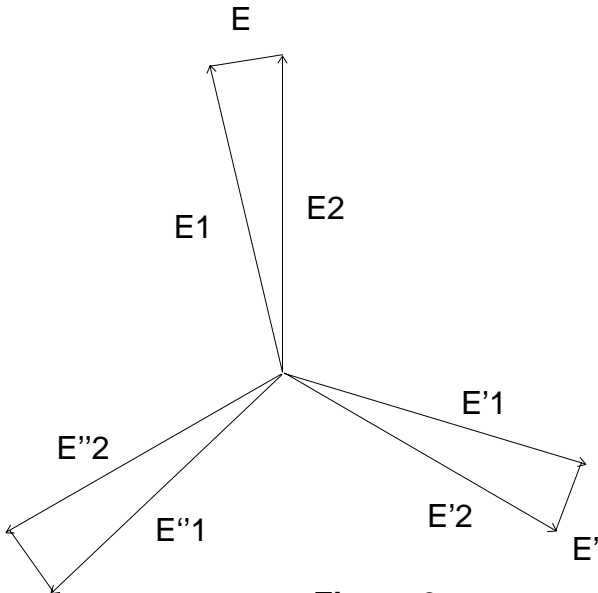


Figure 6

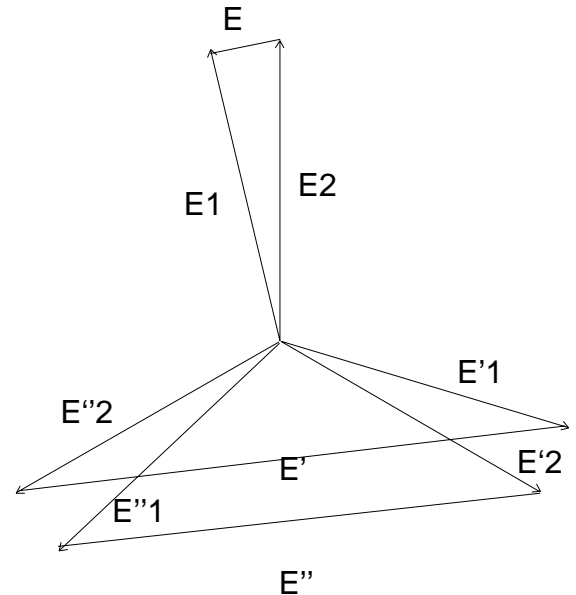


Figure 7

Il faut en effet que, dans les alternateurs  $A_1$  et  $A_2$  que l'on couple en parallèle, les champs tournent dans le même sens, autrement dit que l'ordre de succession des phases que l'on relie entre elles soit le même.

Si nous représentons les graphes dans le cas de connexions correctes (Figure 4) et des connexions incorrectes (Figure 5) nous voyons, qu'en faisant tourner

les vecteurs  $E_2$ ,  $E'_2$ ,  $E''_2$  par rapport aux vecteurs  $E_1$ ,  $E'_1$ ,  $E''_1$  les F. É. M. résultantes  $E$ ,  $E'$ ,  $E''$  sur chaque phase présentent des maximums (Figure 6) et des minimums simultanés dans le premier cas et en *permutation circulaire* dans le second (Figure 7).

Si comme dispositif synchroniseur on emploie des lampes montées comme l'indique les Figure 4, celles-ci présenteront, dans la première

hypothèse, des feux battant simultanément, dans la seconde, des feux tournants (maximums d'éclat passant d'une lampe à l'autre). Il faudra donc, si l'on a des feux tournants avec le montage de la Figure 4, croiser deux connexions d'un même alternateur à l'interrupteur de couplage.

## 3 Principaux appareils de synchronisation :

Le mode de couplage décrit ci-dessous est le couplage à l'*extinction*. Comme une lampe est déjà éteinte pour une tension égale à 30 % environ de sa tension normale, on préfère parfois, afin de mieux saisir l'instant favorable au couplage, effectuer celui-ci à

*l'allumage*, c'est-à-dire à l'instant où les lampes, montées comme l'indique la Figure 8 brillent avec le maximum d'éclat. On voit facilement qu'à l'opposition de phase, les lampes sont soumises à la D. D. P. maximale. Les lampes offrent

l'avantage d'être vues de loin et de guider le mécanicien qui doit, en agissant sur l'admission d'ou de vapeur, régler la vitesse du groupe électrogène. Quand la commande du moteur est faite du tableau même, cet avantage disparaît. On préfère alors, au lieu de lampes,



utiliser des voltmètres qui indiquent de façon plus précise les maximums et les minimums de tension entre leurs bornes. Lorsque la tension des alternateurs est assez élevée, on branche ces appareils sur le secondaire de transformateurs. Enfin, concurremment avec les appareils précédents, on emploie généralement un *synchronoscope*, appareil portant une aiguille (Figure 9) tournant comme le vecteur E (Figure 3). Ce résultat est obtenu de la façon suivante : soit un moteur dont le stator porte un enroulement monophasé alimenté par les barres de couplage, le rotor porte deux enroulements à  $90^\circ$  électriques parcourus (l'un étant mis en série avec une résistance, l'autre en série avec une inductance) par des courants sensiblement déphasés de  $\pi/2$ . Le rotor, mis

sous la tension de l'alternateur à coupler, crée un flux tournant à la vitesse  $\omega_1$  ( $\omega_1 =$  pulsation de l'alternateur à coupler), tandis que le stator monophasé crée *deux* flux tournant en sens inverse à la vitesse  $\omega =$  pulsation de la tension entre barres).

Le moteur marchant à vide, le flux du rotor tend à rester parallèle à celui du stator qui tourne dans le même sens que lui. Si on a  $\omega_1 < \omega$ , le rotor va tourner à dans le même sens que son champ à la vitesse  $\omega - \omega_1$ ; si on a  $\omega_1 > \omega$ , le rotor tournera dans le sens contraire de celui de son flux à la vitesse  $\omega_1 - \omega$ . Enfin si on a  $\omega_1 = \omega$  le rotor reste immobile, mais, en vertu du principe du flux maximal, il occupe alors la position telle que le flux rotor fixe dans espace ait la direction même du flux du stator (axe des pôles). C'est à cet instant que le couplage doit s'effectuer

puisque, les flux stator et rotor étant en phase, il en est de même des tensions. La position bien définie du rotor à l'instant favorable est indiquée sur le cadran par un trait devant lequel doit être placée l'aiguille du synchronoscope au moment où l'on effectue le couplage.

Ajoutons que, dans les grandes centrales, des appareils appelés *synchronisateurs* réalisent automatiquement toutes les opérations de couplage.

REMARQUE. - Lorsqu'on doit coupler en parallèle plusieurs alternateurs, on effectue au repos entr'eux les connexions convenables : puis, après les avoir faiblement excités, on les met en route *simultanément*. Dès les premiers tours et sans aucune manœuvre ils se couplent entr'eux et ils demeurent couplés.

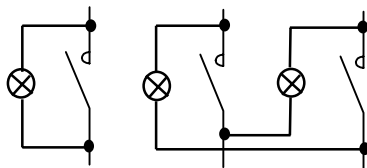
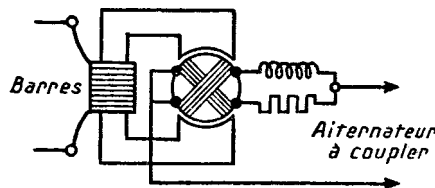


Figure 8

Figure 9  
Synchronoscope

#### 4 Marche en charge :

Après un couplage correct ( $E = U$ ) l'alternateur ne débite aucun courant, ne fournit aucune puissance: Il s'agit maintenant de le *mettre en charge*, c'est-à-dire de lui faire fournir une partie de la puissance électrique

demandée, par le réseau extérieur.

Pour comprendre cette mise en charge, il faut considérer, non pas les alternateurs isolément, mais les groupes électrogènes et ne pas perdre de vue qu'au rendement près, un alternateur

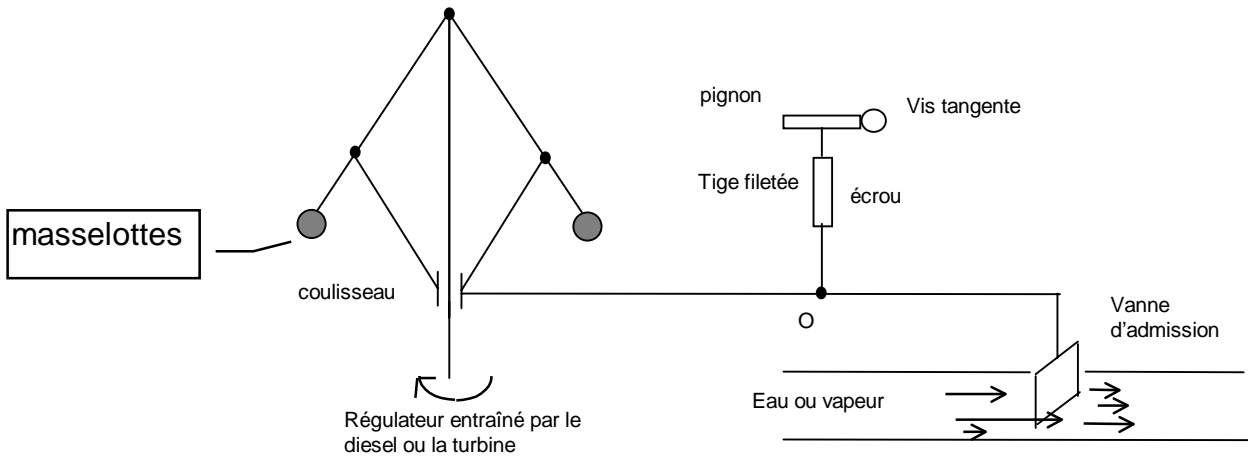
fournit électriquement la puissance mécanique qui lui vient du moteur.

C'est pourquoi nous rappellerons préalablement les données essentielles du problème de la répartition des puissances entre deux moteurs thermiques ou hydrauliques.

## 5 Répartition des puissances entre les moteurs de deux alternateurs couplés en parallèle :

### 5.1 Généralités :

On sait que tout moteur (thermique ou hydraulique) est muni d'un régulateur centrifuge qui agit sur l'admission (de vapeur ou d'eau) afin de maintenir constante la vitesse. La Figure 10 rappelle le schéma d'un tel régulateur. Par son principe même, le régulateur ne modifie la position de la vanne d'admission que s'il y a variation de vitesse de la machine.



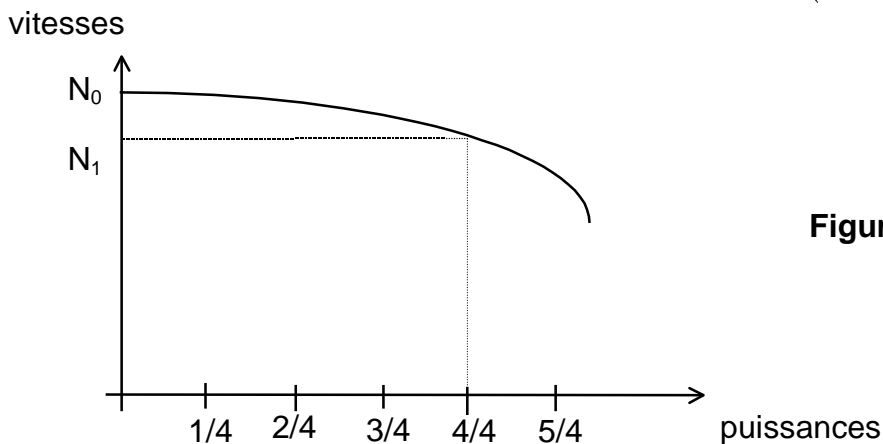
**Figure 10**

Quand la vitesse augmente, le régulateur diminue l'admission et la puissance décroît; quand la vitesse diminue, le régulateur augmente l'admission et la puissance croît. La courbe représentative de la puissance du moteur (muni de son régulateur) en fonction de la vitesse a donc l'allure indiquée ci-dessous.

### 5.2 Statisme :

On appelle écart de réglage ou statisme du régulateur le rapport :

$$\frac{\text{vitesse à vide} - \text{vitesse en charge}}{\text{moyenne des vitesses (vide et charge)}} = \frac{N_0 - N_1}{(N_0 + N_1)/2} \approx \frac{N_0 - N_1}{N_0}$$



**Figure 11**

Le statisme peut s'exprimer en pourcentage, on dira par exemple que le statisme d'un régulateur de vitesse est de 10% si l'allure diminue de 1500 tr/min à vide, à 1350 tr/min en pleine charge. Considérons maintenant les moteurs de deux alternateurs en parallèle.

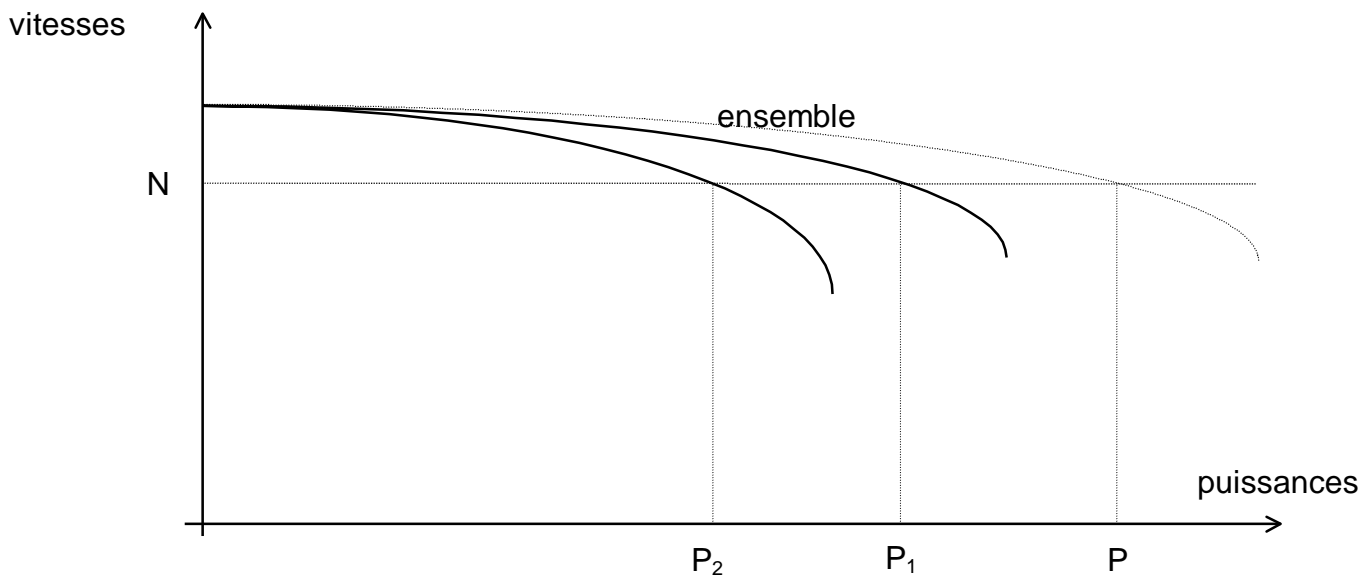
☞ Le statisme est la pente de la courbe (que nous assimilerons à une droite)  $N = f(P)$ .

Nous pouvons poser que :

a) Il est rare que leurs statismes soient identiques : les courbes de réglage  $N(P)$  sont distinctes.

b) Leurs vitesses de rotation sont toujours égales comme s'ils étaient accouplés arbre à arbre.

Il en résulte que l'on peut tracer, comme dans le cas de deux moteurs rigidement accouplés le diagramme  $N(P)$  de l'ensemble des groupes électrogènes en supposant que *l'on ne touche pas aux régulateurs*. La Figure 12 montre, que la loi de répartition d'une puissance  $P$  entre les deux machines est parfaitement définie par la condition d'égalité des vitesses.



**Figure 12**

On peut cependant modifier cette répartition. Il suffit de déplacer l'une des caractéristiques de réglage par rapport à l'autre. Cette translation d'une caractéristique dans le sens vertical est obtenue par exemple par le déplacement vertical de l'axe de rotation  $O$  (Figure 10) du levier du régulateur. Tel sera le mode de répartition des charges entre les groupes électrogènes.

**Pour plus de simplicité, nous assimilerons les courbes  $N = f(P)$  à des droites.**

### 5.3 Stabilité du couplage :

Le statisme doit être positif pour que le fonctionnement de deux machines couplées soit stable. En effet, représentons les caractéristiques de réglage ( $N = f(P)$ ) de deux machines couplées :

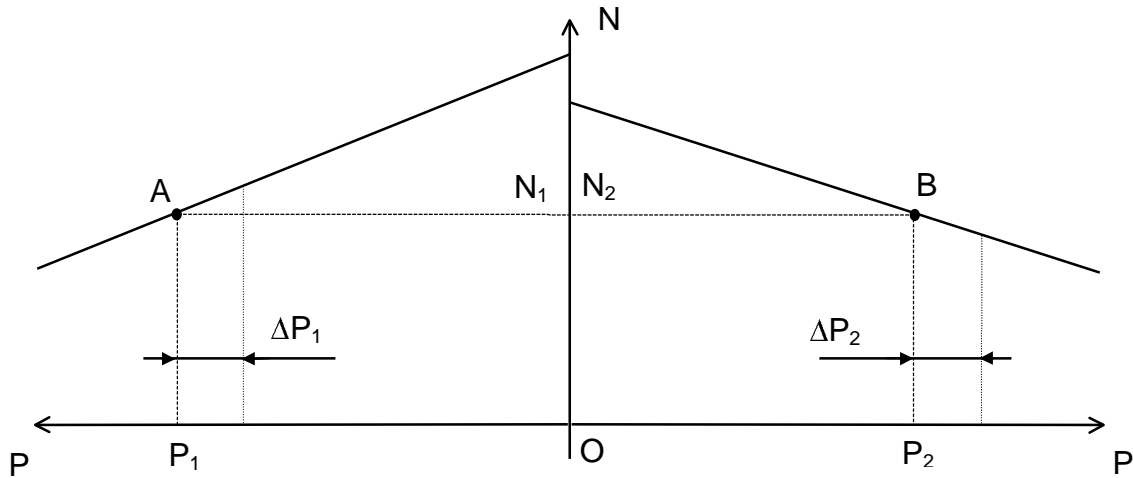


Figure 13

Pour une puissance totale donnée  $P$ ,  $N_1$  et  $N_2$  devant être égaux, on voit géométriquement sur la figure qu'il n'y a qu'une répartition possible des puissances  $P_1$  et  $P_2$  résultant des caractéristiques. Cette répartition est-elle stable ?

Imaginons qu'accidentellement,  $P_1$  diminue de  $\Delta P_1$ , alors  $N_1$  a tendance à augmenter.  $P$  (puissance totale absorbée par l'installation) étant fixe,  $P_2$  variera en sens inverse. Cette augmentation de  $N_1$  entraîne une augmentation de  $P_1 = 2\pi N_1 C_1$ , c'est à dire le retour vers le point de fonctionnement A. Pour la machine n°2 qui entraîne l'alternateur 2, c'est le phénomène inverse : devant fournir le surcroît de puissance  $\Delta P_2 = \Delta P_1$ , la machine n°2 a tendance à ralentir., ce qui, d'après l'allure de la caractéristique  $N = f(P)$ , diminue  $P_2$ . Le point de fonctionnement est ramené vers B, le système est stable.

Un raisonnement identique conduit, pour des caractéristiques montantes (statisme positif), à la conclusion inverse : la répartition des puissances est instable et une machine aura tendance à prendre toute la charge pendant que l'autre fonctionnera à vide (la machine qui a pris toute la charge peut éventuellement débiter dans l'autre s'il n'y a pas de dispositif de non retour de puissance).

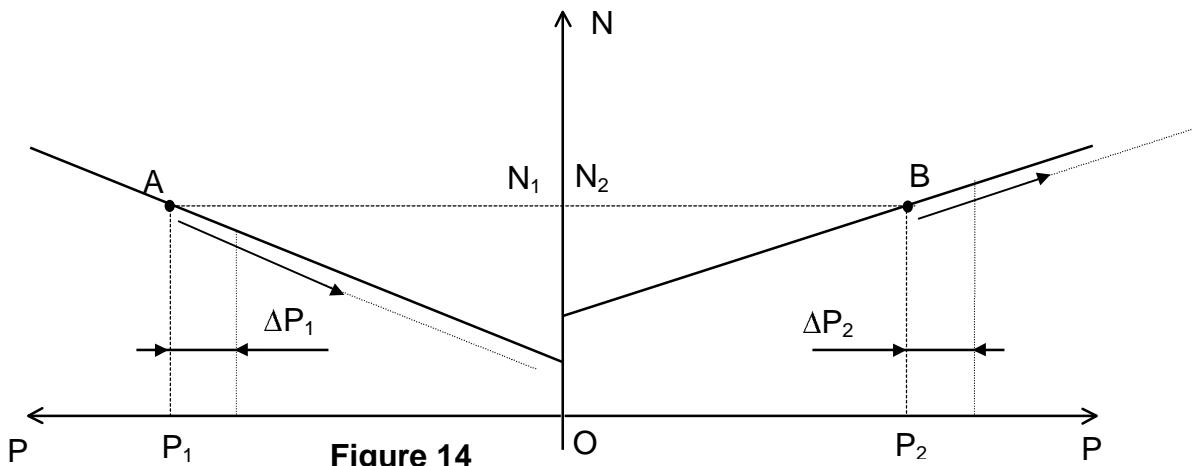


Figure 14

Supposons que ce soit

à nouveau la machine n°1 qui fournisse un

peu moins de puissance,  $\Delta P_1$  en moins. L'installation absorbant une puissance  $P$  supposée constante à un instant donné (Figure 13), la machine n°2 doit fournir un supplément de puissance :  $\Delta P_2 = \Delta P_1$ . D'après l'allure des caractéristiques, la vitesse  $N_1$  diminue elle aussi avec la puissance  $P_1$ , cela entraîne une nouvelle baisse de la puissance fournie par la machine n°1 ( $P_1 = 2\pi N_1 C_1$ ). Dans le même temps, la machine n°2 fournit la puissance supplémentaire  $\Delta P_2$  et sa vitesse augmente, ce qui entraîne une nouvelle augmentation de la puissance qu'elle fournit. Cela ne prend fin que lorsque la machine n°1 fonctionne à vide et que la machine n°2 fournit toute la puissance à l'installation (si elle en est capable). Le fonctionnement est instable.

Si les caractéristiques  $N = f(P)$  sont horizontales, on parle d'astatisme. Il n'y a, alors, pas de répartition bien définie des puissances entre les deux machines, voir Figure 15. Le fonctionnement est juste à la limite entre stabilité et instabilité.

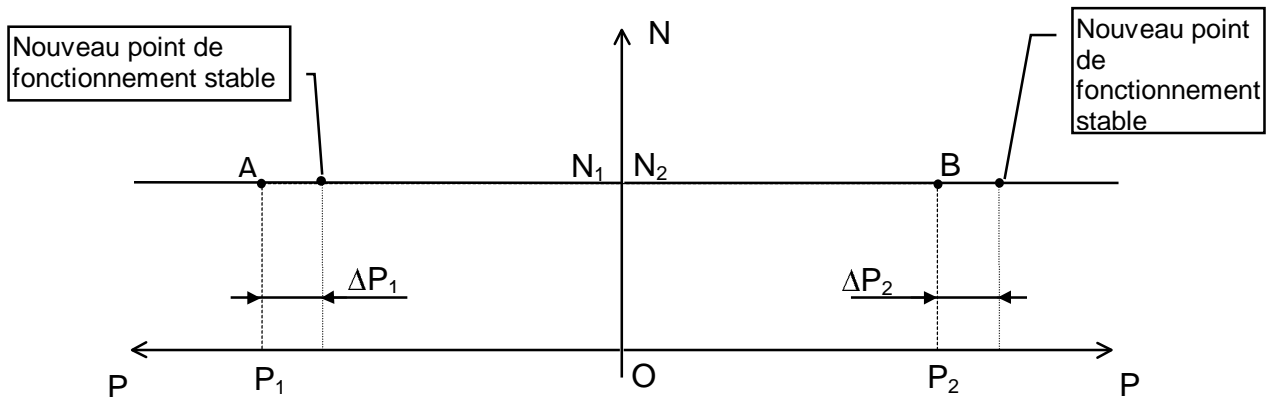


Figure 15

**Conclusion :** « il faut du statisme » ! (positif bien entendu).

Le couplage de machine (moteur ou turbine + régulateur) dont le statisme est négatif ou nul est impossible sauf précautions particulière.

Répartition des charges :

La stabilité du couplage étant admise, il nous reste à étudier la problème de la répartition des charges entre les alternateurs.

Un état d'équilibre étant donné, nous avons :  $N = N_0$ ,

- groupe 1 : puissance  $P_1$ ,
- groupe 2 : puissance  $P_2$ ,
- installation :  $P_{totale} = P_1 + P_2$ .

#### 5.4 Couplage en parallèle des systèmes à statisme positif :

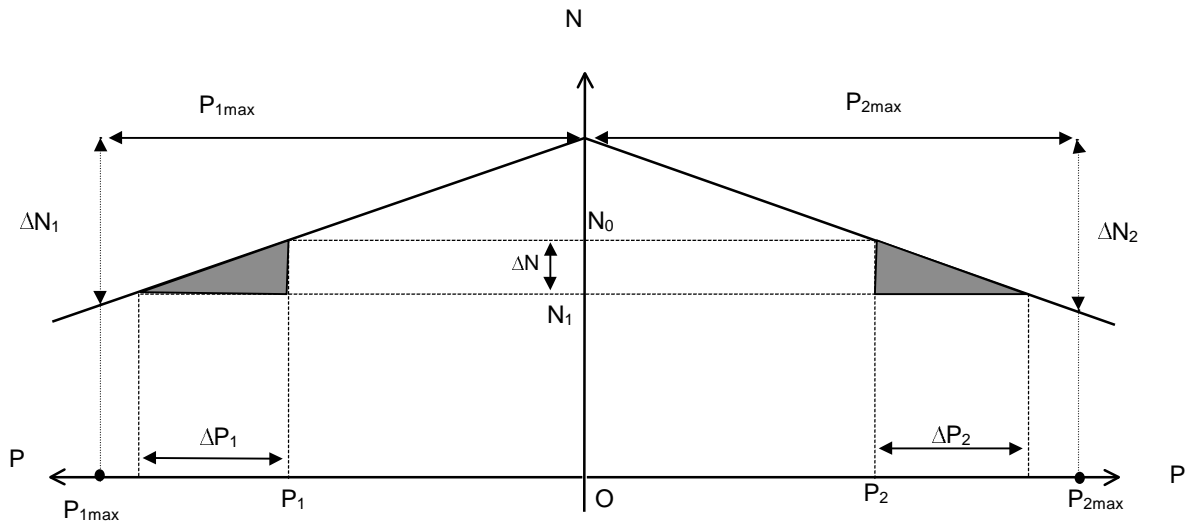


Figure 16

Si l'installation a besoin de plus de puissance, cette puissance supplémentaire sera répartie entre les deux alternateurs en fonction des caractéristiques de leur régulateur. Un nouvel état d'équilibre s'établira après étouffement du régime transitoire et nous aurons :

- $N = N_1$ ,
- $\Delta P_{\text{totale}} = \Delta P_1 + \Delta P_2$  (1),

En remarquant que les triangles  $[\Delta N_1, P_{1\text{max}}, N_1 = f(P_1)]$ ,  $[\Delta N_2, P_{2\text{max}}, N_2 = f(P_2)]$ , sont semblables, nous pouvons écrire la relation :

$$\frac{\frac{\Delta P_1}{\Delta N}}{\frac{P_{1\text{max}}}{\Delta N_1}} = \frac{\frac{\Delta P_2}{\Delta N}}{\frac{P_{2\text{max}}}{\Delta N_2}} \Rightarrow \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{P_{1\text{max}}}{P_{2\text{max}}} \times \frac{\Delta N_2}{\Delta N_1} \quad (2).$$

Les relations (1) et (2) donnent les expressions suivantes pour  $\Delta P_1$  et  $\Delta P_2$  :

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{totale}} \times \frac{\Delta N_2 \cdot P_{1\text{max}}}{\Delta N_1 \cdot P_{2\text{max}} + \Delta N_2 \cdot P_{1\text{max}}}$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{\text{totale}} \times \frac{\Delta N_1 \cdot P_{2\text{max}}}{\Delta N_1 \cdot P_{2\text{max}} + \Delta N_2 \cdot P_{1\text{max}}}$$

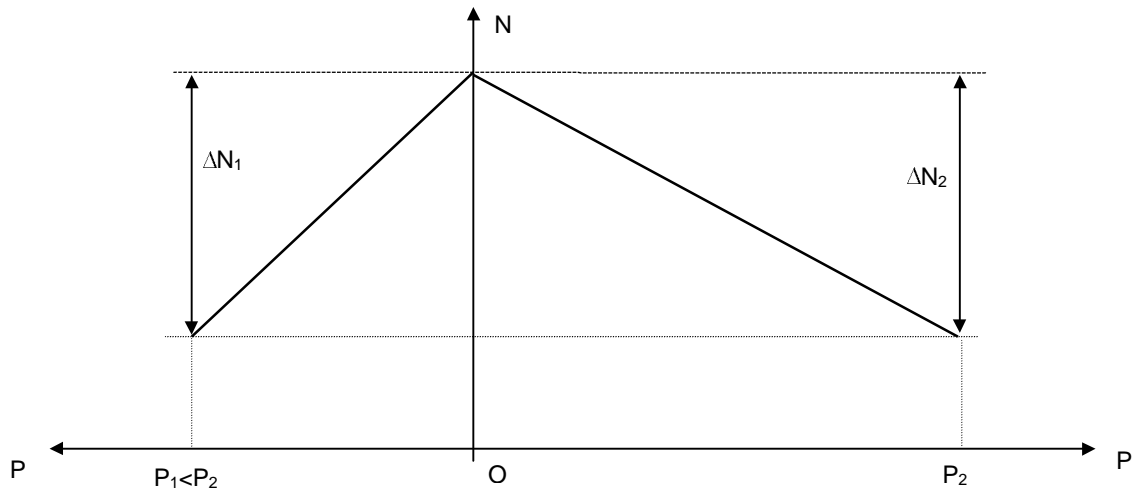
Les accroissements de charge pris par deux groupes couplés sont proportionnels à leurs puissances maximales (respectivement  $P_{1\text{max}}$  et  $P_{2\text{max}}$ ) respectives et au statisme de l'autre groupe ( $\Delta N_1$  et  $\Delta N_2$  sont proportionnelles au statisme).

Cas particuliers de groupes ayant des puissances différentes, mais même aptitudes aux variations de charges :

Il est rationnel que ces groupes participent aux variations de manière proportionnelle à leur puissance maximale, c'est à dire que l'on ait :

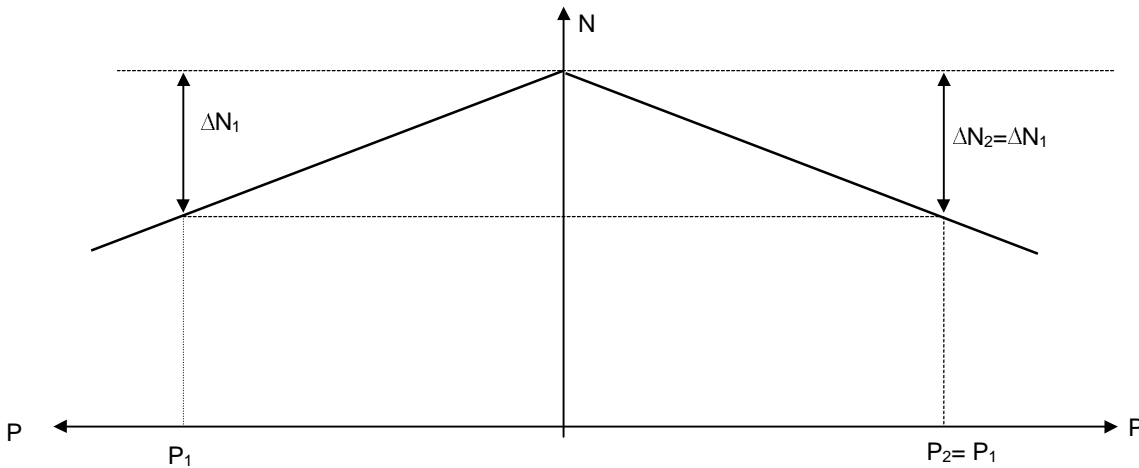
$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{P_{1\max}}{P_{2\max}}$$

comparée à la relation (2), cette condition impose l'égalité des statismes :  $\Delta N_1 = \Delta N_2$ , voir Figure 16 :



**Figure 17**

Si les groupes sont identiques, alors  $P_1 = P_2$  et  $N_1 = N_2$ , voir Figure 18 ci-dessous :



**Figure 18**

Remarque : Supposons que deux groupes identiques soient munis de régulateurs qui diffèrent dans leur réglage (pas dans leur construction). Leurs caractéristiques respectives (Figure 19) montrent immédiatement les inconvénients qui en résultent concernant les possibilités de couplage :

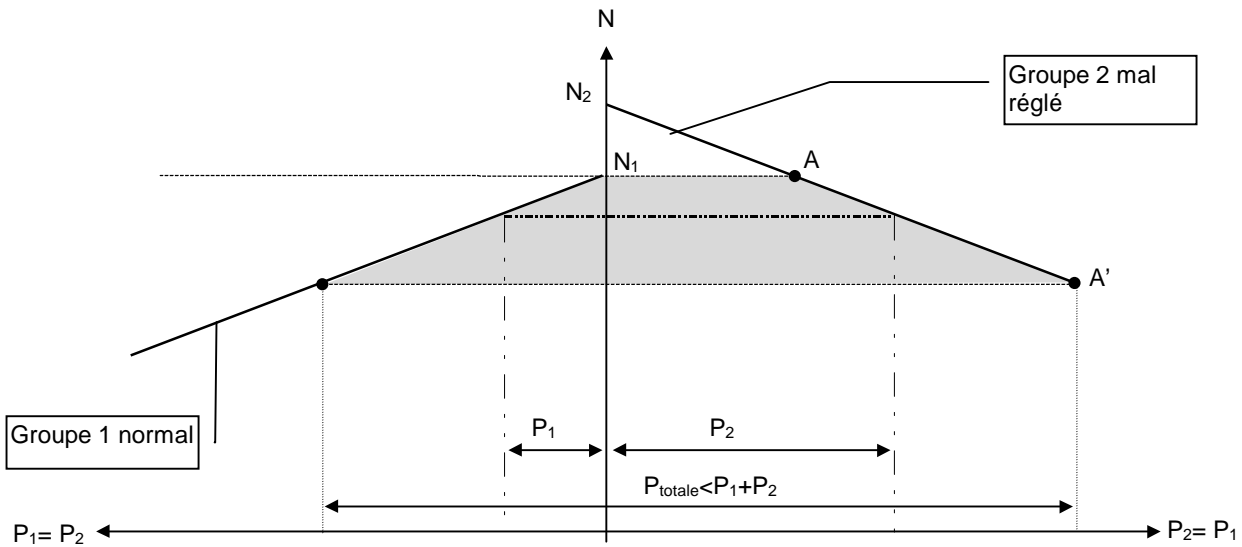


Figure 19

Le groupe 2, que nous supposons être le groupe dérégulé, n'est couplable correctement avec le groupe 1 que dans la partie AA' de sa caractéristique. Dans cette zone, les charges sont inégalement réparties entre les deux groupes.

L'ensemble des deux groupes ne pourra débiter dans des conditions acceptables que la puissance  $P_{\text{totale}} < P_1 + P_2$ . Au delà le groupe 1 encaissera toutes les variations de charges. L'influence d'un dérèglement donné sera d'autant plus sensible que la pente des caractéristiques, donc le statisme, sera plus faible.

### 5.5 Influence de la « paresse » des régulateurs :

Jusqu'à maintenant, nous avons étudié des régulateurs parfaitement sensibles, c'est à dire des appareils ne possédant qu'une seule loi de réglage  $N = f(P)$ , donc une seule courbe de statisme.

Dans la réalité, il n'en va pas ainsi et l'on conçoit que, du fait des frottements, de l'inertie et des jeux de transmission une perturbation  $\Delta P$ , si elle est trop faible, puisse rester sans influence sur le réglage, la détection n'intervenant pas.

Tout régulateur présente donc une plage de fonctionnement conforme au schéma ci-dessous. Cette plage est d'autant plus étroite que la régulateur est plus sensible.



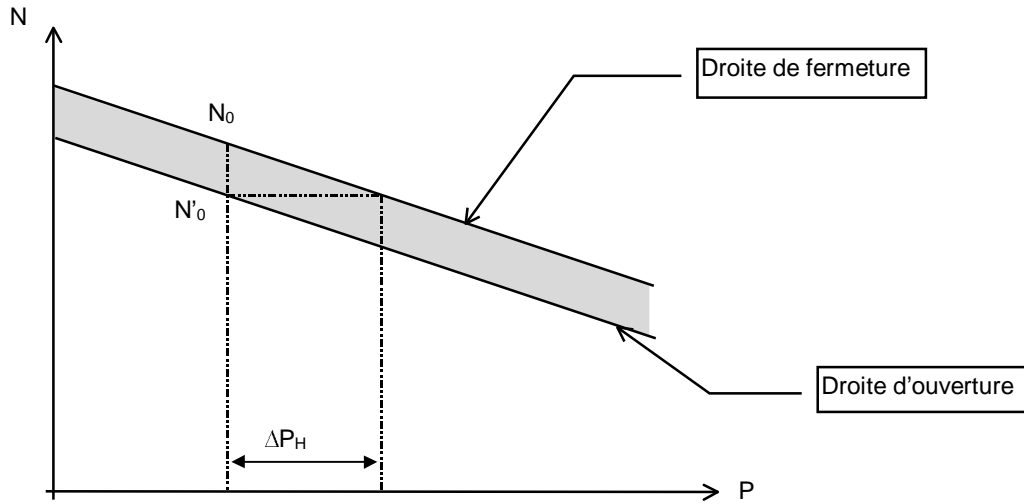


Figure 20

Les points de fonctionnement se situent alors sur deux caractéristiques, l'une appelée caractéristique **d'ouverture**, l'autre caractéristique de **fermeture**. Pour toute variation  $\Delta P < \Delta P_H$ , c'est à dire n'entraînant pas une variation de  $N$  au moins égale à  $N_0 - N'_0$ , le régulateur ne réagit pas. Il y a de l'hystérésis (.d'où l'indice H !).

Imaginons maintenant deux groupes identiques couplés en parallèle, le premier étant pourvu d'un régulateur parfaitement sensible, et l'autre d'un régulateur paresseux. Soit un régime permanent établi, défini par :

- $N = N_0$  pour les 2 groupes,
- $P_{\text{totale}} = P_1 + P_2$

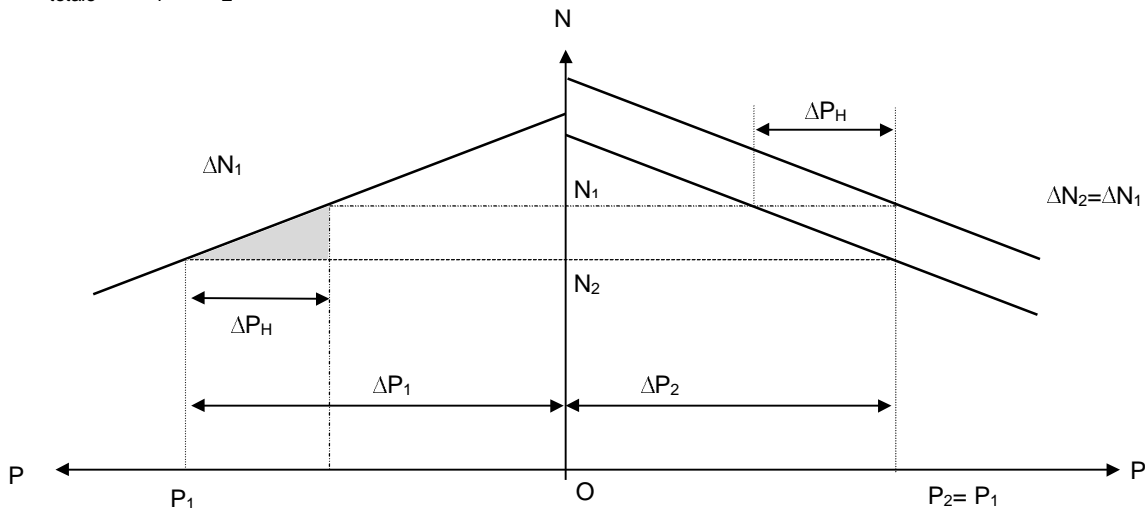


Figure 21

Toute diminution de charge du réseau  $\Delta P < \Delta P_H$  sera entièrement absorbée par le groupe 1 muni du régulateur sensible. Ce n'est que lorsque  $\Delta P$  devient supérieur à  $\Delta P_H$  que le groupe 2 participe à la répartition. Lorsque plusieurs groupes sont couplés en parallèle, ceux dont les régulateurs sont les plus sensibles participent le plus aux variations de charge. Les inégalités de répartition sont d'autant plus importantes que le statisme est plus faible. La construction d'un régulateur doit être d'autant plus soignée que la loi qu'il impose est plus voisine de l'astatisme.

### 5.6 Pratique du couplage :

Règles à observer :

Si les groupes à coupler sont identiques, ce qui est le cas général, leurs caractéristiques doivent être **identiques**, c'est à dire :

- avoir la **même ordonnée** à l'origine (valeur de N à vide),
- avoir la **même pente**.

S'ils ne sont pas identiques, mais s'ils présentent la même aptitude aux variations de charge, leurs caractéristiques devront avoir :

- même ordonnée à l'origine (comme précédemment),
- même statisme (le groupe le plus faible aura la caractéristique la plus pentue).

Pour réaliser la première condition, on lance le groupe à vide et l'on règle, au moyen d'un ressort dans la plupart des cas, la valeur de  $N_0$  selon les indications du constructeur. Sur les turbo ou diesel-alternateurs, l'organe correspondant s'appelle « synchroniseur ».

La seconde condition est réalisée en général par un rapport de bras de leviers (Figure 10) qui doit être le même pour tous les régulateurs ou fonction de leur puissance maximum respective. Ce réglage s'effectue en marche à une allure voisine de la puissance maximum totale.

## 6 Diagramme de la marche en parallèle :

Nous traiterons la marche en charge de deux alternateurs, en parallèle dans les hypothèses suivantes :

- 1° Les deux alternateurs sont identiques et les hypothèses du diagramme de Behn-Eschenburg (réactance  $L\omega$  constante) leur sont applicables ;
- 2° On s'astreint à maintenir constantes leur tension et leur fréquence ;
- 3° Les puissances active et réactive absorbées par le réseau sont constantes. Supposons le problème résolu et soient deux alternateurs  $A_1$ ,  $A_2$ , alimentant respectivement avec les courants  $I_1$ ,  $I_2$ , un réseau figuré par un récepteur  $Z$ , ces courants étant déphasés de  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ , par rapport à la tension  $U$  commune aux deux alternateurs.

Négligeons, dans les deux machines, les chutes par résistance  $RI$  toujours faibles par rapport aux chutes inductives  $L\omega I$ . Traduisons donc vectoriellement les relations :

$$\text{Alternateur } A_1 : \vec{E} = \vec{U} + L\omega \vec{I}_1$$

$$\text{Alternateur } A_2 : \vec{E} = \vec{U} + L\omega \vec{I}_2$$

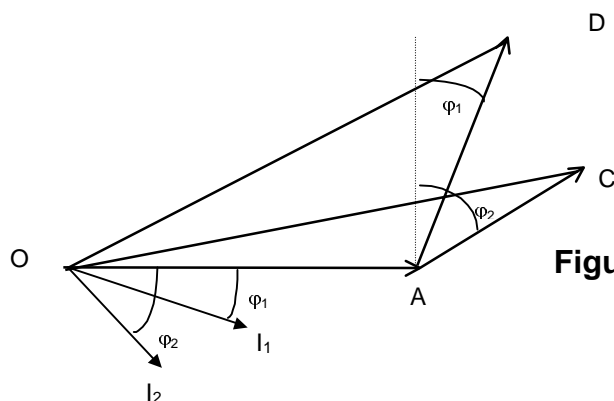


Figure 22

$L\omega$  désignant la réactance d'induit, la même pour les deux alternateurs et constante. Nous obtenons le graphe (Figure 22) dans lequel les vecteurs  $AD = L\omega I_1$  et  $AC = L\omega I_2$ , sont déphasés de  $\pi/2$  (en avant des vecteurs  $I_1$  et  $I_2$ ).

1° Représentations du courant  $I_1, I_2, I$ . - Les vecteurs  $AD$  et  $AC$  sont proportionnels aux courants  $I_1$  et  $I_2$ , avec le même coefficient de proportionnalité. Ils peuvent donc représenter, à une échelle convenable, les courants  $I_1, I_2$ . Dès lors leur résultante  $AF$  (Figure 23) représente à la même échelle, le courant  $I$  dans le réseau extérieur.

2° Représentation des puissances actives  $P_1, P_2, P$ .

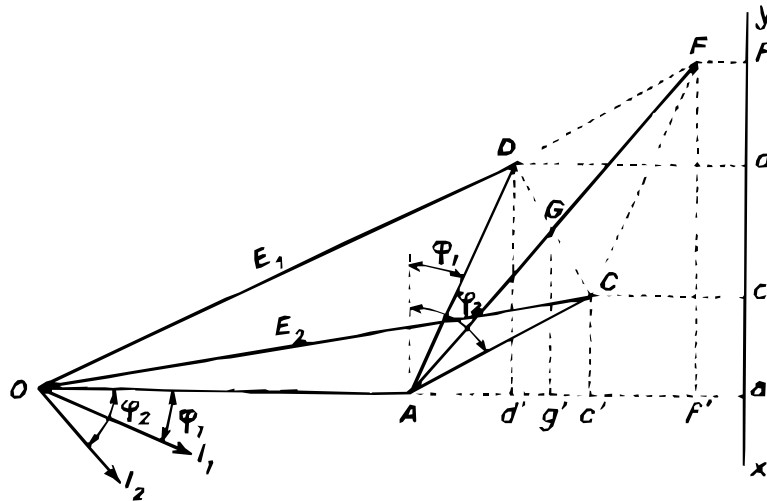


Figure 23

Sur un axe  $xy$  (Figure 23) perpendiculaire au vecteur  $OA = U$ , projetons en  $a, c, d, f$  les points  $A, C, D, F$ . Nous avons :

$$ad = AD \cos \varphi_1 = L\omega I_1 \cos \varphi_1 = \frac{L\omega}{U} \times UI_1 \cos \varphi_1$$

$$ac = AC \cos \varphi_2 = L\omega I_2 \cos \varphi_2 = \frac{L\omega}{U} \times UI_2 \cos \varphi_2$$

$$\text{Dès lors : } af = ac + cf = ac + ad = \frac{L\omega}{U} \times (UI_1 \cos \varphi_1 + UI_2 \cos \varphi_2).$$

Donc, à tension  $U$  constante, les vecteurs  $ad, ac, af$  représentent, à une même échelle, les puissances actives  $P_1, P_2, P$  de chacun des alternateurs et de leur ensemble.

3° Représentation des puissances réactives  $Q_1, Q_2, Q$  :

Projetons sur  $OA$  en  $c', d', f'$  les points  $C, D, F$ . Nous avons :

$$Ad' = AD \sin \varphi_1 = L\omega I_1 \sin \varphi_1 = \frac{L\omega}{U} \times UI_1 \sin \varphi_1$$

$$Ac' = AC \sin \varphi_2 = L\omega I_2 \sin \varphi_2 = \frac{L\omega}{U} \times UI_2 \sin \varphi_2.$$

$$\text{D'où, } Af' = Ac' + c'f' = Ac' + Ad' = \frac{L\omega}{U} (UI_1 \sin \varphi_1 + UI_2 \sin \varphi_2).$$

Donc, à tension  $U$  constante, les vecteurs  $Ad', Ac', Af'$  représentent, à la même échelle que celle des puissances actives, les puissances réactives  $Q_1, Q_2, Q$  de chacun des alternateurs et de leur ensemble.

## 7 Fonctionnement optimal à réaliser :

L'ensemble des deux alternateurs identiques en *parallèle* a le minimum de pertes Joule lorsque les puissances active et réactive des deux alternateurs sont égales.

Désignons en effet par :

$I_1, I_2, I$  les courants des alternateurs et du réseau ;

$I_{r1}, I_{r2}, I_r$  les composantes réactives de ces courants ;

$I_{a1}, I_{a2}, I_a$  les composantes actives de ces courants.

Nous avons pour expression des pertes Joule dans l'ensemble :

$$P_j = R(I_1^2 + I_2^2) = R(I_{a1}^2 + I_{r1}^2 + I_{a2}^2 + I_{r2}^2) = R\left[(I_{a1} + I_{a2})^2 - 2 I_{a1} I_{a2} + (I_{r1} + I_{r2})^2 - 2 I_{r1} I_{r2}\right].$$

Comme le courant du réseau alimenté est supposé sans changement :

$$I_{a1} + I_{a2} = I_a = C^{te} \text{ et } I_{r1} + I_{r2} = I_r = C^{te}$$

On voit <sup>2</sup>que le minimum de  $P$  correspondra aux égalités  $I_{a1} = I_{a2}$  et  $I_{r1} = I_{r2}$  c'est-à-dire, puisque la tension  $U$  est la même pour les deux alternateurs, à l'égalité de leurs puissances actives et réactives.

## 8 Comment on réalise le fonctionnement optimal :

Dans le graphe, la condition précédente se traduit de la façon suivante : il faut amener les points C et D au point de rencontre G des diagonales du parallélogramme ACDF. Notons bien que les puissances active  $af$  et réactive  $Af'$  du réseau étant supposées invariables, le vecteur AF est constant en grandeur et en direction et dès lors, si la tension  $U$  est constante (le point A devenant un point fixe), le vecteur AF est immuable.

### 1° Égalisation des puissances actives :

Nous avons montré que, par suite de la constance de sa vitesse, un groupe électrogène fournit la même puissance tant qu'on n'agit pas directement sur l'admission d'eau ou de vapeur. Cette opération qui revient à déplacer dans le sens vertical la caractéristique de réglage du moteur, s'exécute en déplaçant dans le sens vertical l'axe rotation O (Figure 10) du levier du régulateur.

Nous augmenterons donc l'admission dans le moteur de  $A_2$  ; nous la diminuerons simultanément dans le moteur de  $A_1$  sinon la caractéristique  $N(P)$  de l'ensemble (Figure 16) subirait une translation vers le haut et la puissance  $P$  demandée par le réseau et demeurée constante serait fournie à une vitesse supérieure. La fréquence aurait été augmentée.

Le réglage sera terminé lorsque les puissances  $P_1, P_2$ , indiquées par les wattmètres  $W_1, W_2$ , seront égales. Comme les excitations des deux alternateurs n'ont pas été modifiées, il en est de même de leurs f.é.m.  $E_1, E_2$ . Les points C et D se sont déplacés sur deux circonférences de centre O et de rayons OC, OD et, lorsque l'égalisation des puissances actives aura été réalisée, ont occupé les positions  $C_1D_1$  sur la normale menée par G à la droite xy.

### 2° Égalisation des puissances réactives :

<sup>2</sup> le produit de deux facteurs dont la somme est constante est maximal quand ces facteurs sont égaux.

A ce moment les courants  $I_1$ ,  $I_2$ , débités par les deux alternateurs et représentés par les vecteurs  $AC_1$ ,  $AD_1$  (non tracés) ne sont pas égaux. Il faut amener en G les points  $C_1$  et  $D_1$ . A cet effet, sans toucher aux régulateurs, c'est-à-dire sans modifier les puissances, nous diminuons l'excitation de  $A_2$ , et augmentons en même temps l'excitation de  $A_1$ <sup>1</sup> jusqu'à ce que les ampèremètres des deux alternateurs donnent la même indication :

$$I_1 = AG = I_2 = \frac{AF}{2} = \frac{I}{2}$$

Dés lors la marche optimale est réalisée. Nous retiendrons que :

- a) La puissance active est réglée par l'admission (opération mécanique) ;
- b) La puissance réactive est réglée par l'excitation (opération électrique).

REMARQUE 1. - Toute modification de la répartition des puissances actives doit être accompagnée du réglage d'au moins une des excitations sinon la tension U serait modifiée. En effet, pour qu'elle ne le soit pas, il faut que C et D soient toujours symétriques par rapport à G. Donc, lorsque C se déplace sur la circonférence de centre O et de rayon OC, il faut que D suive la circonférence ayant OC pour rayon et pour centre le point O' symétrique de O par rapport à G. La f. é. m.  $E_1 = OD$  n'est donc pas constante. Il faut par conséquent modifier l'une des excitations.

REMARQUE 2. - Quand on sous-excite un alternateur  $A_1$  sans toucher à l'admission, on voit que le courant  $AD = I_1$  qu'il débite décroît, passe par un minimum ( $\cos \varphi = 1$ ), puis croît (déphasage avant de  $I_1$  par rapport à  $U_1$ ). Il y a donc, pour un alternateur couplé, comme pour le moteur synchrone, un véritable réseau de courbes de Mordey.

REMARQUE 3. - Si les alternateurs ne sont pas d'égale puissance, on répartit les puissances actives (même raison que pour les transformateurs en parallèle) proportionnellement aux puissances nominales des deux machines. Quant aux puissances réactives, on amène sur la droite AF les points C et D et l'on reconnaît que l'opération est terminée (à défaut de phasemètres montés sur les alternateurs et sur les fils de départ) quand le courant dans ces derniers conducteurs est égal à la somme des courants des alternateurs en parallèle.

## 9 Mise en charge et découplage d'un alternateur :

De ce qui précède il résulte que, pour mettre en charge un alternateur tel que  $A_2$ , il faut :

a) Augmenter l'admission dans le moteur de  $A_2$ . Dans les centrales modernes ou sur les navires, cette opération s'effectue du tableau même ; de là en effet on commande un moteur électrique qui déplace, dans le sens convenable, le levier du régulateur (déplacement du point O de la Figure 10;

b) Augmenter ensuite l'excitation de  $A_2$ , et diminuer en même temps celle des autres de façon telle que les courants débités par tous les alternateurs soient en phase avec le courant dans le réseau. Pour le découplage, exécuter les opérations inverses.

---

<sup>1</sup> Sinon le milieu G de  $C_1D_1$  se déplace vers la gauche. C'est dire que la diagonale AF du parallélogramme  $AD_1FC_1$  subit une translation, ou bien que la tension  $OA = U$  diminue.

Diagramme de Behn Eschenburg de l'installation alimentée par un seul alternateur (avant couplage du 2<sup>e</sup> alternateur) :

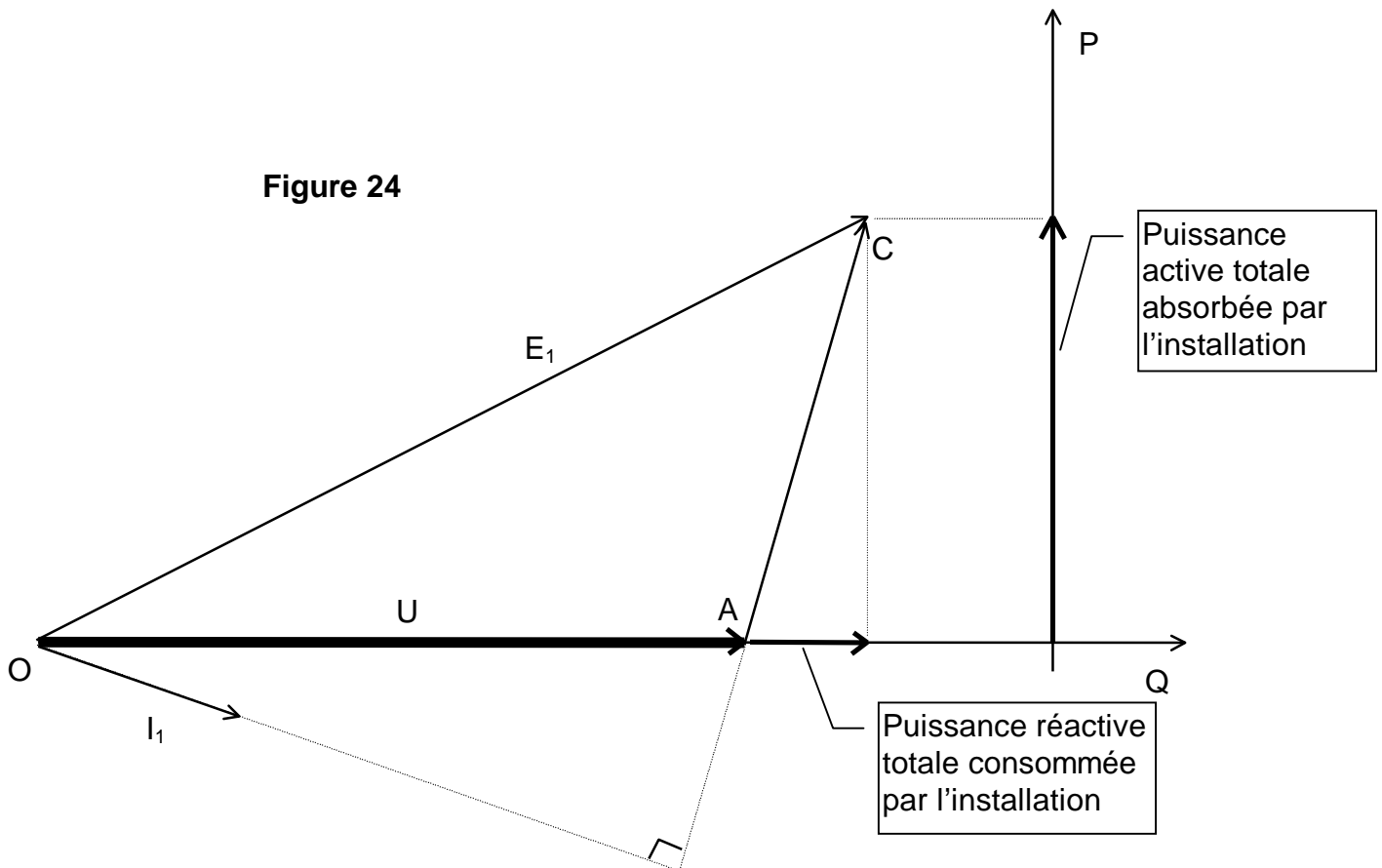


Diagramme de Behn Eschenburg de l'installation, le 2<sup>e</sup> alternateur venant juste d'être couplé :

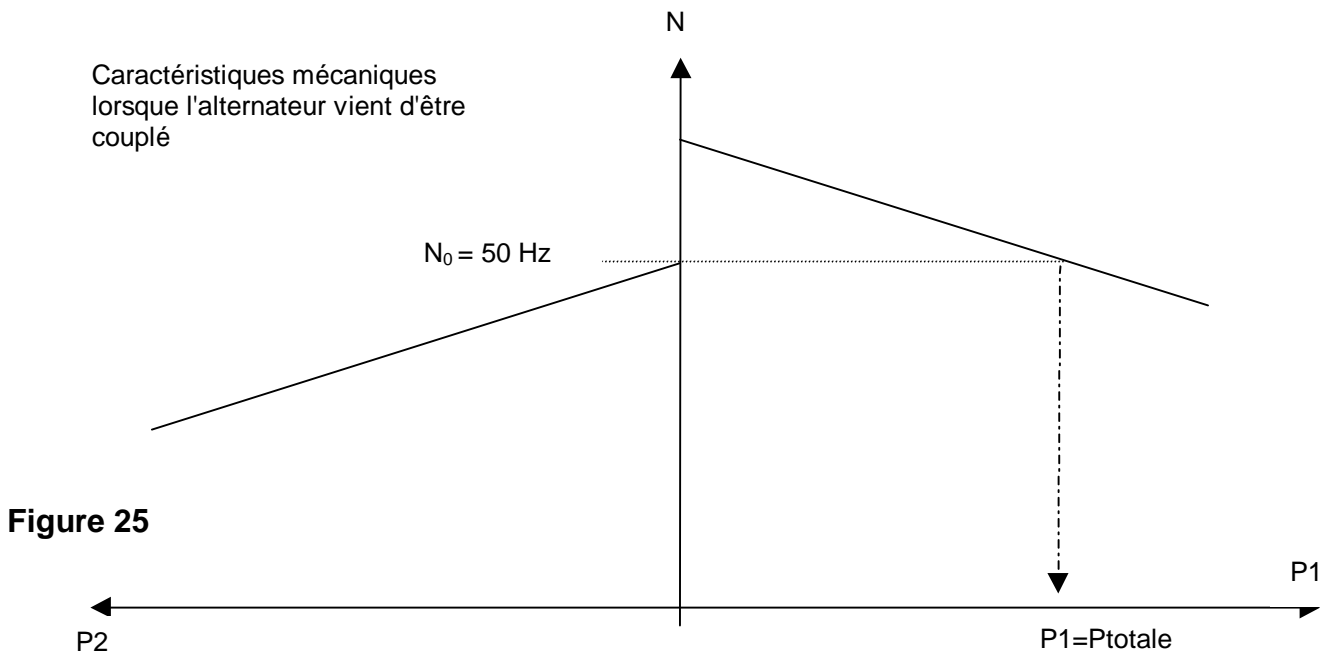


Figure 26

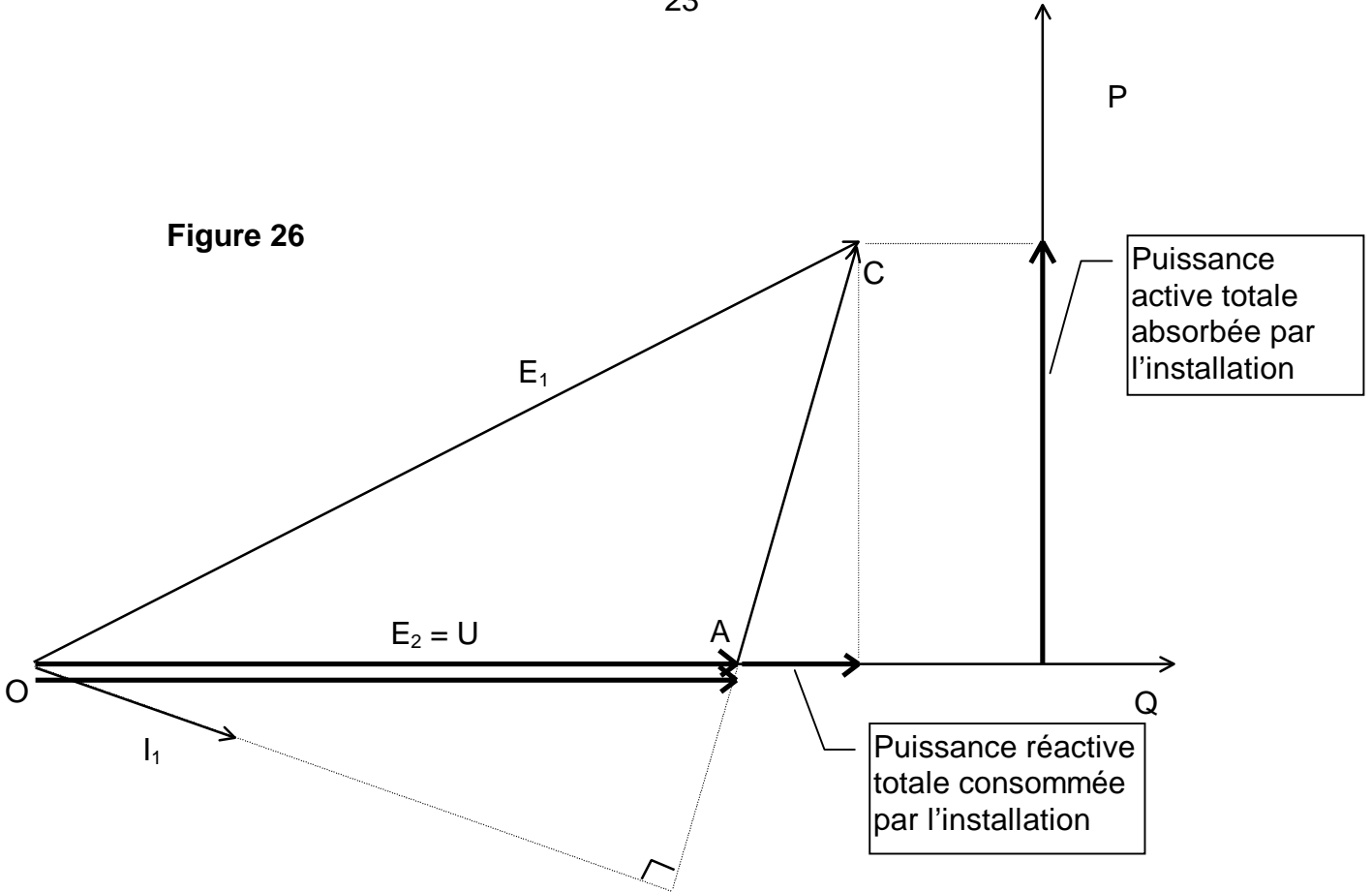


Diagramme de Behn Eschenburg de l'installation pendant et après l'égalisation des puissances actives (chaque alternateur fournit  $P_t/2$ ) :

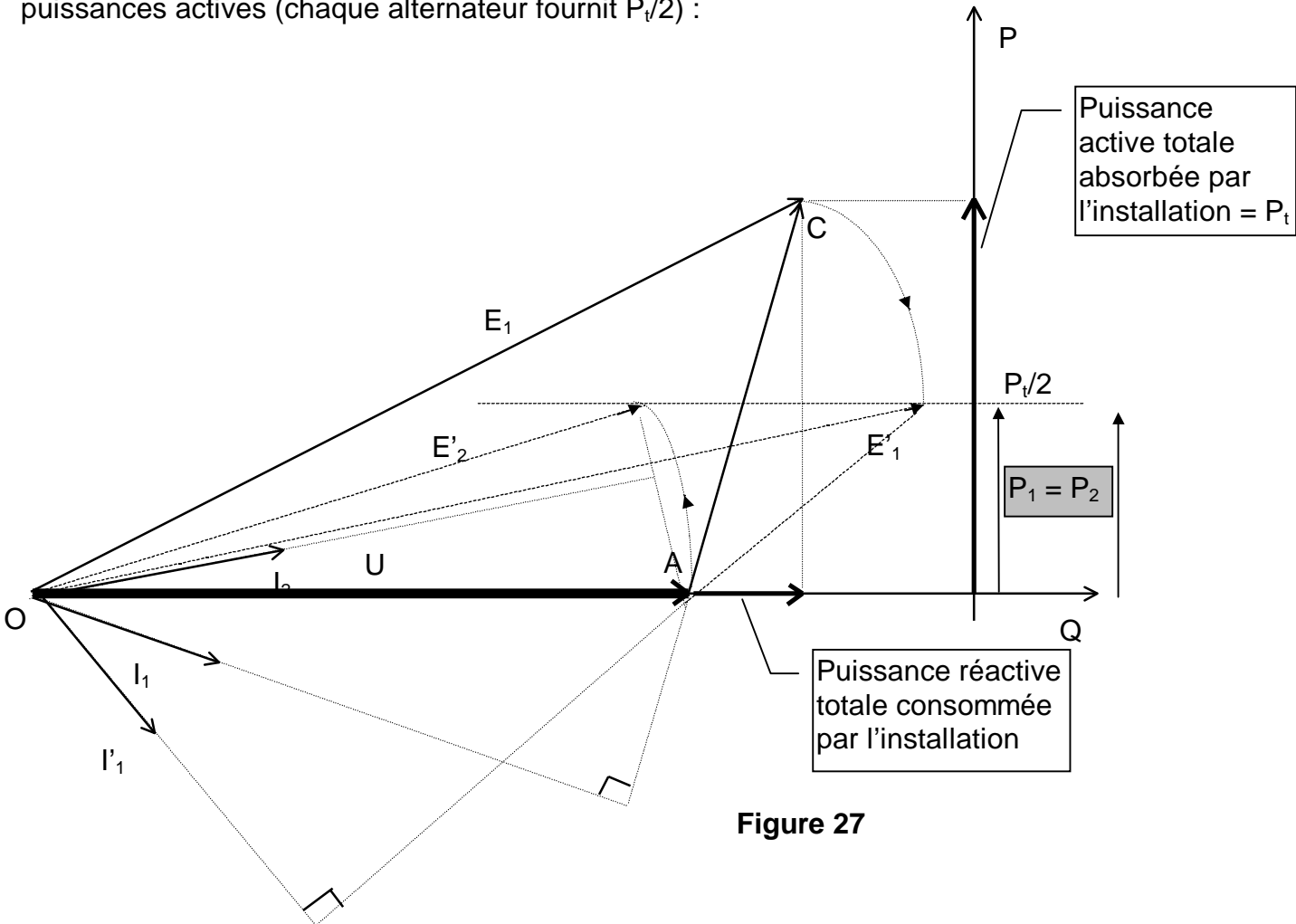
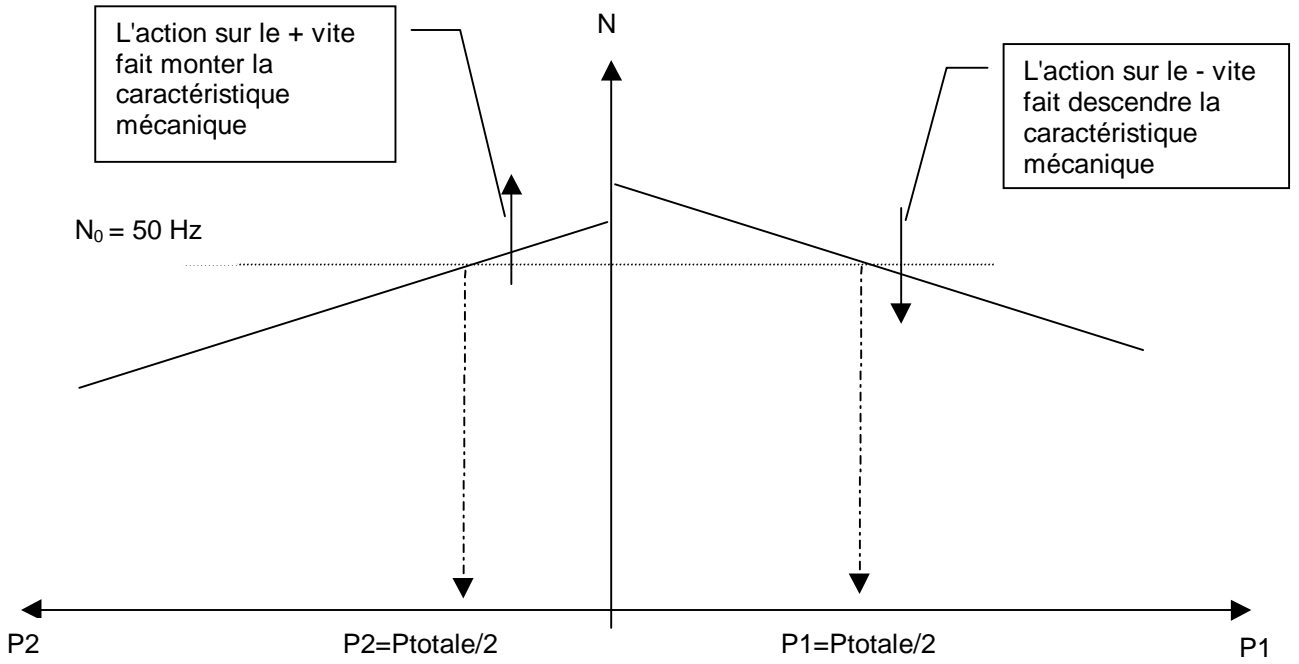
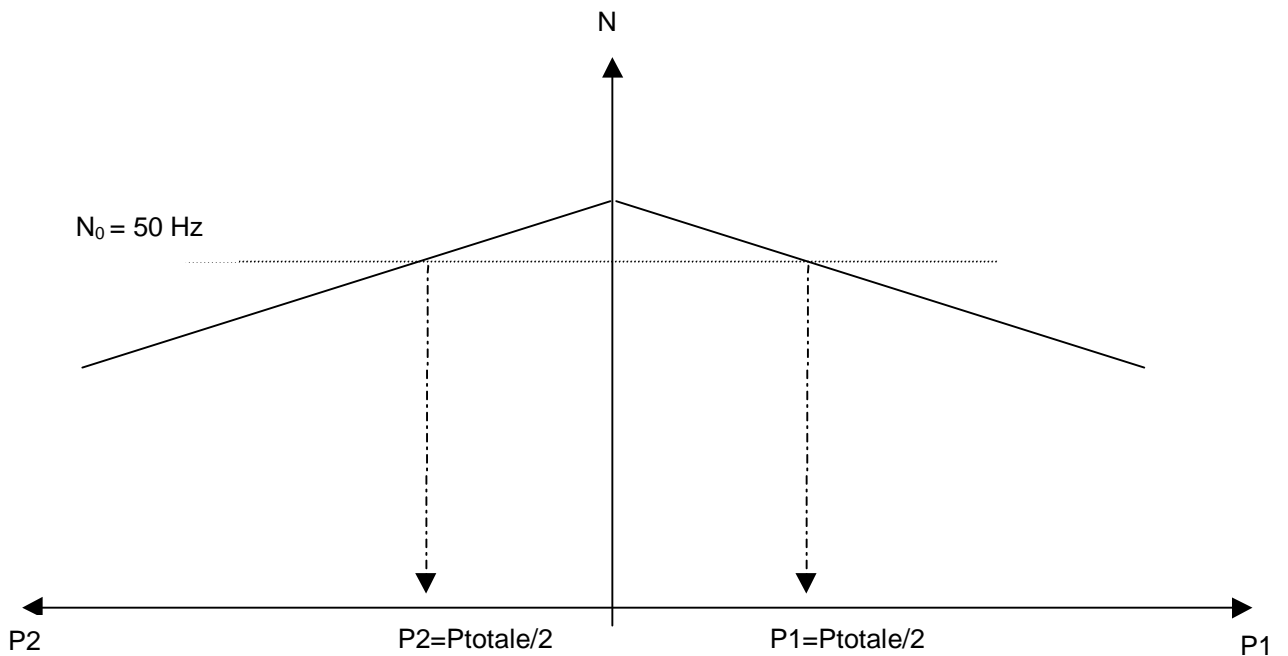


Figure 27



Allure des caractéristiques mécaniques pendant la répartition des puissances actives

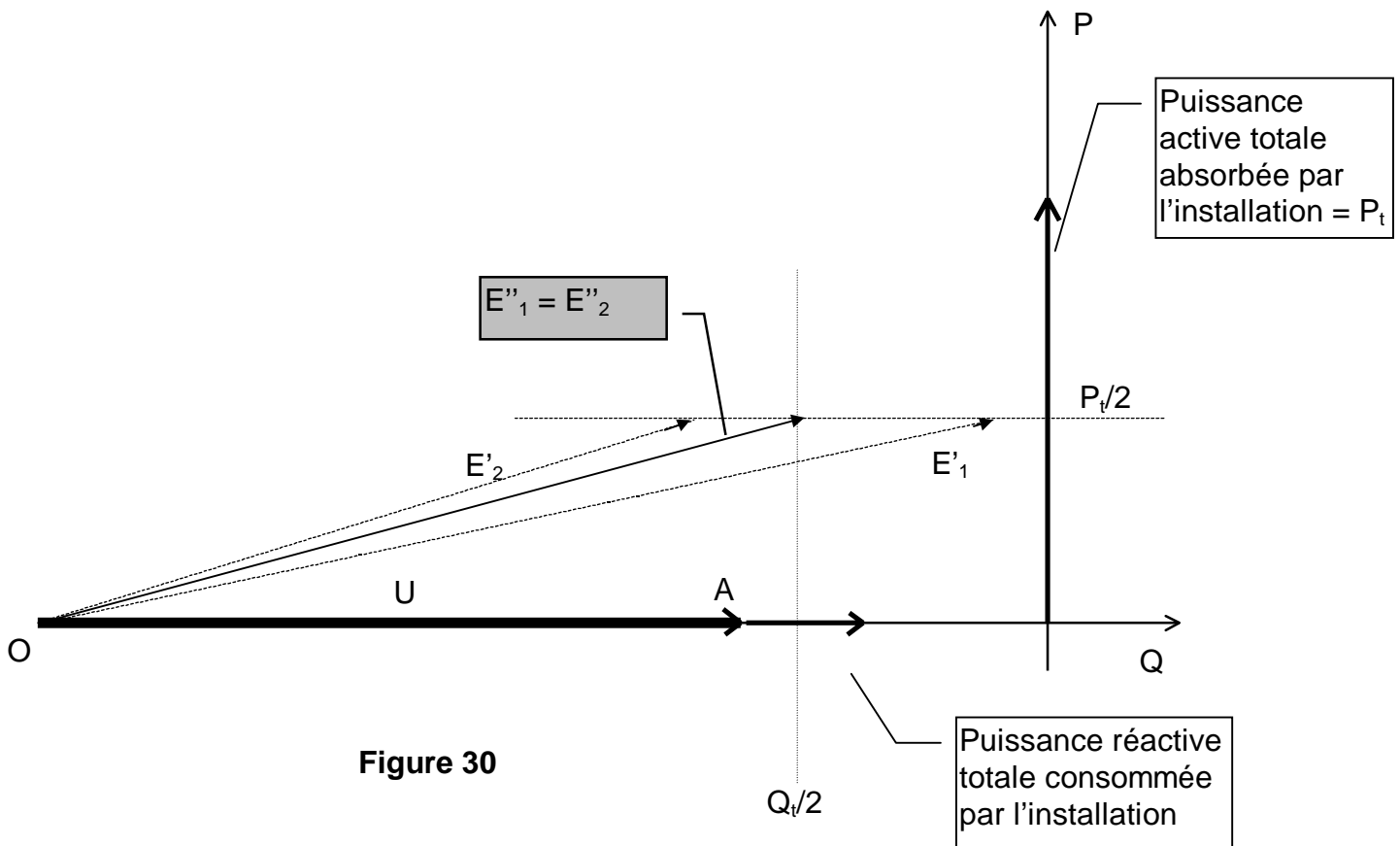
**Figure 28**



Allures des caractéristiques mécaniques une fois la répartition des puissances actives achevée. **Figure 29**



Diagramme de Behn Eschenburg de l'installation pendant et après l'égalisation des puissances réactives (chaque alternateur fournit  $Q_i/2$ ) :



## 10 Stabilité de la marche en parallèle :

Soient deux alternateurs A et B d'un même nombre de pôles tournant côte à côte en parallèle. Imaginons un observateur lié au rotor de A. Le rotor de B lui paraît immobile. Supposons à ce moment qu'une perturbation se produise (accroissement brusque du couple moteur ou du couple résistant dans la marche de B). L'observateur voit alors le rotor de B se déplacer par rapport à lui ; après quoi :

- Ou bien l'observateur voit le rotor de B reprendre, après quelques oscillations, sa position initiale ;
- Ou bien il voit le rotor de B poursuivre son déplacement relatif. Il y a alors décrochage de B.

De petites perturbations dans la marche d'un groupe électrogène étant inévitables, la marche en parallèle des alternateurs ne peut se concevoir que s'il existe un couple qui tend à ramener au synchronisme tout alternateur qui s'en écarte. Sous cette condition la marche en parallèle sera stable.

Le couple agissant sur l'alternateur a un caractère élastique. - Plaçons-nous dans les hypothèses suivantes :

- Excitation constante ( $E = C^{te}$ ) ;

b) Alternateur de puissance faible par rapport à celle du réseau ( $U = Cte$  ;  $f = C^{te}$ ) et considérons d'une part le graphe vectoriel de la Figure 31, d'autre part le graphe (Figure 32) de la variation du couple en fonction de  $\theta$  (décalage électrique de la roue polaire). Ces deux graphes sont identiques à ceux de la marche en moteur synchrone mais la puissance et le couple ont changé de signe.

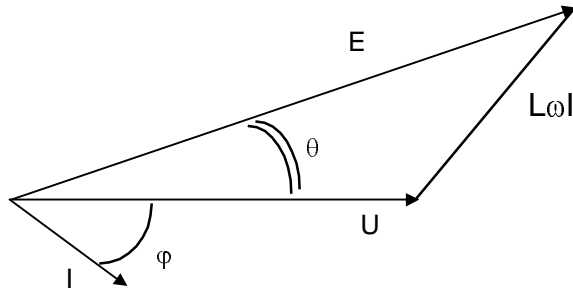


Figure 31

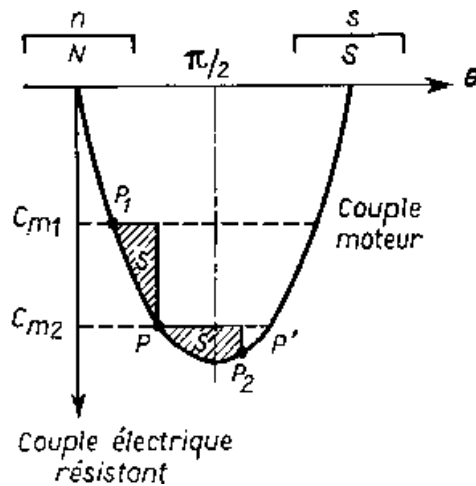
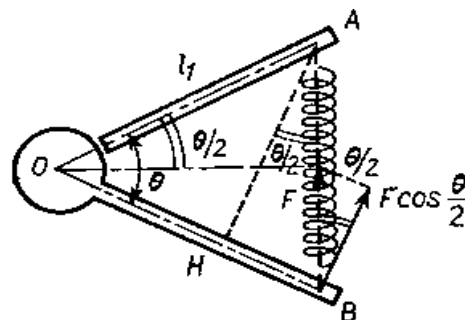


Figure 32

Les conclusions sont donc les mêmes :

- Quand on augmente le couple moteur appliqué à un alternateur, l'angle  $\theta$  augmente ; la puissance électrique, le couple résistant (opposé par l'alternateur à son moteur) augmentent en même temps que la vitesse jusqu'à une valeur maximale (pour  $\theta = \pi/2$ ).
- jusque là le fonctionnement est stable. Pour un décalage supérieur à  $\pi/2$ , la marche devient instable et l'alternateur se décroche (risque d'emballement).
- Tout se passe comme si, entre une manivelle portée par l'arbre du moteur et une manivelle portée par l'arbre de l'alternateur existait un ressort plus au moins tendu suivant la charge (Figure 33). Le couple appliqué par le moteur à l'alternateur a un *caractère élastique*.

Figure 33



## 11 Stabilité statique. Puissance synchronisante. Couple synchronisant :

### 11.1 Stabilité statique :

De ce qui précède il résulte que la stabilité *statique* de l'alternateur, celle qui correspond à des variations *lentes* et progressives du couple moteur ou du couple résistant, s'exprime par la condition  $\theta < \pi/2$ .

### 11.2 Puissance synchronisante :

Soit  $\theta_0$  le décalage électrique correspondant à une puissance  $P_0 = EU \sin \theta_0 / L\omega$ . Portons la puissance motrice à la valeur  $P_1 > P$ . Le décalage électrique devient  $\theta_0 + \Delta\theta_0$  tel que :

$$P_1 = \frac{EU}{L\omega} \sin(\theta_0 + \Delta\theta_0) = \frac{EU}{L\omega} (\sin \theta_0 \cos \Delta\theta_0 + \cos \theta_0 \sin \Delta\theta_0)$$

Si  $\Delta\theta_0$  est faible on a :

$$\cos \Delta\theta_0 \approx 1 \quad \text{et} \quad \sin \Delta\theta_0 \approx \Delta\theta_0$$

$$P_1 = \frac{EU}{L\omega} \sin \theta_0 + \Delta\theta_0 \times \frac{EU}{L\omega} \cos \theta_0 = P + \Delta\theta_0 \frac{EU}{L\omega} \cos \theta_0$$

L'alternateur a donc fourni un supplément de puissance :

$$P_1 - P = \frac{EU}{L\omega} \cos \theta_0 \times \Delta\theta_0$$

qui ralentit le groupe en le rappelant vers la vitesse de synchronisme et l'état d'équilibre.

Le rapport  $dP/d\theta$  qui s'exprime ici par :

$$P_s = \frac{P_1 - P}{\Delta\theta_0} = \frac{EU}{L\omega} \cos \theta_0 \quad \text{s'appelle la } \textit{puissance synchronisante} \text{ de l'alternateur pour le décalage électrique } \theta_0.$$

### 11.3 Couple synchronisant :

Le couple correspondant :

$$C_s = \frac{P_s}{\Omega} = \frac{EU}{\Omega \times L\omega} \cos \theta_0 \quad (\Omega = \text{vitesse synchronisme}) \quad \text{est appelé } \textit{couple}$$

*synchronisant*. C'est le couple synchronisant qui, comme la variation du couple élastique sus mentionné, ramène au synchronisme toute roue polaire qui tend à s'en écarter.

Le régulateur de la turbine n'intervient pas pour maintenir cette vitesse. Il n'agit que pour régler la puissance fournie au réseau<sup>3</sup>.

Comment on accroît la stabilité statique. - La stabilité statique de l'alternateur est évidemment d'autant meilleur que le couple synchronisant est plus grand. De son expression il résulte que pour accroître cette stabilité (mêmes conclusions que pour le moteur synchrone) :

<sup>3</sup> Un alternateur couplé sur un réseau peut se passer de régulateur de vitesse. Il marche alors à puissance active constante (marche dite sur programme). C'est la marche adoptée pour les petits alternateurs couplés sur le réseau, le régulateur étant remplacé par un simple limiteur *d'ouverture*.

1° Le *constructeur* réalise - avec un grand entrefer - une faible réaction d'induit (diminution de  $L$ ).

2° L'*exploitant* note que :

- Cette stabilité est *maximale à vide* ( $\theta_0 = 0$ ) ;
- Elle est plus *grande* quand l'*excitation* est plus *poussée* ( $E$  grand) ;
- En cas de *court-circuit* ( $U \approx 0$ ) elle devient *très petite* (risque de décrochage) ;
- En cas de marche en parallèle de *plusieurs centrales* reliées par une ligne d'interconnexion le couple synchronisant est *réduit par la réactance  $L'\omega$  de la ligne* (qui s'ajoute à  $L\omega$ ). D'où la *faible stabilité* de centrales interconnectées par une *longue ligne*, Mais le couple synchronisant garde sa pleine valeur entre les machines d'une même centrale.

.Accroissement **brusque** du couple **moteur**. Stabilité dynamique. - Un accroissement *brusque* de la puissance électrique n'offre aucun risque. Il ralentit la roue polaire et si ce ralentissement porte le vecteur  $E$  au-dessous du vecteur  $U$ , la machine marche en moteur et son couple s'ajoutant à celui de la turbine le rotor reprend de la vitesse et trouve son nouvel équilibre.

Mais un *brusque* accroissement du couple moteur (dérèglement du régulateur) accroît la vitesse de la roue polaire. Le décalage électrique  $\theta$  augmente.

Les phénomènes qui se produisent alors sont les mêmes (mais avec inversion des décalages et des couples) que ceux que nous avons décrit dans l'étude du moteur synchrone : il y a un décalage *limite* qui peut être supérieur à  $\pi/2$  correspondant au décrochage. Il définit la *stabilité dynamique* de l'alternateur.

## 12 Conséquences des fautes de couplage :

Les limites admissibles des écarts de tension, de fréquence, de synchronisme sont :

- tensions : + ou - 5%,
- fréquences : 0,1 à 0,5 Hz, et avant le couplage on choisit  $f_{alt} > f_{réseau}$ ,
- synchronisme ou phase :  $5^\circ \text{ max} \Rightarrow \Delta U = 40 \text{ V}$ .

En dehors de ces limites, trois fautes peuvent être commises lors du couplage d'un alternateur sur des barres.

### 12.1 Inégalité des tensions :

Le graphe (Figure 3) montre que si les vecteurs  $U$  (représentant la tension entre les barres) et  $E$  sont en phase mais inégaux, le courant dans l'alternateur  $A$  (courant représenté par la différence de ces deux vecteurs) sera entièrement réactif. Il ne produira aucun couple sur l'alternateur au moment du couplage, mais s'il est excessif, il pourra déterminer dans les enroulements de dangereuses forces électrodynamiques.

### 12.2 Différence de phases entre la F.É. M. E de l'alternateur et la tension $U$ entre barres :

Elle donne lieu entre l'alternateur et les barres à un courant  $AB$  () qui est surtout actif et qui correspond à un couple moteur ou résistant suivant que  $E$  est déphasé en arrière ou en avant de  $U$ . Si ce couple, qui se produit brusquement à la fermeture de l'interrupteur de couplage, est important (grand déphasage entre  $E$  et  $U$ ), il peut

déterminer une rupture d'arbre ou une détérioration de l'accouplement entre le moteur et l'alternateur.

### 12.3 Différence des fréquences :

Dans ce cas la roue polaire parcourt un certain angle  $\theta/p$  jusqu'à ce que sa vitesse soit exactement égale à la vitesse de synchronisme. Si l'alternateur tourne trop vite, avant le couplage, il prendra rapidement de la charge, ce qui pourra provoquer, par décalage en arrière des roués polaires des autres alternateurs, la marche en moteur de certains d'entre eux et par conséquent le fonctionnement intempestif de relais à retour d'énergie. Par ailleurs, si la roue polaire s'avance d'un angle excessif, l'alternateur risque de se décrocher.

Signalons enfin que les conséquences d'un mauvais couplage par différence de phases ou de fréquences sont aggravées par les oscillations pendulaires auxquelles ces fautes donnent lieu.

## 13 Oscillations ou pompages des alternateurs en parallèle :

La marche des alternateurs en parallèle est parfois affectée d'oscillations de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. On les appelle couramment des *pompages*. Suivant leur cause, on les divise en trois catégories :

### 13.1 Oscillations propres ou libres :

Soit un alternateur en marche de régime avec le décalage électrique  $\theta_0$ . Dans l'hypothèse de Behn Eschenburg, à excitation constante et avec la résistance d'induit négligeable, le graphe  $C(\theta)$  du couple en fonction du décalage électrique est une portion de sinusoïde. Nous pouvons donc écrire :

$$C = C_m \sin \theta \quad \text{et} \quad \frac{dC}{d\theta} = C_m \cos \theta$$

et pour  $\theta = \theta_0$  on a :

$$C_0 = C_m \sin \theta_0$$

Soit  $\alpha = \theta/p$  le décalage mécanique de la roue polaire.

Si à partir de l'état défini par  $\theta_0$  nous appliquons un *choc*  $\Delta C$  au rotor le décalage mécanique  $\Delta\alpha_0 = \Delta\theta_0/p$  qui en résulte (à partir de la position relative d'équilibre) est tel que l'on ait :

$$\frac{\Delta C}{\Delta\theta_0} = \frac{\Delta C}{p\Delta\alpha_0} = C_m \cos \theta_0$$

Le couple de rappel par radian à partir de la position  $\alpha_0$  est  $\Delta C/\Delta\alpha_0 = pC_m \cos \theta_0$ . Il est constant. C'est dire que le rotor constitue un système *pendulaire* dont la période si l'on néglige les couples d'amortissement a pour expression :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\text{moment d'inertie}}{\text{couple de rappel par radian}}} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{pC_m \cos \theta_0}}$$

et qui, autour de la position définie par  $\theta_0$ , exécute des oscillations de période T si J désigne le moment d'inertie de la roue polaire <sup>4</sup>.

La période des oscillations propres dépend des constantes électriques et mécaniques de l'alternateur, mais aussi de la puissance P qu'il fournit lorsqu'il subit la perturbation qui a provoqué les oscillations. La période des oscillations propres varie généralement de 0,5 à 1,5 secondes.

Les oscillations propres sont gênantes parce qu'elles rendent périodique, à basse fréquence, la F. É. M, et le courant débité. C'est pourquoi on les amortit à l'aide d'amortisseurs Leblanc.

### **13.2 Oscillations forcées imputables au moteur :**

Lorsqu'un alternateur est mû par un moteur agissant par bielle et manivelle (machines à vapeur à piston, moteurs à combustion interne), le couple moteur instantané n'est pas constant. Autour de sa valeur moyenne qui, en régime établi, est égale au couple résistant, ce couple moteur varie périodiquement, autrement dit joue, par rapport à l'alternateur (résonateur), le rôle d'un système exciteur.

On démontre que le couple périodique a pour effet, suivant les cas, soit d'augmenter, soit de diminuer l'amplitude des oscillations libres de la machine. Ce qui est surtout à redouter, c'est qu'une résonance s'établisse entre le couple exciteur et les oscillations libres : les pompages prendraient une amplitude telle que le décrochage s'ensuivrait.

On réduit l'amplitude des oscillations forcées par l'emploi de volants de grand moment d'inertie.

### **13.3 Oscillations imputables au régulateur :**

Supposons une augmentation brusque de la puissance électrique absorbée par le réseau. Le couple résistant augmentant, les alternateurs ralentissent ; leurs régulateurs ouvrent l'admission, mais, par suite de leur inertie, dépassent la position correspondant à l'équilibre du nouveau couple moteur et du nouveau couple résistant.

D'où une série d'oscillations du régulateur autour de sa nouvelle position d'équilibre ; elles se répercutent évidemment sur la vitesse de l'alternateur et sont très gênantes parce qu'elles ont une longue période et dès lors sont faiblement amorties par les amortisseurs Leblanc.

On diminue leur importance par l'emploi de régulateurs légers - c'est-à-dire ayant une faible inertie - assez fortement *amortis* et ayant une insensibilité suffisante pour ne pas entrer en action sous l'effet des oscillations pendulaires.

---

<sup>4</sup> Dans le groupe électrogène, sans amortissement, il faut, pour exprimer la période d'oscillation donner à J la somme des moments d'inertie des rotors de la turbine et de l'alternateur.

## 14 Protection des alternateurs :

### 14.1 Généralités :

L'alternateur doit être rapidement déconnecté du réseau en cas de problèmes. D'une part pour éviter qu'il ne soit endommagé ou détruit, d'autre part afin d'éviter de perturber le réseau. Ainsi les pôles du disjoncteur de couplage s'ouvrent en cas de :

- court-circuit (un relais magnétique à maximum d'intensité par phase),
- surcharge,
- manque de tension alternateur,
- surtension,
- retour de puissance (afin d'éviter que la machine synchrone ne fonctionne en moteur et n'entraîne le diesel ou la turbine, ce qui n'est pas le but recherché !),
- protection différentielle contre les défauts interne de l'alternateur (vérification que  $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 \approx 0$ ),
- défaut masse,
- protections de la machine qui entraîne l'alternateur (survitesse, pression d'huile, température échappement, palier, ...).

### 14.2 Protection et surveillance des petits alternateurs et services auxiliaires de centrales électriques :

Pour leurs exploitants, les installations de production d'électricité de la gamme inférieure des puissances, telles les centrales hydroélectriques, éoliennes, à turbines à gaz ou industrielles, sont tout aussi importantes que les grandes unités et détiennent en général un rôle bien défini dans le concept de la fourniture d'énergie. Les dispositifs de protection doivent donc être sélectionnés soigneusement et utilisés correctement. Des exigences analogues se présentent pour tous les services auxiliaires des centrales électriques.

Des installations de protection numériques à interfaces série peuvent communiquer avec d'autres appareils de protection ou de contrôle-commande et permettent ainsi de réaliser un nouveau concept de protection et de technique de contrôle-commande. Ceci est également valable dans les petites installations, on obtient ainsi de manière économique une disponibilité plus élevée, grâce à une autosurveillance permanente, une meilleure saisie des événements et des enregistreurs de défauts, ainsi qu'un meilleur échange d'informations entre les différents niveaux de la centrale.

Lors du choix des appareils de protection pour alternateurs jusqu'à environ 30 MVA, l'exploitant est généralement essentiellement intéressé à des solutions de prix avantageux. En cas de défaut primaire, des déclenchements sélectifs et rapides sont pourtant également demandés et revêtent un rôle fondamental, tant pour la stabilité du réseau que pour la limitation des dommages survenant sur l'objet protégé.

La communication entre les appareils et leurs fonctions développe considérablement les possibilités des fonctions de protection, de commande et de surveillance. Ce concept d'une technique secondaire unifiée et globale permet en outre d'exploiter les stations sans présence de personnel.

Avantages de la technique digitale :

L'application de la technique digitale procure des avantages essentiels :

- Étant donné que tous les dispositifs de protection numériques possèdent une autosurveillance, la disponibilité s'accroît très fortement et les cycles de maintenance peuvent être adaptés et prolongés.
- Les dépenses de câblage diminuent, vu que les fonctions sont surtout déterminées par le logiciel. Il en résulte en outre une souplesse accrue lors des modifications et des compléments ultérieurs.
- Lorsqu'elle est branchée sur un système de communication, la technique numérique fournit de grands avantages en ce qui concerne le confort d'utilisation, les traitements, l'établissement des protocoles la mesure et la saisie des réactions des différents appareils.
- Par l'interconnexion à l'aide d'interfaces série avec la technique de contrôle-commande, les paramètres, les signaux, les valeurs de mesure, les ordres, ainsi que les informations complémentaires concernant l'environnement peuvent être échangés rapidement et sûrement.
- Conjointement avec un système de contrôle-commande de station, on obtient une amélioration considérable des possibilités d'analyse des défauts primaires. Dans les installations de protection numériques, le diagnostic de l'état des appareils est bien entendu inclus.
- Par la technique numérique, toute la conduite de l'exploitation est fortement influencée. A côté de la saisie des défauts et du rétablissement du réseau, on dispose de possibilités toutes nouvelles pour le traitement des défauts, ainsi que pour la télécommande et les réglages.
- Avec cette technique, les auxiliaires peuvent également être protégés sûrement et les dérangements éventuels peuvent être saisis, de sorte que leur disponibilité atteint celle des machines principales.
- L'interconnexion des fonctions de surveillance et de protection dans un système procure une bonne vue d'ensemble et des informations complètes au sujet des différents niveaux du système. Les valeurs restent conservées en cas de défaut et peuvent être appelées à volonté.
- L'aptitude d'adaptation aux modifications d'états dans le circuit primaire, (par ex.) par des manœuvres de commutation ou de grands changements de charge, est améliorée. C'est ici que le comportement adaptatif de la fonction de protection revêt toute son importance. Cette propriété peut se réaliser plus facilement avec des dispositifs de protection numériques.

Les avantages des dispositifs de protection numériques ne parlent pas seulement en faveur de l'équipement de nouvelles installations, mais aussi de la modernisation d'installations existantes.

Nouveaux concepts de protection :

Même les petites machines peuvent être protégées par des appareils de protection d'alternateurs numériques, au lieu de relais individuels comme jusqu'ici.

Les fonctions de protection ne se sont pas modifiées et sont données par le logiciel. La nouveauté du concept de protection réside dans des algorithmes améliorés pour différentes fonctions de protection et dans les possibilités d'adaptation aux changements des conditions d'exploitation. Dans ce cas, les critères qui fournissent des avertissements précoces permettant d'éviter des déclenchements inutiles de la machine sont particulièrement précieux. Si les grandeurs influentes sont surveillées directement et si les modifications sont constatées de bonne heure, on peut le plus souvent éviter des situations inadmissibles.



Le tableau ci-dessous montre un concept de protection et de surveillance possible, en tenant compte de la puissance de l'alternateur.

Fonction de protection	Puissance de l'alternateur			
	0,5 à 1 MW	1 à 5 MW	5 à 10 MW	> 10 MW
rotor : surcharge	O	O	X	X
rotor : court-circuit à la terre	O	O	X	X
protection différentielle de l'alternateur	O	X	X	X
protection différentielle du transformateur de tranche	O	X	X	X
sous et surfréquence	X	X	X	X
surtension	X	X	X	X
stator : court-circuit à la terre (95%)	O	X	X	X
défaillance de l'excitation	O	O	X	X
retour de puissance active	O	O	X	X
impédance minimale	-	-	O	O
dissymétrie	O	X	X	X
surintensité	X	X	X	X
sous-tension	X	X	X	X

X : fonctions recommandées,  
O : option,

Les équipements de protection numériques permettent une adaptation optimale à l'objectif à protéger. Différents appareils de protection numériques d'alternateurs sont disponibles pour l'adaptation optimale à l'objectif à protéger.

Ils disposent le plus souvent d'une interface série et peuvent communiquer avec le système de contrôle-commande de la station ou avec d'autres appareils équipés de manière correspondante. Les fonctions de protection requises peuvent se choisir dans une bibliothèque avec des matériels unifiés, ou bien les matériels sont adaptés à des fonctions de protection spécifiques. En tenant compte de la redondance requise (deux appareils) et du nombre des entrées et sorties analogiques en relation avec l'extension de la protection et les exigences, on choisit l'un ou l'autre de ces appareils de protection.

Les fonctions de protection sont attribuées à un canal d'entrée quelconque à l'aide de paramètres ajustables. Ces appareils possèdent un calculateur principal, ils peuvent être optimisés pour de petites machines, des installations auxiliaires pour centrales électriques et pour des fonctions réparties. Le réglage de temporisations, des caractéristiques de réponse et des valeurs, ainsi que l'attribution des canaux de déclenchement et de signalisation s'effectuent à l'aide d'ordinateurs personnels [PC], par le biais d'une communication homme-machine. Des connaissances particulières en programmation ne sont généralement pas nécessaires à cet effet.

## 15 Coupleurs automatiques :

### 15.1 Généralités :

Chacun des groupes électrogènes d'une centrale, susceptible de participer à la production d'électricité, comporte, d'une façon générale :

- Un régulateur de tension chargé de maintenir, au statisme près, la tension aux bornes à une valeur prédéterminée  $U_0$  quelles que soient les variations des conditions de fonctionnement (charge, facteur de puissance, fréquence, etc...) à l'intérieur de certaines limites.
- Un régulateur de fréquence chargé de maintenir, au statisme près, la fréquence à la valeur prédéterminée  $F_0$  quelles que soient les variations des conditions de fonctionnement (charge, caractéristiques d'alimentation en vapeur ou en combustible, etc...) à l'intérieur de certaines limites.

Les valeurs de consigne  $U_0$  et  $F_0$  sont réglables par action sur les régulateurs localement ou, au moyen de servo-moteurs, à distance.

La mise en service et l'utilisation d'un groupe électrogène nécessitent les opérations successives suivantes :

- a) montée en vitesse et en tension
- b) lorsque le groupe doit être couplé avec une autre source, égalisation relativement précise des fréquences et des tensions:
- c) couplage à l'instant d'une concordance des phases puis,
- d) répartition correcte des charges actives et des charges réactives entre les différentes sources couplées, la fréquence et la tension communes étant, bien entendu, maintenues à leurs valeurs de consigne.

La montée en vitesse, l'égalisation des fréquences et la répartition des charges actives sont obtenues par action sur le servo-moteur du variateur de vitesse (qui fixe le point de consigne du régulateur de vitesse

La montée en tension, l'égalisation des tensions et la répartition des charges réactives sont obtenues par action sur le variateur de tension.

Il existe de nombreux degrés d'automatisation, par exemple :

- a) la décision de couplage d'un groupe est laissée à l'initiative de l'opérateur ; le coupleur réalise alors automatiquement les opérations décrites ci-dessus
- b) cette décision est prise par notre appareillage sur les données du répartiteur. Toutes les manœuvres sont alors réalisées automatiquement.

On aboutit, à la limite, à une centrale de production entièrement automatique, sans aucune intervention humaine, où la configuration de la centrale s'adapte aux besoins des utilisateurs à chaque instant.

NOTA :

Les alternateurs modernes comportent des régulateurs de tension qui s'adaptent automatiquement aux différents régimes de fonctionnement, en conséquence, les

dispositifs SYNALFA ne comportent normalement aucun moyen d'action sur les régulateurs de tension. On se contente généralement de vérifier la "présence" de tension. Bien entendu, si nécessaire, le contrôle automatique de tension pourrait être assuré par un dispositif SYNALFA adapté.

## **15.2 Performances des dispositifs SYNALFA 2407 :**

### 15.2.1 Processus de couplage manuel :

Dans les installations non automatiques, l'opérateur humain a la charge d'agir sur les commandes "  $\pm$  vite " du groupe électrogène pour :

- Égaliser les fréquences puis les phases du groupe et des "barres", sur la foi des indications du fréquencemètre puis du synchronoscope, avant de donner l'ordre de couplage.
- Répartir la charge globale entre les groupes couplés, tout en maintenant la fréquence d'ensemble à la valeur nominale; sur la foi des indications des wattmètres particuliers et du fréquencemètre.

Bien entendu, l'utilisateur désire que l'appareillage automatique fasse au moins aussi bien que l'opérateur humain, c'est-à-dire :

- Que le couplage doit être réalisé aussi rapidement que possible sans cependant prendre un risque trop important de couplage "hors phase",
- Que la fréquence ne s'écarte pas trop de sa valeur nominale pour de larges variations de charge et pendant un temps important,
- Que les charges soient réparties au mieux.

On peut noter que la précision est de l'ordre de 1% sur la fréquence et de 2 à 5% sur la répartition des charges. En automatique, la rapidité de réponse ne pose pas de problème. on doit simplement la limiter pour éviter un "pompage" gênant.

En conduite manuelle, après couplage, l'opérateur n'a pas constamment les yeux fixés sur les appareils de mesure et "laisse passer" par conséquent des perturbations sans agir ou bien assure la correction nécessaire avec un certain retard. Dans le cas où le nombre de groupes est important, la conduite manuelle peut devenir délicate.

L'appareillage automatique n'a pas les "distractions" d'un opérateur. Il pourrait donc avoir une tendance à la sévérité consistant à agir trop souvent, ce qui n'est pas non plus souhaitable pour une bonne durée de vie des éléments de correction (servomoteur et régulateur par exemple).

Les SYNALFA possèdent des moyens de réglage de ces réactions dans une large zone, permettant de déterminer expérimentalement le meilleur compromis. Ces moyens sont décrits ci-après.

### 15.2.2 Réglage des régulateurs :

Préalablement à ces réglages, les régulateurs des machines doivent être ajustés comme à l'habitude :

- Egalité des statismes relatifs assurant déjà une bonne répartition naturelle des charges.
- Mise au point des régulateurs de tension.
- Si possible réglage des vitesses d'action des servo-moteurs de régulateurs de vitesse pour obtenir des vitesses de réaction équivalentes sur les différents groupes de la centrale.

### 15.3 Description générale :

On peut distinguer, dans un SYNALFA 2407, les fonctions suivantes :

1 - Synchroniseur qui a pour rôle d'amener automatiquement , un groupe aux fréquence et phase voisines de celles des barres avant couplage.

2 - coupleur qui vérifie que les écarts relatifs de fréquence et de phase et que le glissement relatif sont inférieure à des valeurs prédéterminées et ordonne alors la fermeture du disjoncteur de couplage.

En fait, comme il est traditionnel, on appelle coupleur l'ensemble du synchroniseur et du coupleur proprement dit.

3 - Répartiteur de charges actives qui assure automatiquement la répartition des charges entre groupes couplés et le maintien de la fréquence commune à sa valeur nominale (\*).

Le mode de répartition des charges le plus communément utilisé est l'équipartition c'est-à-dire l'affectation à chaque groupe couplé d'une quote-part de la charge globale proportionnelle à sa puissance nominale.

Bien d'autres modes peuvent être assurés. On trouvera des exemples de réalisations effectives dans la suite du texte.

(\*) Contrairement à certains dispositifs concurrents qui laissent subsister un statisme "fréquence/charge globale".

#### 15.3.1 Description de la partie coupleur :

Le coupleur peut se décomposer en :

- Un synchroniseur dont le rôle est d'amener l'alternateur à coupler en synchronisme avec l'alternateur en fonctionnement. (ou les barres).
- Un coupleur proprement dit, qui donne l'ordre de fermeture

du disjoncteur de couplage lorsque les conditions requises sont atteintes.

Ces deux fonctions sont intimement liées, des circuits leur étant communs. Pour mémoire : - alimentations avec régulation nécessaires à ces différentes parties.

### 15.3.2 Synchroniseur :

Le synchroniseur reçoit ses informations par l'intermédiaire de transformateurs de tension connectée aux deux sources à coupler qu'on repère généralement "ALTER" et "BARRES". Ces transformateurs remplissent le même rôle vis-à-vis du coupleur proprement dit.

### 15.3.3 Détection d'écart de fréquence :

#### 1.1. - Mémoire avance retard (voir diagramme ci-dessous)

Ce circuit est destiné à connaître l'état de la fréquence de la source "ALTER" par rapport à celle de la source "BARRES" de manière à élaborer les ordres + vite et - vite judicieusement.

Pour cela on positionne une mémoire (bascule à transistors) de la manière suivante

Après une concordance de phase des deux tensions à coupler on fait monter la sortie  $Y$  de la mémoire quand la tension "ALTER" passe par zéro ultérieurement au passage à zéro de la tension "BARRES"; la sortie complémentaire de cette mémoire  $\bar{Y}$  tombe à zéro. Lorsque les tensions "ALTER" et "BARRES" sont en opposition on réarme la mémoire :  $Y$  tombe à zéro,  $\bar{Y}$  monte à 24 V.

Cette configuration est caractéristique d'une tension "ALTER" à fréquence trop basse ; elle devra donner un ordre + vite.

Si la fréquence de la tension "ALTER" est trop haute on positionne la mémoire, après la concordance de phase, en inverse soit  $Y$  à zéro,  $\bar{Y}$  à 18 V ; à l'opposition de phase suivante on réarme la mémoire  $Y$  à 18 V,  $\bar{Y}$  à zéro.

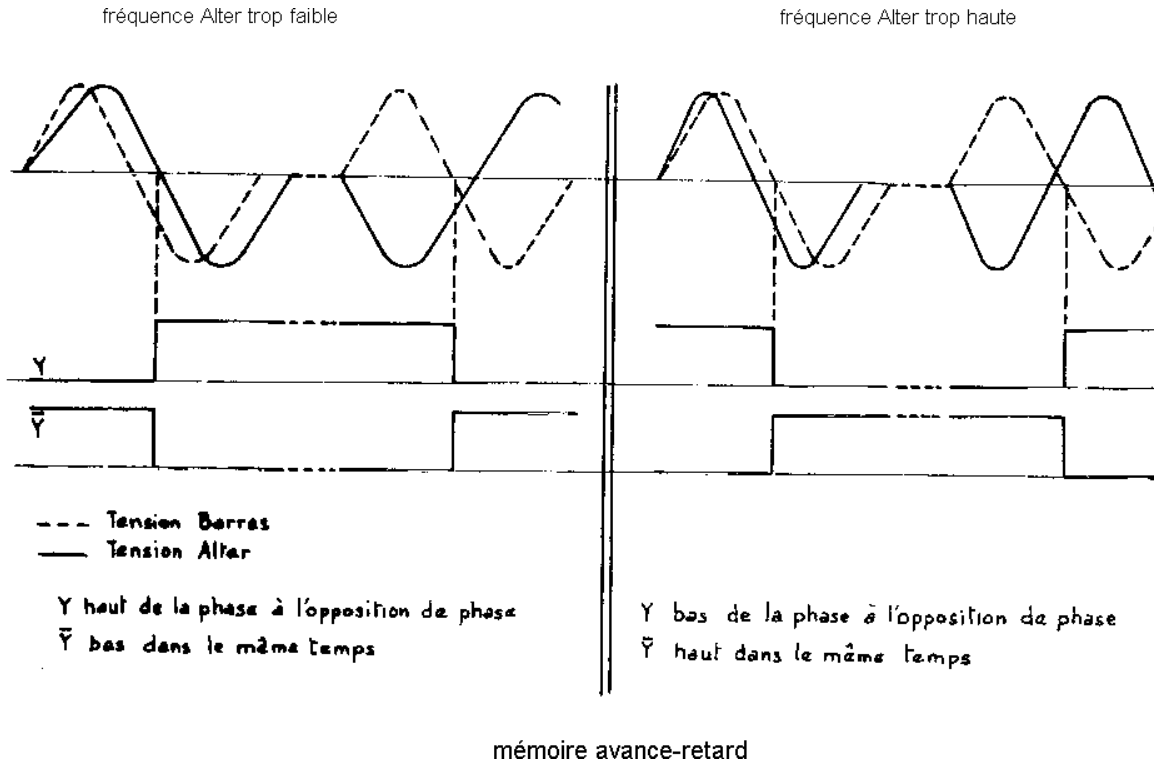


Figure 34

15.3.4 Trigger de synchro :

Cette information délivrée par la mémoire n'est pas suffisante, il faut, pour déterminer le signe du glissement, connaître le moment pendant lequel les tensions passent de la concordance de phase à l'opposition et inversement.

A cette fin, on élabore une tension triangulaire d'amplitude maximum constante (une douzaine de volts environ) dont la fréquence est égale à celle du battement des deux fréquences des sources "BARRES" et "ALTER". La période de ce battement est égale au temps mis par l'aiguille du synchronoscope pour parcourir un tour.

Cette tension est nulle lorsque les deux ondes sont en opposition de phase et égale à 12 V environ quand elles sont en phase. Un trigger permet d'obtenir la forme d'onde figurée ci-dessous K.

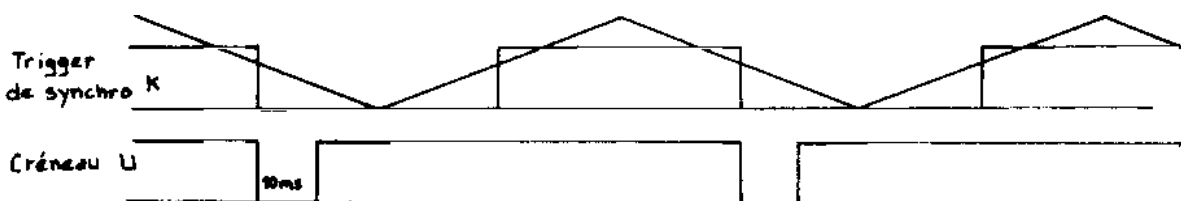


Figure 35

Cette tension trigger nous permet alors d'élaborer un créneau U à partir de son front descendant. Ce créneau de 10 ms de largeur se situe dans la partie descendante de l'onde triangulaire, c'est-à-dire entre le moment où les tensions à coupler sont en phase et le moment où elles sont en opposition de phase.

#### 15.3.5 Discriminateur $\pm$ vite :

Dès lors que ce créneau apparaît simultanément à  $\bar{Y}$  bas, nous savons que l'alternateur à coupler est trop lent. Il faudra donner un ordre + vite, dès lors qu'il apparaît simultanément à Y bas nous donnerons un ordre - vite. Cette discrimination est réalisée par un circuit logique "discriminateur  $\pm$  vite".

N.B.1 : Les ordres + vite et - vite ne sont pas traités de la même façon pour la raison suivante : afin d'éviter la disjonction du relais de retour de puissance de l'alternateur à coupler dans les instants suivant le couplage, on interdit celui-ci tant que l'alternateur n'a pas dépassé la vitesse de synchronisme, et simultanément on maintient l'ordre + vite en permanence afin de dépasser rapidement ce synchronisme; après quoi apparaît l'ordre - vite qui fait retomber le relais + vite. Ainsi l'alternateur se couplera toujours au-delà du synchronisme et sera ainsi immédiatement en charge

N.B.2 : Les ordres - vite sont donnés à chaque fois qu'apparaît le créneau U. Cette période de U est égale à celle de l'aiguille du synchronoscope, ainsi si l'écart de fréquence est important cette période sera courte et la fréquence des ordres - vite importante. Si les deux tensions ont une fréquence voisine, la période sera longue, et la fréquence des ordres faible. Il apparaît que l'action sur les servo-moteurs de régulation de vitesse est proportionnelle au glissement des tensions "ALTER" et "BARRES".

N.B.3 : Lorsque les tensions à coupler ont même fréquence, la tension triangulaire disparaît et se transforme en une tension continue d'amplitude située entre 0 V et 12 V (cette valeur dépend du déphasage des deux ondes) ; le trigger n'est plus à même de basculer, le créneau U n'apparaît plus et aucun ordre n'est donné.

La phase n'étant pas obligatoirement correcte le couplage ne peut être réalisé. Si cette situation se prolonge au-delà de 10 s un circuit appelé "Pousseur" permet par un ordre + ou - vite de refaire glisser les tensions.

#### 15.3.6 Actionneurs :

Deux actionneurs" commandant le servo-moteur du régulateur de vitesse, l'un dans le sens + vite, l'autre dans le sens - vite. Les deux "actionneurs" sont associés à un "temporisateur" (qui fixe le temps d'action). Lorsque l'un des actionneurs reçoit l'ordre d'action, il assure l'alimentation d'un relais de sortie. Un potentiomètre par alternateur permet d'ajuster le temps d'action en "fonction" des caractéristiques du groupe correspondant : ce temps peut être compris entre 50 ms et 500 ms . Le diagramme de commande du relais; est le suivant

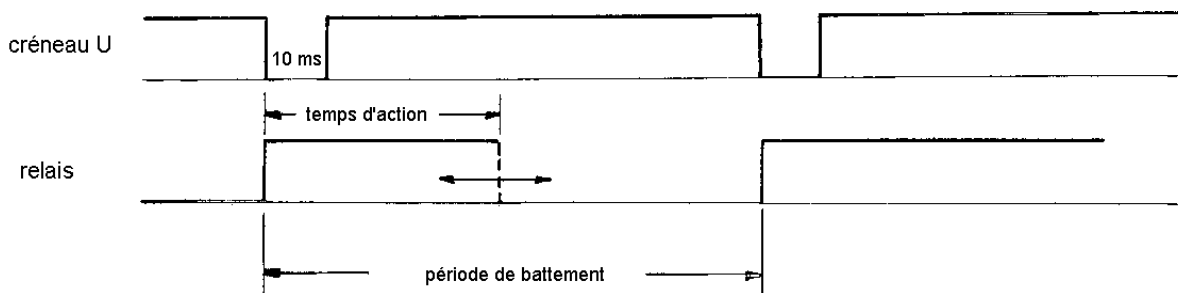


Figure 36

Le synchroniseur dans son ensemble est commun à tous les groupes susceptibles d'être couplés. Par contre chaque groupe est affecté de son propre actionneur  $\pm$  vite (la répartition nécessite un actionneur par groupe), il y a donc lieu d'orienter les informations du synchroniseur sur l'actionneur du groupe à coupler. A cet effet un circuit d'orientation, programmé par un contact de "choix du groupe à coupler", assure l'aiguillage des informations  $\pm$  vite sur l'actionneur concerné.

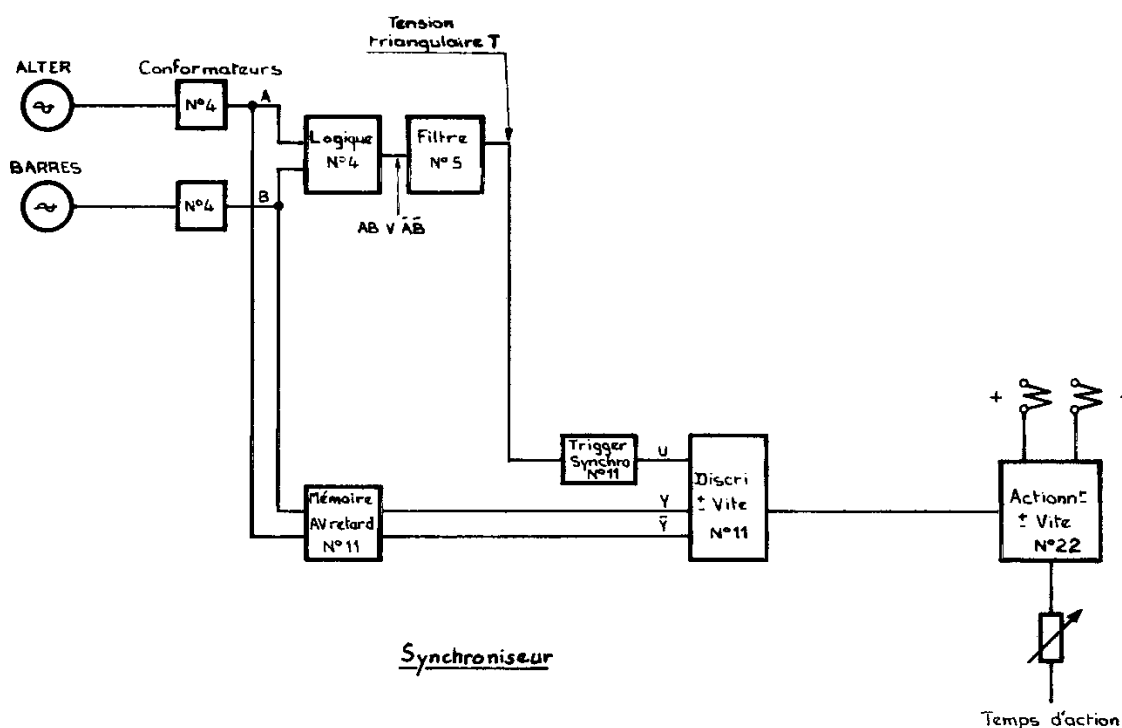


Figure 37

### 15.3.7 Le coupleur proprement dit :

Le coupleur donne l'ordre de fermeture du disjoncteur de l'alternateur à coupler dès que et seulement lorsque les conditions de couplage correct (glissement de fréquence suffisamment faible et écart de phase nul), sont assurées. Il importe néanmoins de tenir compte du temps de fermeture du disjoncteur de couplage afin : d'anticiper cet ordre.



### 15.3.8 Rappel des conditions à remplir pour réaliser un couplage correct :

L'état électrique du réseau (ou de l'alternateur déjà en service) considéré comme référence, et celui de l'alternateur à coupler sont caractérisée par leurs vecteurs tensions homologues.

a) l'amplitude des deux vecteurs "tension" doit avoir sensiblement la même valeur (cette condition n'est pas rigoureuse car un écart d'amplitude n'entraîne pas d'échange de puissance active, donc d'effort mécanique, au moment du couplage).

b) le déphasage des deux vecteurs tension doit être aussi faible que possible.

Rappelons qu'un déphasage de valeur  $\alpha$  donne une tension différentielle :

$$U_d = 2 U \sin \alpha/2$$

qui entraîne un courant de circulation égal à  $\frac{U_d}{2X}$  dans le cas du couplage de deux alternateurs identiques d'impédance interne  $X$ , et  $\frac{U_d}{X}$  dans le cas limite du couplage d'un alternateur d'impédance interne  $X$  sur un réseau de puissance infinie.

A titre d'exemple, les courants de circulation  $I_d$  rapportés au courant de court-circuit propre de l'alternateur couplé  $I_c$  prennent les valeurs suivantes en fonction des déphasages :

déphasage à l'instant du couplage	$I_d / I_c$	
	2 alternateurs identiques	sur réseau
20°	0,17	0,34
30°	0,26	0,52
45°	0,38	0,76
90°	0,70	1,41

Le courant de circulation a, d'une part une composante réactive, d'autre part une composante active qui produit le couple synchronisant.

c) La vitesse de variation du déphasage  $\alpha$  (ou glissement relatif) doit être aussi faible que possible de façon que le couple synchronisant ramène rapidement l'alternateur à une phase correcte.

d) Pour donner l'ordre de couplage, il convient de prendre en considération le temps propre d'enclenchement qui s'écoulera entre l'ordre de couplage et la réalisation effective de ce couplage.

### 15.3.9 Ordre de couplage :

L'ordre de couplage est donné lorsque deux conditions sont simultanément remplies.

a) Le déphasage entre les deux vecteurs tensions est situé à l'intérieur d'un angle  $\theta$  réglable au gré de l'utilisateur. Cet angle, proportionnel au glissement des deux vecteurs permet de le limiter à :  $5^\circ < \theta < 40^\circ$ .

b) L'écart séparant les 2 vecteurs sera parcouru dans le temps de fermeture du disjoncteur.

Soit :

- $f_B$  la fréquence « BARRES »,  $\omega_B = 2\pi f_B$ ,
- $f_A$  la fréquence « ALTER »,  $\omega_A = 2\pi f_A$ ,
- $t_f$  le temps de fermeture du disjoncteur,
- $\theta_0$  l'angle d'autorisation de couplage déterminé par l'utilisateur.

Soit  $t_1$ , l'instant de la concordance de phase, l'ordre de couplage interviendra  $t_f$  secondes avant. Pendant ce temps  $t_f$ , le vecteur « ALTER » ne pourra parcourir, relativement au vecteur « BARRES », au plus, qu'un angle  $\theta_0$ . S'il parcourait un angle supérieur à  $\theta_0$ , cela signifierait qu'à l'instant de l'ordre de couplage, nous serions en deçà de  $\theta_0$  et l'ordre de couplage ne pourrait en conséquence pas être élaboré.

La différence maximum des vitesses angulaires des deux vecteurs a alors pour

$$\text{valeur : } \omega_B - \omega_A = \frac{\theta_0}{t_f}, \text{ le glissement } g = \frac{\omega_B - \omega_A}{\omega_B} = \frac{\Delta\omega}{\omega_B} \Rightarrow \Delta\omega = g\omega_B = \frac{\theta_0}{t_f}$$

$$\text{soit : } g = \frac{1}{\omega_B t_f} \times \theta_0 \quad rd.$$

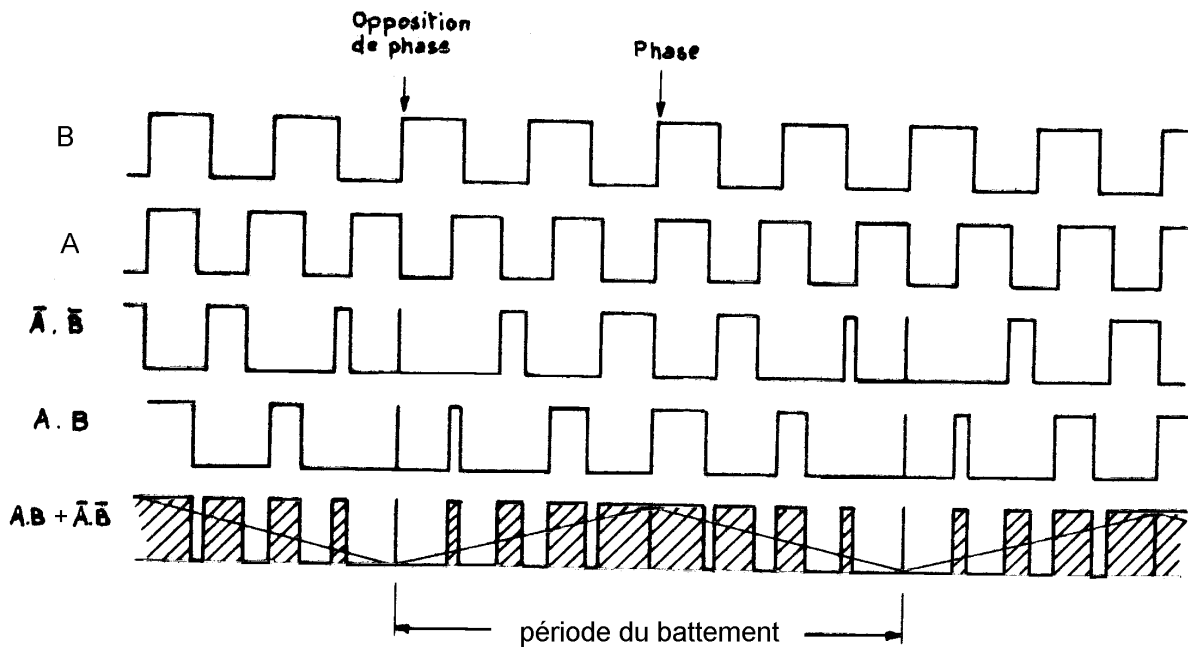
Nous voyons donc que le glissement maximum admissible est proportionnel à  $\theta_0$  angle d'autorisation de couplage. Le coefficient de proportionnalité  $\frac{1}{\omega_B t_f}$  dépend de la fréquence réseau et du temps de fermeture du disjoncteur, paramètres variant d'une installation à l'autre et d'un groupe à l'autre, ce qui interdit de graduer le potentiomètre d'affichage de l'angle  $\theta$  directement en glissement.

On doit retenir de cela que, le temps  $t_f$  étant donné, plus l'angle  $\theta$  est fixé à une valeur importante, plus le glissement autorisé au moment du couplage est important et inversement.

### 15.3.10 Constitution du coupleur (se rapporter à la Figure 40) :

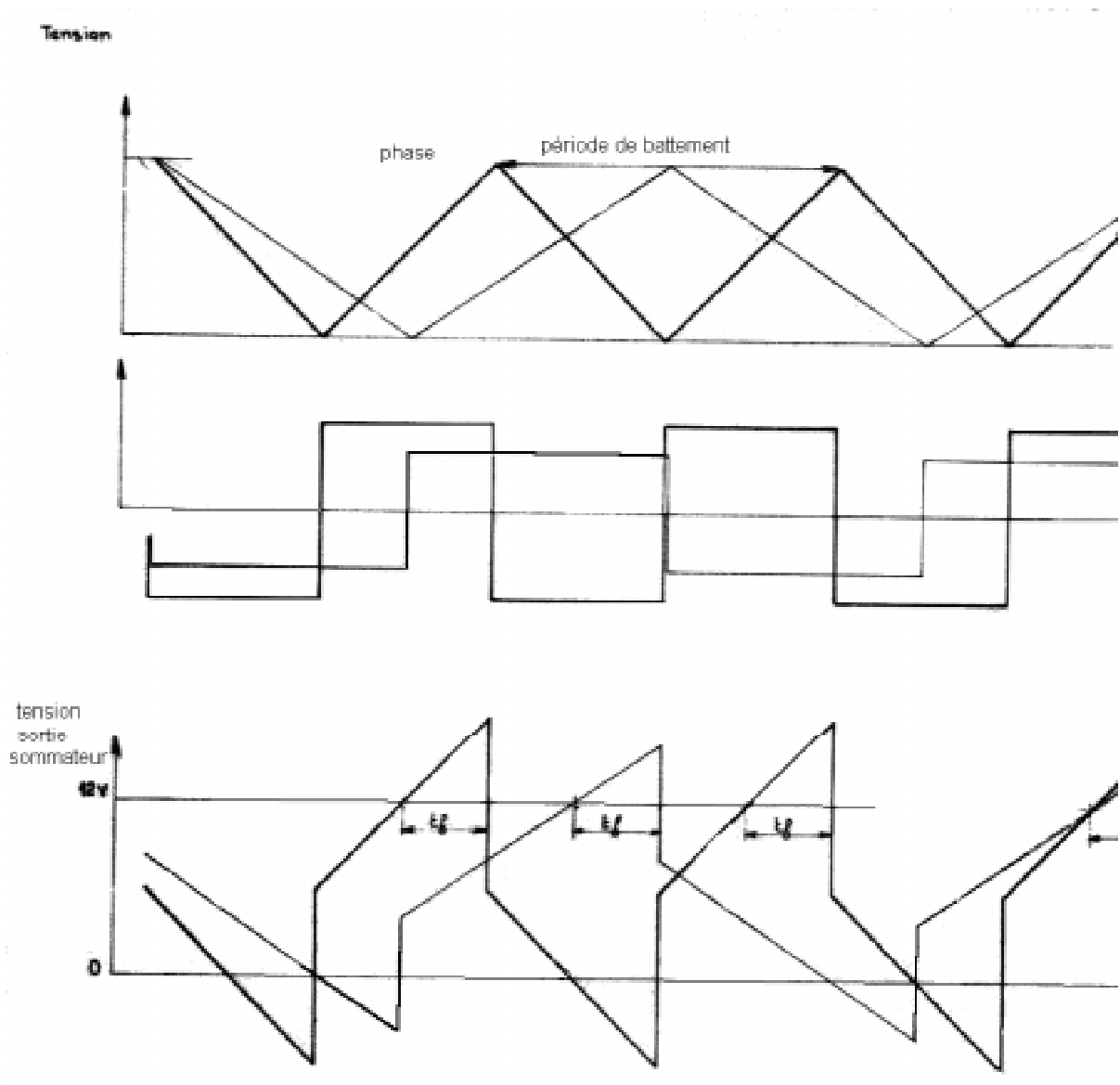
La tension triangulaire, dont nous avons défini les paramètres dans § 15.3.4 est représentative de la fonction espace temps dans un mouvement circulaire uniforme  $\theta = \omega t$ . Si nous dérivons cette tension par rapport au temps, nous connaîtront la vitesse angulaire  $\omega$  avec laquelle le vecteur "ALTER" se rapproche du vecteur "BARRES".

Cette tension est élaborée de la façon suivante : une logique simple nous délivre des créneaux dont la largeur est variable avec la différence de phase des tensions (A étant le signal carré issu de la tension "ALTER", et B celui issu de la tension "BARRES" nous obtenons en langage logique  $AB$  OU  $\overline{A}\overline{B}$ . Ces créneaux sont filtrés pour délivrer la tension triangulaire recherchée (voir diagramme ci-dessous).



**Figure 38**

Nous obtenons après dérivation des signaux rectangulaires dont l'amplitude est proportionnelle à la pente de la tension triangulaire. Ces créneaux sont alors additionnés à la tension triangulaire elle-même, dans un circuit sommateur. Nous obtenons les formes d'onde suivantes :



**Figure 39**

Nous voyons que la tension de sortie du sommateur atteint le seuil de +. 12 v (valeur maxi de la tension triangulaire)  $t_f$  seconde avant la phase et ceci quelle que soit la période de la tension triangulaire (donc le glissement entre les tensions à coupler) comme le montre les deux cas représentés.

Ce temps  $t_f$  peut être modifié si l'on fait varier l'amplitude de la tension dérivée (une construction graphique similaire le montre aisément). Un potentiomètre par alternateur permet donc en augmentant ou diminuant la valeur de cette tension dérivée de respectivement augmenter ou diminuer  $t_f$ . Ce potentiomètre d'affichage du temps de fermeture de disjoncteur autorise  $50 \text{ ms} \leq t_f \leq 500 \text{ ms}$ .

Un trigger dont le seuil correspond au sommet de la tension triangulaire 12 V délivre ainsi un ordre de couplage qui devra être validé par le circuit d'angle  $\theta$  l'autorisation de couplage, cette validation est réalisée par une logique de couplage.

Le couplage ne se réalisera que  $t_f$  seconde après l'ordre de couplage, au moment où il y aura effectivement concordance de phase entre les tensions « BARRES » et « ALTER ».

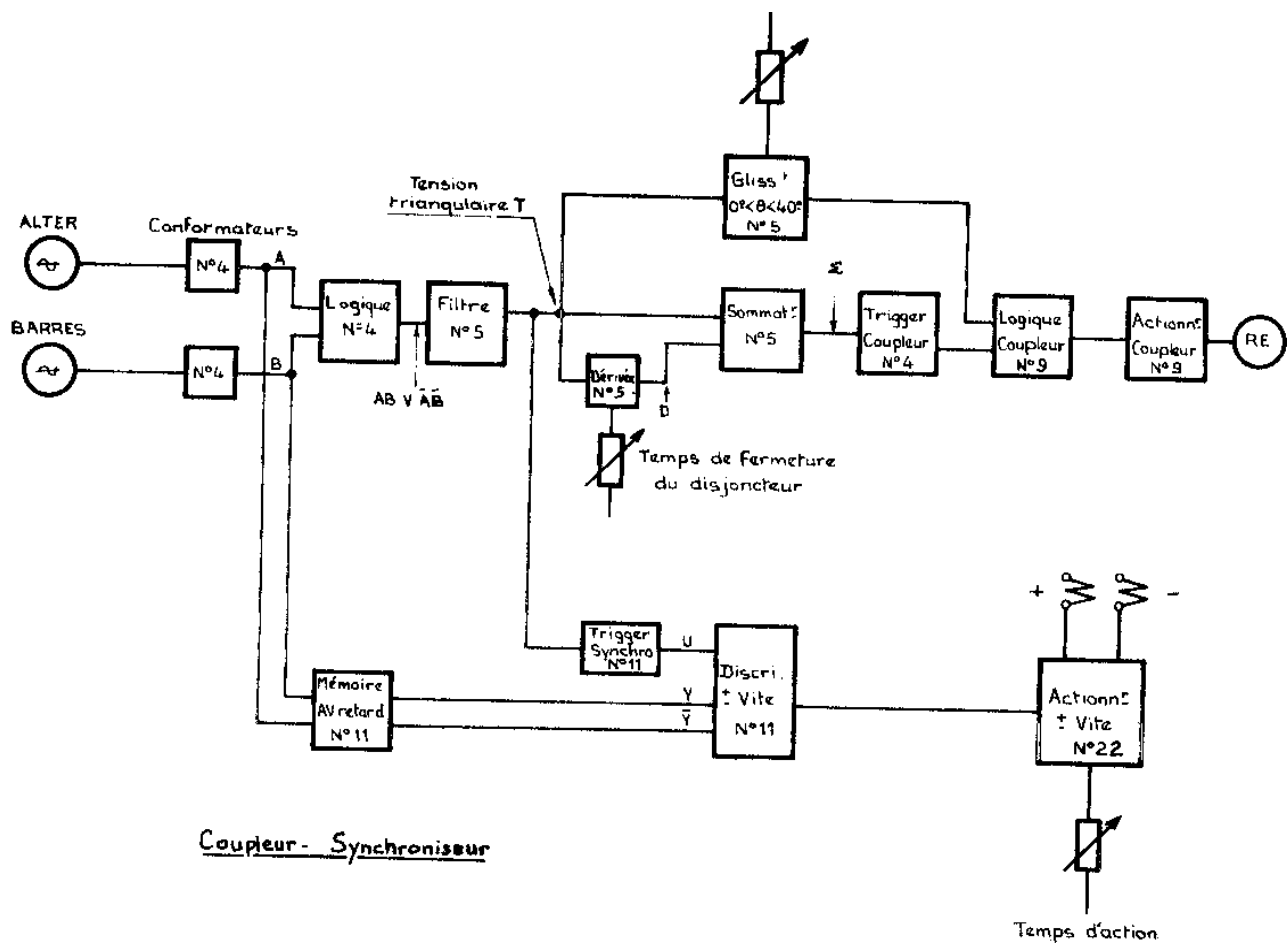


Figure 40

### 15.4 Description du répartiteur de charges actives :

Le répartiteur a pour rôle de fixer pour chaque groupe la quote-part de la charge globale demandée et de maintenir la fréquence commune à sa valeur nominale. Cette quote-part peut être fixée suivant différents modes

#### 15.4.1 équirépartition :

C'est le mode le plus communément utilisé. Chaque groupe couplé délivre une quote-part de la charge totale proportionnelle à sa puissance nominale.

La souplesse du système permet d'ailleurs de réaliser une loi de proportionnalité différente.

Répartition spéciales :

Ces modes, un peu particuliers, résultent des exigences de l'utilisateur qui désire jouer de toutes les possibilités que lui offrent les N groupes dont il dispose.

- a) Démarrage et couplage automatique d'un groupe lorsque les N - 1 en service ne satisfont plus la demande.
- b) Découplage et arrêt automatique d'un groupe lorsque les N - 1 restant en service suffisent à satisfaire la demande.
- c) Mise en attente d'un groupe à une fraction de sa puissance nominale, qui, puisse fournir, le cas échéant le surcroît de puissance demandée lors des périodes de pointe

#### 15.4.2 Description de l'équirépartiteur :

Les principaux éléments nécessaires pour la réalisation d'un équirépartiteur sont les suivants :

#### 15.4.3 Transformateurs d'intensité :

- a) Une détection, par transformateurs d'intensité <sup>5</sup> du courant débité sur une des phases par chaque alternateur :  $I_a$ .

Ces transformateurs, spécialement adaptés à chaque alternateur, débitent 0,5 ampère au secondaire lorsque l'alternateur produit son intensité nominale, de sorte qu'on se ramène toujours ainsi au cas simple d'alternateurs identiques pour le reste de l'appareillage.

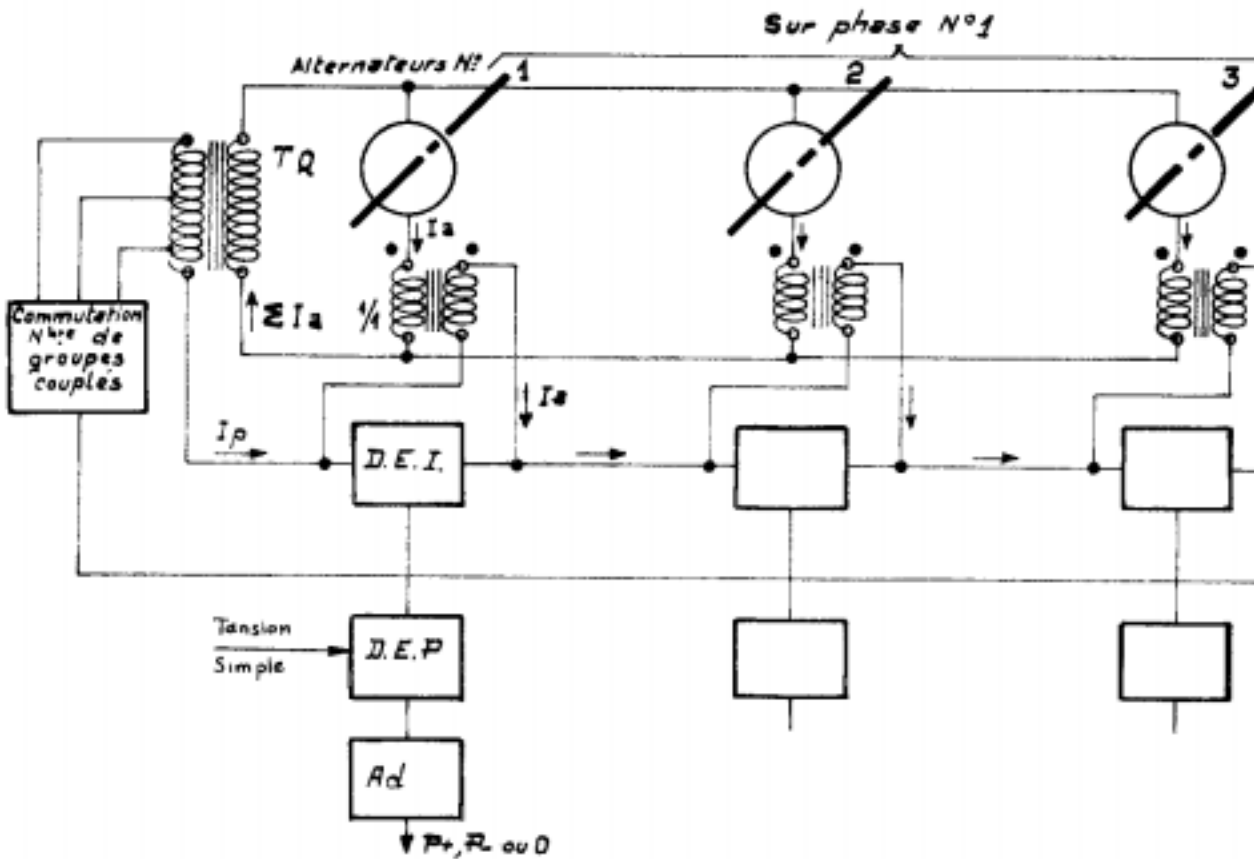
De même, on peut, par combinaison de deux transformateurs d'intensité sur un même alternateur, traduire deux circonstances de fonctionnement, à puissances nominales différentes (par exemple entraînement par Diesel ou par la ligne d'arbre de ce même alternateur)

D'autres modes sont commodément réalisables sur demande.

- b) Un transformateur d'intensité TQ, à prises secondaires, qui effectue la somme des intensités débitées par les alternateurs couplés sur le même jeu de barres et définit la quote-part de chacun :  $I_p$
- c) Un dispositif comparateur DEI qui délivre une grandeur caractéristique de l'écart ( $\Delta I = I_a - I_p$ ) pour chaque alternateur.

---

<sup>5</sup> Les transformateurs d'intensité et de tension utilisés dans les circuits de mesure doivent être en principe de classe 0,5 pour assurer une précision globale satisfaisante.



#### 15.4.4 Relayage :

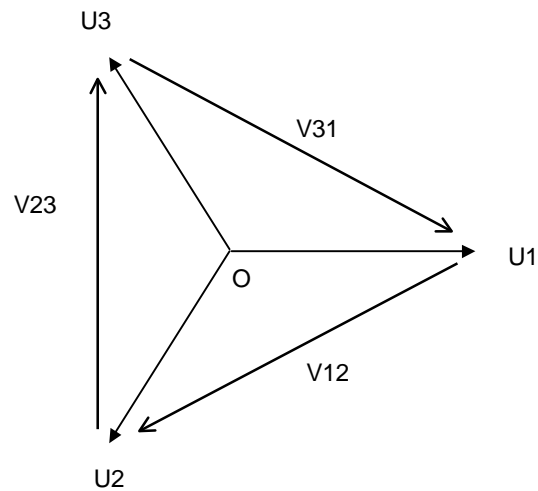
Un circuit appelé "détermination du nombre de groupes couplée" commande à travers les relais R les commutations de prises intermédiaires au secondaire du transformateur d'intensité TQ, fixant ainsi la quote-part de chaque alternateur. Ce circuit reçoit, par l'intermédiaire d'un contact auxiliaire, des disjoncteurs de chaque alternateur, l'information du nombre d'alternateurs en débit. Il excite en conséquence un relais R2 si deux quelconques des groupes sont en service puis R3 si, il y en a un troisième etc.

#### 15.4.5 Détecteurs d'écarts de puissance :

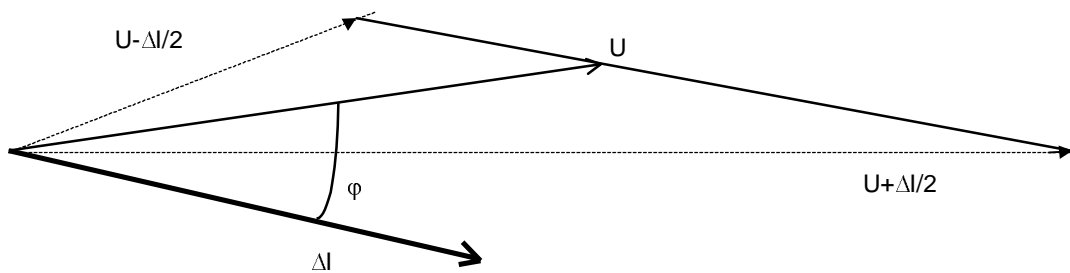
Les détecteurs d'écarts de puissance D.E.P. (1 par alternateur) ont la charge de transformer l'écart d'intensité  $\Delta I = I_a - I_p$  en écart de puissance active (la seule à prendre en considération) soit :

$$\Delta P = U \cdot \Delta I \cos \varphi, \quad \varphi = \Delta \vec{I}, \vec{U}$$

U désigne, bien entendu, la tension simple des barres, commune à tous les alternateurs et pratiquement constante. Le neutre étant généralement inaccessible, cette tension est reconstituée à partir des tensions composées :



La transformation  $\Delta I \rightarrow \Delta P$  s'effectue de la façon suivante :



On effectue électriquement les sommes vectorielles :

$$\vec{U} - \frac{\Delta \vec{I}}{2} \quad \text{et} \quad \vec{U} + \frac{\Delta \vec{I}}{2}$$

Les deux tensions alternatives ainsi obtenues sont redressées et filtrées. La figure ci-dessus montre que la différence ainsi obtenue est bien :

- nulle pour  $\Delta I \cdot \cos \varphi = 0$ ,
- fonction croissante de  $\Delta I \cdot \cos \varphi$ , son sens est d'autre part caractéristique du signe de  $\Delta I \cdot \cos \varphi$ .

NOTA : Il est bien évident que les résultats ci-dessus supposent des ondes de tension et d'intensité sinusoïdales. La présence de taux d'harmoniques anormalement élevés est susceptible d'entraîner des erreurs notables dans la répartition des charges.

#### 15.4.6 Amplificateur différentiel :

Un amplificateur différentiel  $A_d$ , par alternateur, soumis au signal précédent, l'amplifie et délivre, en sortie un signal qu'on peut pratiquement considérer comme pouvant présenter 3 états :

- P + signifiant une charge trop importante pour le groupe intéressé,



- P - signifiant une charge trop faible pour le groupe intéressé,
- 0 , charge correcte.

#### 15.4.7 D.E.F.(DéTECTEURS d'ÉCART de FRÉQUENCE) :

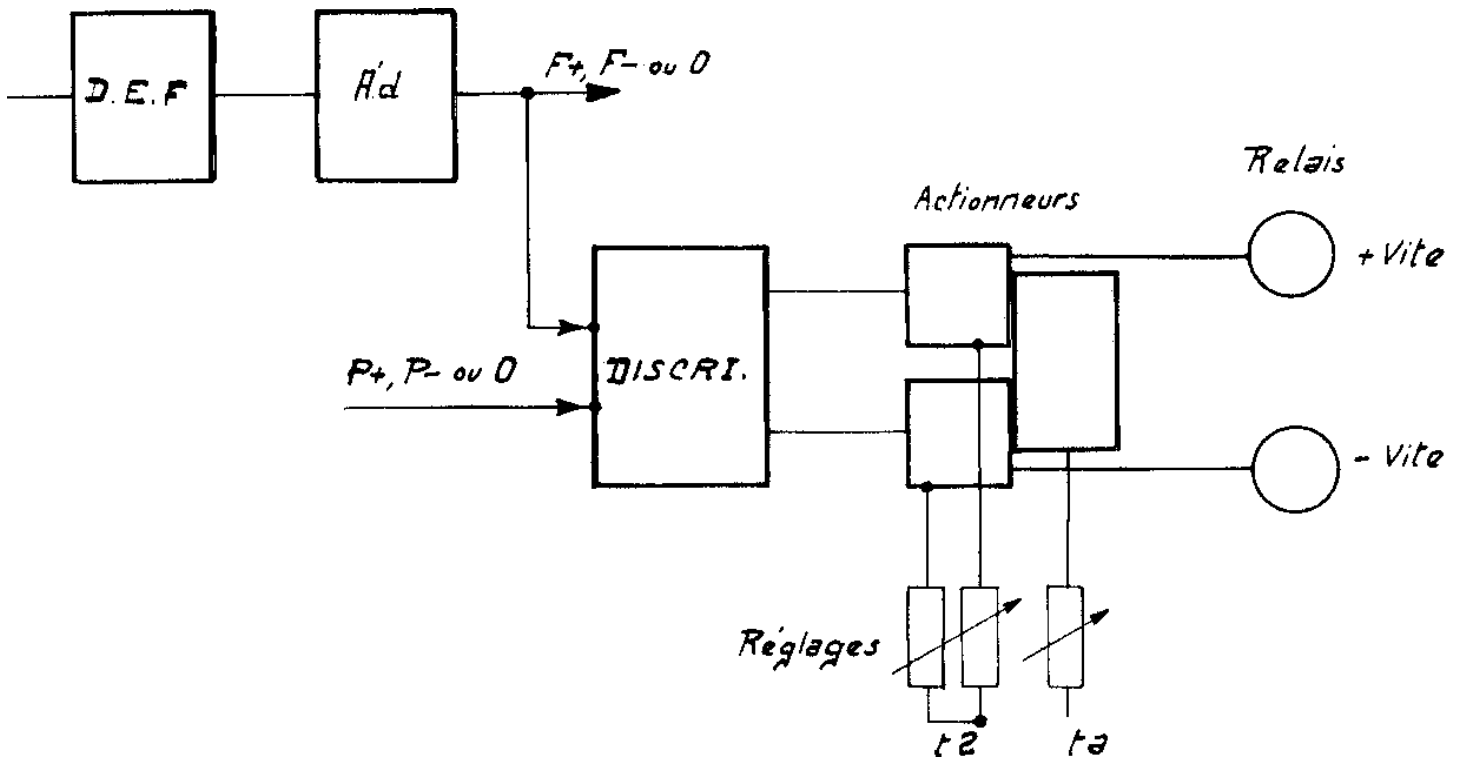
La fréquence commune est comparée dans un appareil étalon D.E.F., à la fréquence de référence (50 ou 60 Hz par exemple). Le D.E.F., délivre une tension caractéristique, par son amplitude et son sens, de l'écart de la fréquence commune, par rapport à la valeur de référence. Là aussi, cette tension attaque un amplificateur, différentiel , qui délivre un signal caractéristique :

- F+ :fréquence trop élevée,
- F- :fréquence trop basse,
- 0 : fréquence correcte.

#### 15.4.8 Discriminateur :

Un discriminateur par alternateur ; le discriminateur reçoit les signaux P (particuliers) et F (communs) et en déduit les ordres à donner suivant le tableau logique ci-après :

P F	+	0	-
+	- vite	- vite	+ vite ½ cadence
0	- vite	0	+ vite
-	- vite ½ cadence	+ vite	+vite



En fait, les fonctions D.E.P., Ad et Discr, pour chaque alternateur sont regroupées en un seul ensemble (carte circuit imprimé) dit D.A.D. dont la logique est la suivante :

- Une puissance ou une fréquence trop élevée doit être combattue par un ordre (- VITE) au régulateur de vitesse du groupe en cause.
- Au contraire, une puissance ou une fréquence trop basse doit être combattue par un ordre (+ VITE).
- Les indications contraires P - et F + ou P + et F - sont traitées comme le sont les indications P - et Fo, P + et Fo mais à demi-cadence; ainsi priorité est donnée à la correction de puissance.

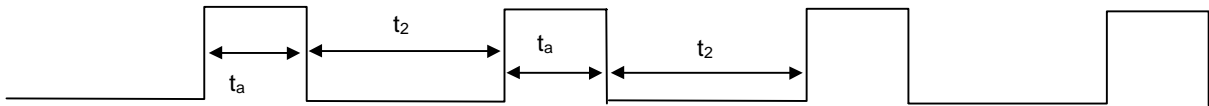
#### 15.4.9 Actionneurs :

Deux actionneurs sont affectés par alternateur : l'un pour la commande du servomoteur du régulateur de vitesse dans le sens (+ VITE) l'autre dans le sens (- VITE).

Ces actionneurs sont les mêmes que ceux que nous avons rencontrés dans le chapitre coupleur et comportent une entrée pour chaque utilisation. Les deux actionneurs sont associés à un temporisateur commun qui fixe le temps d'action dans les deux cas : couplage ou répartition. Un autre temporisateur fixe le temps d'arrêt des deux actionneurs mais uniquement pour la répartition. Nous avons vu que le temps d'arrêt en couplage est lié à la période du battement des deux ondes.

Lorsque l'un des actionneurs reçoit l'ordre d'action, il assure l'alimentation pulsée d'un relais de sortie suivant le diagramme ci-dessous :

$t_a$  = temps d'action,  $t_2$  = temps d'arrêt



Deux potentiomètres par alternateur permettent d'ajuster les temps  $t_a$  et  $t_2$  en fonction des caractéristiques de réponse en fréquence du groupe correspondant.

Alimentations nécessaires aux différents circuits : ces alimentations reçoivent une protection par disjoncteurs.

### 15.5 Modes spéciaux de répartition des charges :

Comme indiqué précédemment, de nombreux autres modes de répartition de charges peuvent être réalisés commodément à partir des mêmes principes; c'est un des avantages notables des dispositifs "SYNALFA".

La description ci-après est donnée à titre d'exemple ayant donné lieu à réalisations effectives :

#### 15.5.1 1<sup>ère</sup> répartition spéciale :

La fourniture de la puissance demandée  $P_c$  peut être normalement assurée par  $N$  groupes principaux couplés, entre lesquels le "SYNALFA" assure l'équirépartition.

On craint cependant soit un accroissement imprévisible de la puissance consommée, soit la défaillance de l'un ou plusieurs de ces  $N$  groupes, aussi un groupe supplémentaire est-il couplé avec les autres, en attente. On désire ménager ce dernier groupe (ou son combustible) aussi sa puissance débitée est-elle maintenue au minimum tolérable  $P_a$ .

En régime normal, on a donc :

- $N$  groupes se répartissant ( $P_c - P_a$ )
- 1 groupe en attente délivrant  $P_a$ .

Si ( $P_c - P_a$ ) vient à dépasser la puissance nominale des  $N$  groupes, alors on limite la fourniture de ces groupes à leur puissance nominale et le groupe d'appoint assure la compensation. (L'exemple type de cette situation est celui du navire qui possède un groupe de croisière sur ligne d'arbre qui, constituant une somme d'énergie économique, doit être utilisé au maximum, le groupe d'appoint étant un Diesel alternateur).

Ces modes de répartition font visiblement appel à deux nouvelles fonctions :

a) Une référence de puissance constante, image soit de  $P_a$ , soit de la puissance nominale d'un groupe.

Compte tenu des indications du § 5 ci-dessus, il suffit ici de disposer d'une source de courant actif constant.

b) Un comparateur de puissance.

### 15.5.2 Source à courant constant :

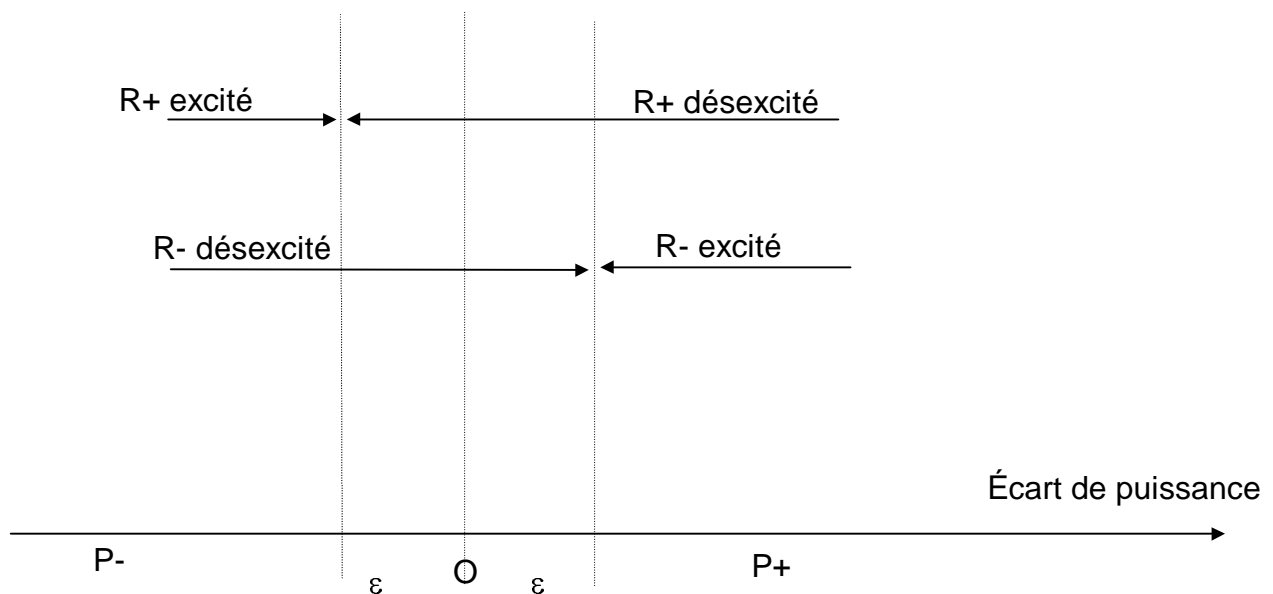
Le courant constant est obtenu à partir de la tension  $V$  entre phases 2 et 3. Un autotransformateur variable permet un ajustage précis.

La, tension ainsi obtenue est appliquée à un condensateur en série avec le détecteur d'écart d'intensité D.E.I. (voir § 5.31 ci-dessus).

L'impédance du condensateur étant grande devant celle du D.E.I., le courant ainsi obtenu est sensiblement constant et déphasé de  $\pi/2$  par rapport à la tension  $V$ , donc en phase avec la tension " Etoile" de la phase 1.

### 15.5.3 Comparateur de puissance Tristat :

L'information  $\pm P$  provenant du détecteur d'écart de puissance, entre la puissance débitée par l'alternateur et la puissance de référence, est appliquée à un dispositif particulier dit TRISTAT qui commande deux relais R + et R - suivant le diagramme ci-après :



### 15.5.4 2<sup>ième</sup> répartition spéciale :

La fourniture de la puissance demandée est assurée par N-1 groupes couplée. Cette puissance se maintenant pendant un certain temps à la limite de la puissance nominale des N-1 groupes ou au-dessus, nous élaborons une information qui provoquera le démarrage et le couplage automatique du N<sup>ième</sup> groupe.

Inversement, les N groupes étant couplés, la puissance demandée se maintenant pendant un certain temps au-dessus de la puissance nominale de N-1 groupe nous élaborons une information qui provoquera le découplage et l'arrêt de l'un des N groupes couplés.

Dans le cas où les N groupes sont de même puissance nominale, le processus décrit ci-dessus se réalise simplement, conformément aux principes décrits en 15.4.1..

Dans le cas où les N groupes sont de puissance nominale différente, il est nécessaire de "programmer" les sources à courant constant.

## **15.6 Principes de construction :**

### 15.6.1 Technologie :

D'une façon générale, on utilise au maximum des éléments "statiques" (transformateurs, transistors, thyristors, etc.). L'utilisation des relais électromagnétiques est limitée au minimum compatible avec les conditions économiques du moment.

Les éléments employée sont à haute fiabilité, ils sont toujours utilisés loin des limites fixées par leurs constructeurs. Les schémas eux-mêmes font l'objet de vérifications très soignées, par exemple :

- essais de type à - 25°C et + 80°C
- essais d'antiparasitage.

Les éléments faiblement dissipatifs sont montés sur circuits imprimés embrochables, avec connecteurs rapportée (élimination des contacts venus directement sur la carte)

### 15.6.2 Alimentations :

Les alimentations sont assurées en triphasé. Cette mesure présente le gros avantage d'éliminer au maximum les condensateurs électro-chimiques qui constituent bien souvent le "point faible" de l'électronique.

La protection contre les surtensions et éventuellement un excellent filtrage sont assurés par diodes Zener largement dimensionnées.

On notera la protection systématique des circuits de transformateurs d'intensité par diodes Zener "tête-bêche"

## **15.7 Règles générales de mise en service :**

Voici les règles générales qu'il convient de respecter pour obtenir le meilleur service de l'appareillage "SYNALFA".

### 15.7.1 Réglages préalables des régulateurs de vitesse et de tension :

Ces réglages sont d'ailleurs nécessaires en conduite manuelle. L'expérience semble cependant montrer qu'ils sont parfois négligés. Il convient de retenir qu'une bonne stabilité des groupes et une répartition naturelle des charges aussi bonne que possible permettent de solliciter moins souvent les organes automatiques, sujets à usure (relayage, servo-moteurs par exemple).

### 15.7.2 Réglages des potentiomètres d'actionneur :

On ne peut pas indiquer de règles mathématiques pour ces réglages. On peut seulement rappeler les règles "de bon sens" suivantes :

- Le temps d'action est lié à la vitesse du servomoteur de correction.
- Le temps de repos doit être d'autant plus grand que la vitesse de réaction du groupe est plus faible. L'opérateur manuel acquiert très vite les réflexes qui le font agir "par petites touches" ou d'une façon maintenue, et attendre que la correction correspondante se manifeste sur l'appareil de mesure.
- Un temps d'action trop bref et un temps de repos trop long font un système paresseux mais à longue durée de vie.
- Un temps d'action trop important ou un temps de repos trop bref conduisent au pompage.
- On doit toujours commencer les essais avec un temps d'action faible et un temps de repos important. On peut indiquer, par expérience, qu'un bon temps d'action doit commander une variation de fréquence du groupe isolé de l'ordre de 0,1 Hertz (en 50 ou 60 Hertz nominal).
- Il est généralement tolérable de choisir un temps de repos (au moins en répartition de charges) nettement plus long que le temps nécessaire au groupe isolé pour se stabiliser à la nouvelle fréquence ainsi commandée.
- La prise en charge du groupe à coupler a lieu à  $\pm 10\%$  de la fréquence nominale.

## 16 Excitation des alternateurs :

### 16.1.1 Pourquoi une excitation variable :

Considérons l'installation suivante, constituée d'un alternateur et d'une charge purement résistive :

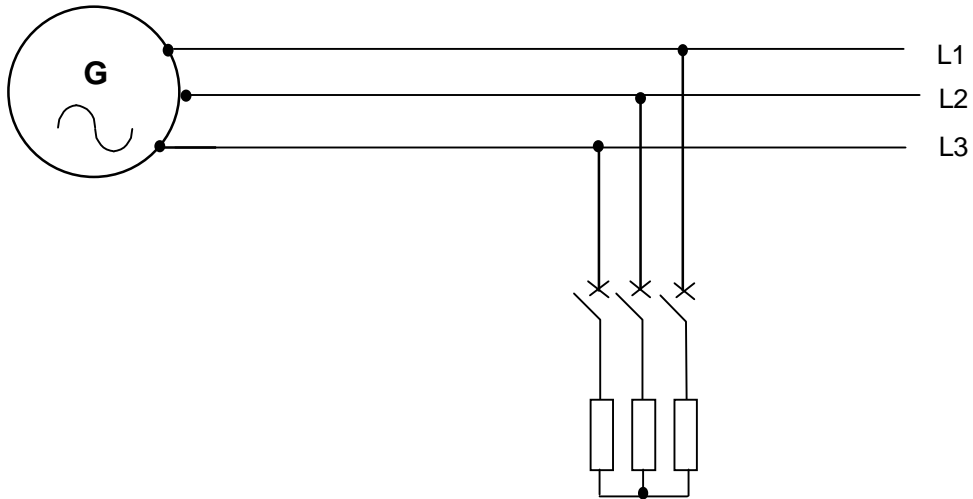


Figure 41

Lorsque l'alternateur est à vide, son diagramme de Ben-Eshenburg est le suivant :

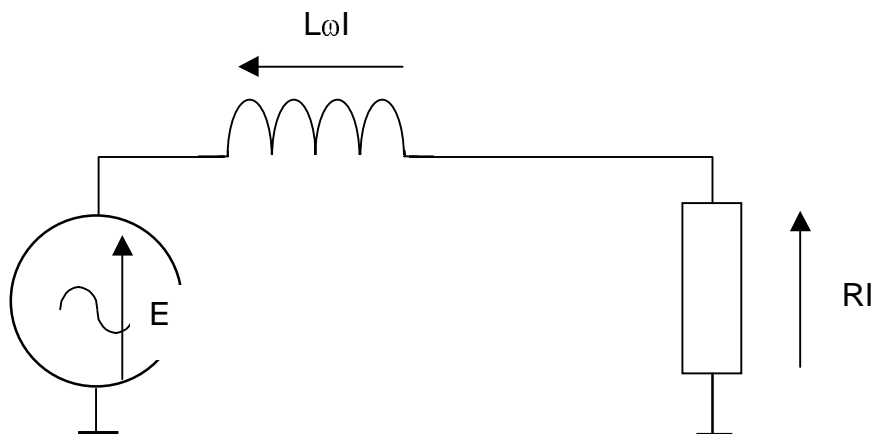
Figure 42



Dans ces conditions,  $V = E$ .

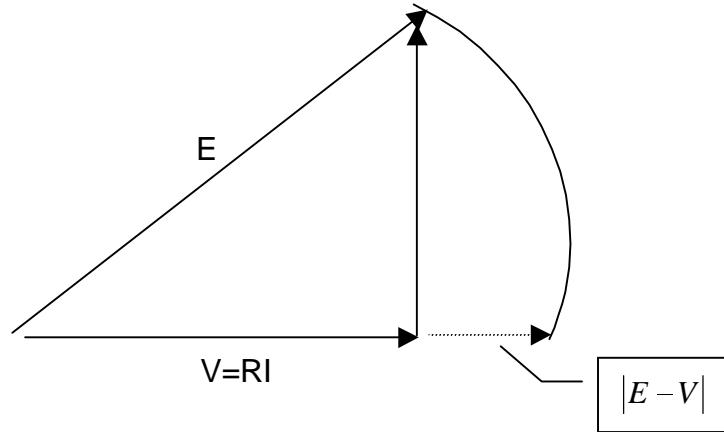
Maintenant, fermons le disjoncteur afin d'alimenter les résistances. Le modèle de Thevenin d'une phase de l'alternateur est le suivant :

Figure 43



Si l'excitation n'a pas été modifiée, la longueur du vecteur  $E$  ne change pas sur le nouveau diagramme de Ben-Eshenbourg :

Figure 44



Mais la longueur du vecteur  $V$  n'est plus égale à  $E$  : le récepteur n'est pas alimenté sous la d.d.p. normale, et ce d'autant plus que le courant absorbé par le récepteur est important.

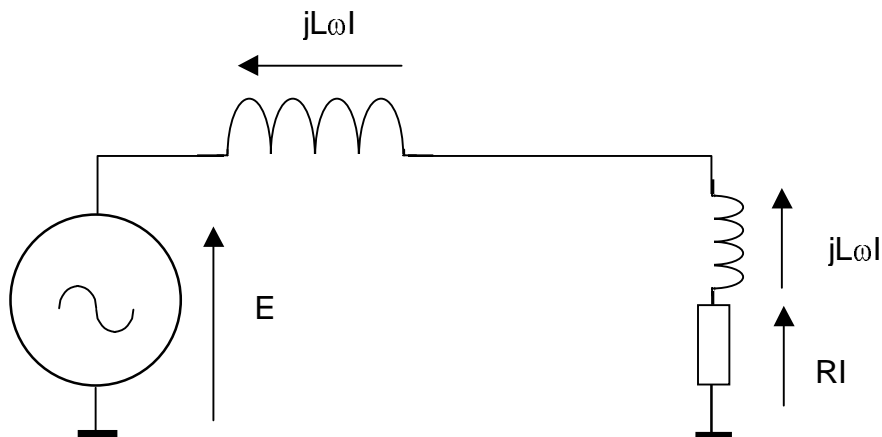
Nous retrouvons là une des conséquences de la « très grave maladie » de toute source de tension : **l'impédance interne**.

Supposons que le récepteur soit un ensemble de lampes à incandescence éclairant les ponts d'un car-ferry. Les ampoules n'étant pas soumises à la tension normale prévue par le fabricant, elles éclaireront plus faiblement.

Le **remède**, consistant à faire croître la d.d.p. aux bornes des ampoules, consiste à **augmenter l'excitation de l'alternateur**. Evidemment nous pourrions créer pas mal d'emplois supplémentaires (et passionnant) en inventant le « régleur d'excitation », ce n'est toutefois pas la solution retenue par les armateurs !

Si le récepteur est résistif et inductif, comme montré ci-dessous,

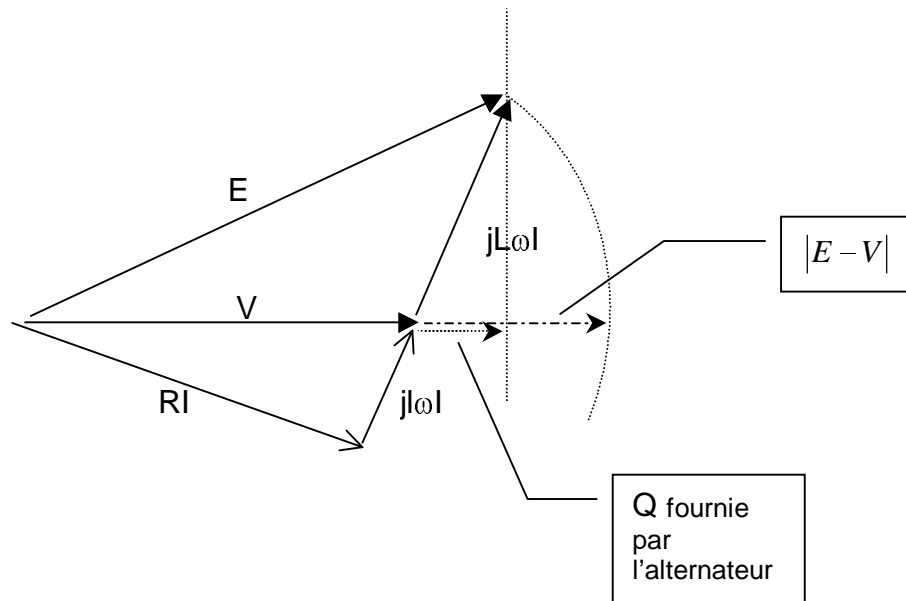
Figure 45





à la fermeture du disjoncteur, nous obtenons le diagramme suivant :

Figure 46



Le récepteur n'est pas alimenté sous sa tension nominale : il manque  $E - V$ , l'alternateur fournit spontanément la puissance réactive  $Q$  appelée par le récepteur. Ici aussi, si nous voulons que le récepteur fonctionne correctement, il faut augmenter l'excitation afin d'augmenter  $V$  aux bornes du récepteur.

La puissance fournie par un ou plusieurs alternateurs alimentant un réseau étant susceptible de varier dans de larges proportions, un dispositif de réglage automatique de l'excitation est indispensable.

Un système d'excitation de machine synchrone est composé des éléments suivants :

- La **source de puissance** proprement dite, fournissant la puissance d'excitation.
  - Le **régulateur de tension**, servomécanisme ayant, dans le cas le plus simple, pour grandeur de sortie une tension commandant la puissance délivrée par la source d'excitation, et pour grandeur d'entrée l'écart entre la tension aux bornes de la machine synchrone principale et une tension de consigne.
  - Eventuellement, des étages amplificateurs intermédiaires, intercalée entre le régulateur et la source de puissance.

## 16.2 Description des différentes sortes de source de puissance :

Pour fournir le courant continu d'excitation d'une machine synchrone, il est nécessaire de disposer d'une source de tension continue variable dans d'assez larges proportions, puisqu'entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement en régime

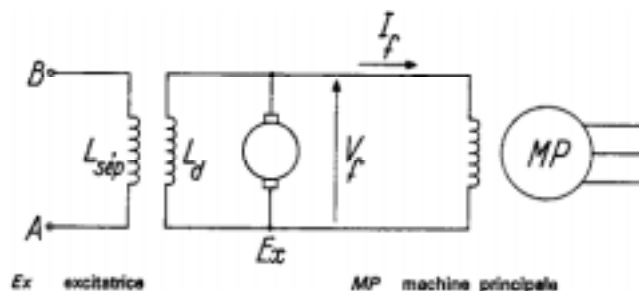
nominal, le courant d'excitation d'une machine à pôles saillants varie environ du simple au double et, dans le cas d'une machine à entrefer constant, il peut varier environ du simple au triple. Dans l'étude du système d'excitation intervient donc, d'une part le choix de la source principale d'excitation, objet du présent paragraphe, et, d'autre part, les moyens mis en œuvre pour faire varier le courant d'excitation.

On peut distinguer trois grandes catégories de sources principales d'excitation :

- excitatrice à courant continu,
- alternateur-excitateur débitant sur redresseurs,
- redresseur alimenté directement à partir des bornes de la machine synchrone principale (auto-alimentation).

### 16.2.1 Excitatrice à courant continu :

L'excitatrice (Figure 47) doit nécessairement être munie d'un enroulement d'excitation séparée  $L_{\text{sép}}$  : par lequel seront obtenues les variations de flux permettant la variation de sa tension aux bornes  $V_f$ . Dans le but de diminuer l'importance de la source alimentant l'enroulement  $L_{\text{sép}}$ , l'excitatrice peut être munie d'un enroulement d'auto-excitation en dérivation  $L_d$  qui à lui seul, est capable de permettre la fourniture de la tension  $V_f$  et du courant  $I_f$  correspondant au fonctionnement à vide de la machine principale.



**Figure 47**

Il faut noter que le courant  $I_f$  est nécessairement transféré au rotor de la machine principale par l'intermédiaire de bagues et balais.

L'excitatrice est généralement accouplée sur le même arbre que le rotor de l'alternateur. Lorsque les conditions de puissance et de vitesse correspondent à une machine à courant continu difficilement réalisable, on peut soit utiliser un réducteur à engrenage, soit entraîner l'excitatrice par un moteur asynchrone, mais cette dernière solution est plus coûteuse et moins fiable.

### 16.2.2 Alternateur-excitateur débitant sur redresseurs :

Il existe deux variantes selon que l'alternateur-excitateur est de conception classique, c'est-à-dire à inducteur tournant et induit fixe, ou l'inverse.

Ces deux variantes sont représentées schématiquement Figure 48 et, pour les rendre plus claires, on a indiqué la démarcation entre les éléments fixes et les éléments tournants. Lorsque les courants doivent traverser cette démarcation, il est nécessaire d'utiliser bagues et balais.

L'alternateur-excitateur est accouplé sur le même arbre que le rotor de la machine principale, si bien que l'avantage de la solution de la Figure 48 b est de ne nécessiter aucun contact glissant. Cet avantage est très important dans le cas des très gros alternateurs, sont le courant d'excitation atteint des valeurs élevées (plus de 3000 A pour un alternateur de 600 MW).

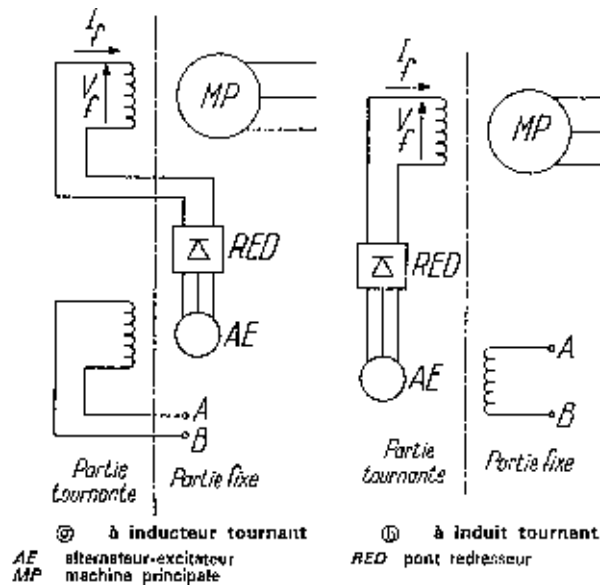


Figure 48

### Principe de l'excitation par alternateur-excitateur

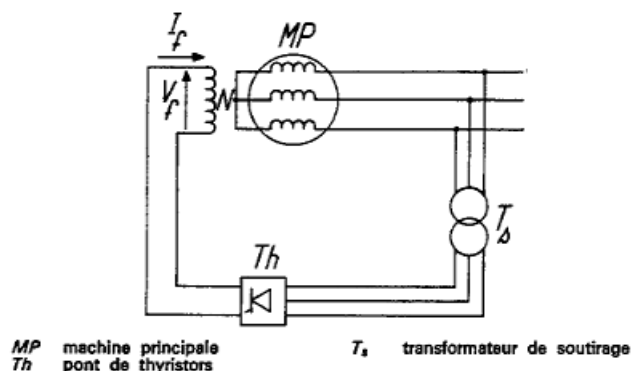
#### 16.2.3 Auto-alimentation :

Il existe deux procédés d'auto-alimentation : à dérivation pure et à compoundage.

#### 16.2.4 Auto-alimentation à dérivation pure :

Le pont de thyristors alimentant l'enroulement inducteur est lui-même alimenté en courant alternatif par le secondaire d'un transformateur triphasé dont le primaire est connecté aux bornes de la machine synchrone principale (Figure 49).

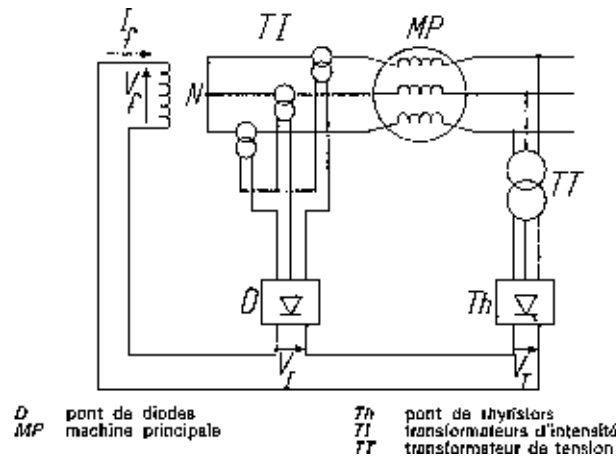
Figure 49



### Principe de l'excitation par auto-alimentation à dérivation pure

Il est nécessaire que les redresseurs soient des thyristors, et non des diodes, de façon à pouvoir faire varier le courant  $I_f$  en fonction de la charge, de telle sorte que la tension aux bornes de la machine principale, donc aussi aux bornes d'entrées du pont, reste constante.

En général, la tension, due au flux rémanent de la machine principale, est trop faible pour permettre l'amorçage (compte tenu de la chute de tension dans les thyristors) et il faut donc utiliser une source de tension auxiliaire.



**Figure 50**

Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage série. Mise en série des tensions continues.

#### 16.2.5 Auto-alimentation avec compoundage série :

Un exemple d'une telle réalisation est représenté sur la Figure 50. La tension d'excitation  $V_f = V_T + V_I$  est la somme de deux termes :

- une tension continue  $V_T$ , proportionnelle à la tension aux bornes de la machine principale, obtenue par un transformateur et un pont de thyristors comme dans le cas de la Figure 49;
- une tension continue  $V_I$ , fonction du courant débité par la machine principale, obtenue à l'aide de trois transformateurs d'intensité placés dans les sorties côté neutre des phases de la machine principale. Ces trois transformateurs d'intensité débitent sur un pont de diodes. Il ne peut s'agir de transformateurs d'intensité au sens strict, c'est-à-dire tels que le courant secondaire soit strictement proportionnel au courant primaire, sinon  $I_f$  serait imposé par ce courant primaire quel que soit  $V_T$  : il n'y aurait pas de compoundage. On est donc obligé de désolidariser partiellement les courants primaire et secondaire des transformateurs d'intensité, en leur imposant un courant magnétisant élevé, ce qui s'obtient en pratiquant un entrefer dans leur circuit magnétique. Il en résulte un surdimensionnement non négligeable.

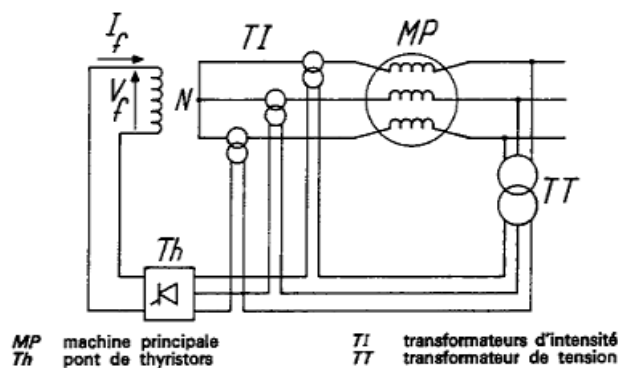
Avec ce système, le courant d'excitation croît en même temps que le courant induit de la machine principale, ce qui correspond justement à ce qu'exige la théorie. Mais le courant d'excitation ne s'ajuste pas exactement à la valeur

désirée ; c'est pourquoi on parfait le réglage à l'aide des thyristors du pont tension.

La réalisation de la **Figure 50** correspond à la mise en série de deux tensions continues. Il est possible de réaliser la mise en série par le côté alternatif conformément à la **Figure 51**. Dans ce cas, la tension et le courant d'excitation sont proportionnels non plus à la somme arithmétique de  $V_T$  et de  $V_I$ , mais à une composition vectorielle de ces deux grandeurs qui se rapproche davantage de la loi naturelle de variation du courant d'excitation avec la charge.

**Figure 51**

**Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage série. Mise en série des tensions alternatives.**



#### 16.2.6 Auto-alimentation avec compoundage parallèle :

On peut réaliser un compoundage parallèle, conformément à la Figure 52, en utilisant un transformateur à 3 enroulements :

- Le **primaire** placé du côté neutre, est traversé par le courant de la machine synchrone ;
- Le **secondaire** est alimenté en dérivation
- Le **tertiaire** débite sur un pont redresseur, comportant normalement des thyristors en vue de parfaire la régulation de tension, destiné à alimenter l'inducteur de la machine synchrone.

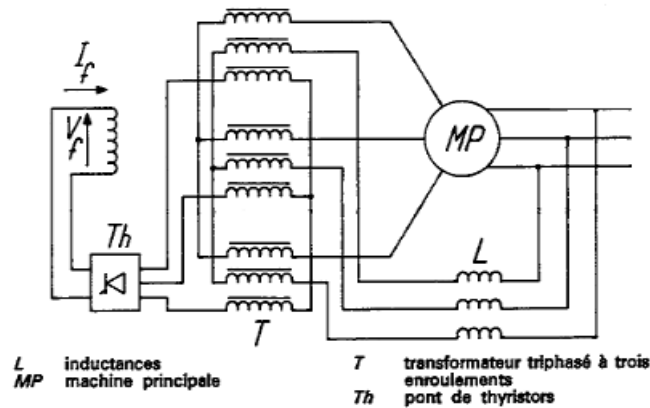


Figure 52

### 16.3 Théorie simplifiée du compoundage :

#### 16.3.1 Compoundage série :

Le compoundage série nécessite que les transformateurs d'intensité aient un courant magnétisant non négligeable, dont l'importance conditionne d'ailleurs le taux de compoundage. Pour obtenir ce résultat leur circuit magnétique comporte un entrefer. Nous allons établir la loi de compoundage à partir du schéma monophasé équivalent de l'installation.

Examinons d'abord le système dans lequel la mise en série s'effectue du côté alternatif (Figure 51). Nous ne considérons que le premier harmonique des grandeurs alternatives, ce qui nous permet de raisonner en nombres complexes.

**Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage parallèle.**

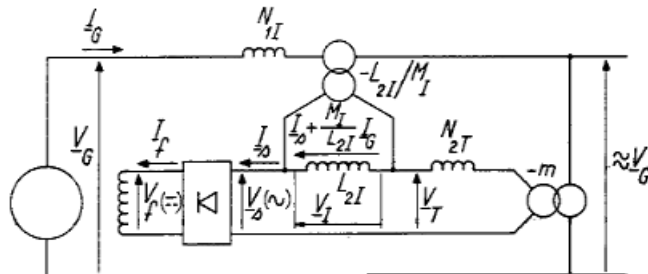


Figure 53

**Schéma monophasé équivalent de l'auto-alimentation avec compoundage série.**

Le schéma monophasé équivalent comporte (Figure 53) :

- L'alternateur principal avec sa tension  $\underline{V}_G$  et son courant  $\underline{I}_G$  ;
- le transformateur d'intensité : son schéma équivalent avec fuites totales ramenées au primaire comporte :
  - Un transformateur parfait de rapport  $L_{2I}/M_I$  (différant quelque peu du rapport du nombre des spires à cause de l'entrefer),
  - une inductance de magnétisation  $L_{2I}$  au secondaire,
  - une inductance de fuites totales  $N_{II}$  au primaire, définie par  $N_{II} = L_{II} - \left( \frac{M_I^2}{L_{2I}} \right)$ ,  $L_{II}$  étant l'inductance propre du primaire,
- le transformateur de tension, dont le schéma équivalent peut être réduit à un transformateur parfait de rapport  $m$  et une inductance de fuites totales ramenée au secondaire  $N_{2T}$ .

Appelons  $\underline{I}_s$  le courant secondaire commun aux deux transformateurs et  $\underline{V}_s$  la tension aux bornes du pont redresseur; nous allons d'abord supposer que le pont est constitué de diodes à commutation parfaite. Dans ces conditions  $\underline{V}_s$  et  $\underline{I}_s$  sont respectivement proportionnels à la tension et au courant d'excitation, ils sont en phase et leur quotient est une résistance pure  $R$  proportionnelle à la résistance du circuit inducteur, le coefficient de proportionnalité dépendant de la nature du pont redresseur.

En considérant les enroulements secondaires des deux transformateurs comme générateurs, et en supposant que la tension au primaire du transformateur de tension peut être considérée comme égale à  $\underline{V}_G$  (du fait de la faible puissance du transformateur d'intensité) on peut écrire:

$$\underline{V}_I = j L_{2I} \omega \underline{I}_G \quad (1),$$

$$\underline{V}_T = m \underline{V}_G + j N_{2T} \omega \underline{I}_s \quad (2).$$

D'où :

$$\underline{V}_s = \underline{V}_I + \underline{V}_T = m \underline{V}_G + j \omega \underline{I}_s (L_{2I} + N_{2T}) + j M_I \omega \underline{I}_G = R \underline{I}_s \quad (3)$$

d'où l'expression du courant :

$$\underline{I}_s = \frac{m \underline{V}_G + j M_I \omega \underline{I}_G}{R + j \omega (L_{2I} + N_{2T})} \quad (4)$$

Le courant  $\underline{I}_s$  (proportionnel au courant d'excitation) apparaît donc comme une combinaison linéaire des deux nombres complexes  $\underline{V}_G$  et  $\underline{I}_G$  et on constate que le numérateur de l'expression (4) reproduit le principe du diagramme simplifié des machines synchrones conduisant à la détermination du courant d'excitation. En l'absence de saturation de la machine synchrone, on pourrait donc choisir le taux de compoundage conditionné par les paramètres  $m$  et  $M_I$  de façon qu'il conduise automatiquement, pour tout régime, à la valeur souhaitée du courant d'excitation. En réalité, à cause de la saturation, cette situation idéale n'est pas atteinte et il faut prévoir

un réajustement du courant d'excitation en utilisant non pas un pont de diodes, mais un pont de thyristors où un pont mixte.

La théorie doit être complétée par les éléments suivants, ce qui ne présente pas de difficulté majeure :

- la prise en compte de la résistance des enroulements des transformateurs peut se faire au niveau des équations (1) et (2) ;

- lorsque, le pont comporte des thyristors, les grandeurs  $\underline{V}_s$  et  $\underline{I}_s$  présentent un déphasage fonction de l'angle d'allumage, ce qui peut être pris en compte dans l'équation (3) en ajoutant à R un nombre complexe fonction de cet angle ;

- la prise en compte de la commutation correspond à une chute de tension continue proportionnelle au courant  $\underline{I}_s$ , et dépendant notamment des réactances de fuites des deux transformateurs.

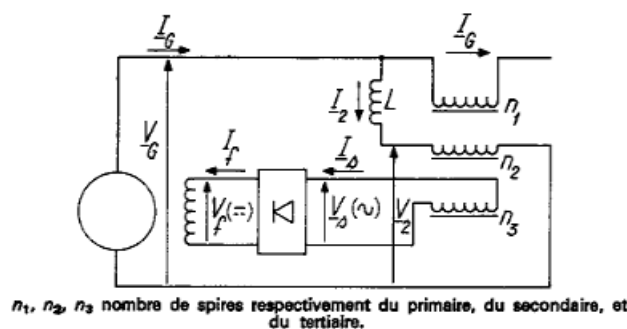
- Dans le cas où la mise en série s'effectue par le côté continu, comme sur la Figure 50, la mise en équation, débute comme précédemment, mais l'addition de  $\underline{V}_T$  et  $\underline{V}_I$  doit se faire en modules ; le système ne reproduit plus le diagramme vectoriel simplifié des machines synchrones, et l'expression analytique du compoundage devient plus compliquée.

### 16.3.2 Compoundage parallèle :

Le compoundage parallèle peut être obtenu à l'aide d'un seul transformateur trois enroulements, conformément à la figure ; le primaire est en série avec le courant débité par l'alternateur ; le secondaire est en dérivation sur la tension de l'alternateur mais par l'intermédiaire d'une inductance série indispensable à l'obtention du compoundage ; le tertiaire débite sur le pont redresseur.

Avec les mêmes hypothèses que dans le cas du compoundage série, on peut dessiner le schéma monophasé équivalent (Figure 54) et associer des nombres complexe aux grandeurs alternatives. Nous supposons en outre, dans cette première approche, que le transformateur est parfait, c'est-à-dire que le courant magnétisant est nul et qu'il n'y a pas de fuites magnétiques.

**Schéma monophasé équivalent de l'auto-alimentation avec compoundage parallèle.**



**Figure 54**



Dans ces conditions, et avec les conventions de signes et notations de la figure , les équations sont :

$$n_1 \underline{I}_G + n_2 \underline{I}_2 + n_3 \underline{I}_s = 0 \quad (5)$$

$$\underline{V}_G - \underline{V}_2 = j L \omega \underline{I}_2 \quad (6)$$

$$\frac{\underline{V}_G}{\underline{V}_s} = \frac{n_2}{n_3} \quad (7)$$

$$\underline{V}_s = R \underline{I}_s \quad (8)$$

On en déduit  $\underline{I}_s$  en fonction de  $\underline{V}_G$  et  $\underline{I}_G$

$$\underline{I}_s = - \frac{(n_3/n_2) \underline{V}_G + j (n_1 n_3/n_2^2) L \omega \underline{I}_G}{R + j (n_3/n_2)^2 L \omega} \quad (9)$$

Cette équation est de même forme que l'équation (4), et les mêmes remarques lui sont applicables. Le taux de compoundage est conditionné par le choix de l'inductance L et celui du rapport de transformation  $n_1/n_2$ .

On peut perfectionner le calcul en tenant compte, en plus des éléments déjà mentionnés à propos du compoundage série, du courant magnétisant au niveau de l'équation (5) et des fuites magnétiques au niveau de l'équation (7).

Le compoundage parallèle peut également être obtenu par mise en parallèle au niveau du courant continu. Dans ce cas le transformateur doit être dissocié en un transformateur de courant et un transformateur de tension, le primaire de ce dernier devant toujours être en série avec une inductance; chaque transformateur débite sur un pont, les deux ponts étant mis en parallèle par leurs bornes à courant continu. Cette dernière technique est plus rarement employée.

## 17 Exemple de système d'excitation : l'E.S.C.R.T. :

Nous étudierons maintenant un système très répandu à bord des navires, il s'agit du système E S C R T fabriqué par l'entreprise Jeumont-Schneider. De nouveaux systèmes de régulation voient actuellement le jour, mais ils sont d'une approche beaucoup moins simple, ils font appel au formalisme d'état..., nous ne les étudierons pas, ils sont largement hors programme !

### 17.1 Performances de la régulation :

#### 17.1.1 En régime établi :

Le dispositif de compensation étant **hors service**, la tension est maintenue constante à  $\pm 1,5$  % de la valeur de la tension à vide.

Si le dispositif de compensation est **en service**, la tension est maintenue constante à  $\pm 1,5$  % de la tension à vide, pour  $\cos \varphi = 0,8$ , et à intensité donnée, la tension varie dans le même sens que le facteur de puissance.

### 17.1.2 En régime variable :

Une variation de charge égale à  $\frac{P_{\max}}{2}$  à partir de la moitié de la charge maximum  $\frac{P_{\max}}{2}$ , produit une variation relative de tension de 10%, et le temps de retour à la tension stabilisée à  $\pm 3\%$  est de 0,5 seconde.

On peut alimenter à partir du réseau Force de bord les équipements électroniques, et supprimer les démarreurs sur les moteurs électriques d'une puissance inférieure à 60 kW.

### **17.2 Principe de fonctionnement de l'excitation et de la régulation (type ESCRT) :**

L'excitation est statique compound. Pour simplifier l'exposé de la théorie, on l'effectuera dans le cas d'un alternateur monophasé (Figure 55), le principe restant le même pour un alternateur triphasé.

La planche 6 donne le schéma détaillé du système d'excitation.

La figure ci-après représente le synoptique d'un régulateur ESCRT

- 1 : induit de l'alternateur,
- 2 : inducteur alternateur,
- 3 : self,
- 4 : primaire tension du transfo de courant,
- 5 : primaire intensité du transfo de courant,
- 6 : secondaire du transfo de courant,
- 7 : redresseur,
- 8 : enroulement de saturation du transfo de courant,
- 9 : régulateur.

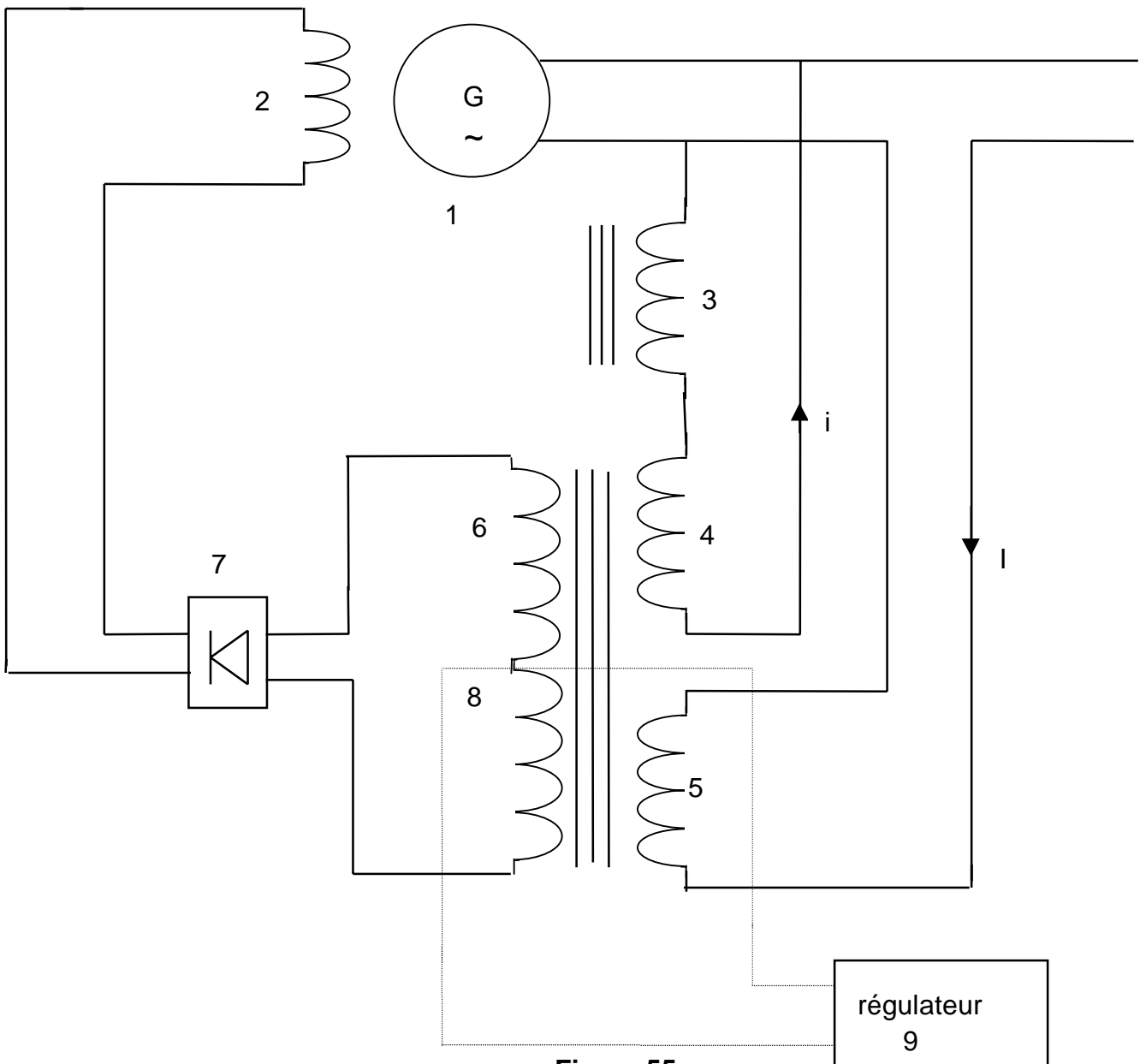


Figure 55

## 17.2.1 Fonctionnement :

Si l'on appelle  $R$  la résistance du rotor « vue » à travers le redresseur 7 et le transfo 6-4, on peut considérer que la tension  $U$  de l'alternateur est appliquée à la self 3 de réactance  $X$  et à  $R$  montée en série, d'où une impédance de circuit :

$$z = \sqrt{X^2 + R^2} \text{ et } U = Z.I$$

## 17.2.2 Fonctionnement à vide :

Le courant continu d'excitation  $J$  est fonction uniquement du courant alternatif  $i$ . Le point de fonctionnement est à l'intersection de la droite  $E = z.i$  et de la caractéristique à vide  $E = f(i)$  (ou  $f(J)$ ).

Cette tension  $E_0$  ainsi obtenue peut être modifiée par variation de  $Z$ , en agissant sur l'entrefer de la self (3), qui est réglable.

Il est à noter que :

Entrefer et tension à vide varient dans le même sens.

Le courant  $i_0$  est pratiquement en quadrature arrière avec la tension qui le produit.

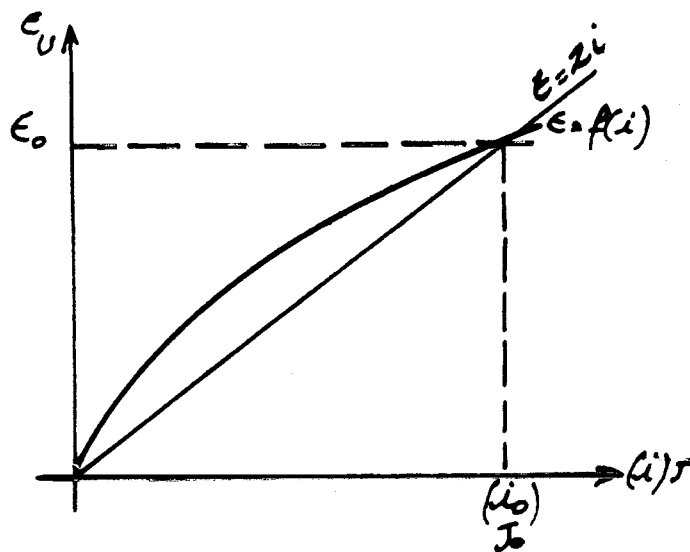


Figure 56

## 17.2.3 Fonctionnement en charge sans régulation :

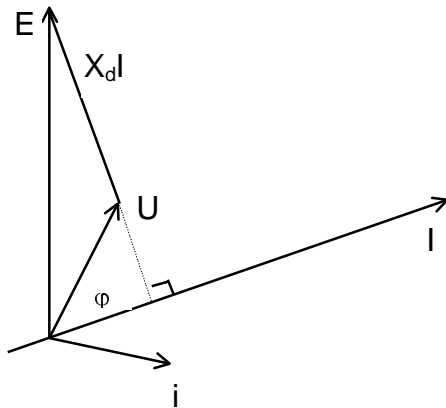


Figure 57

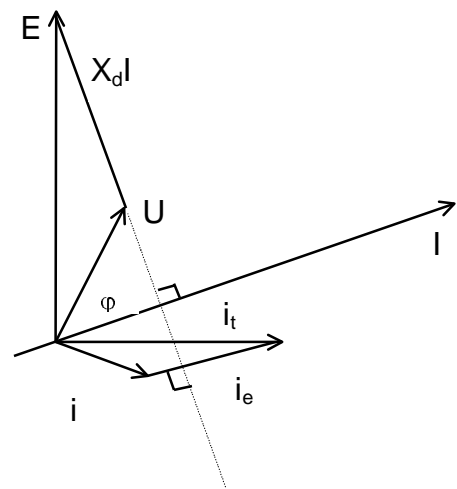


Figure 58

La Figure 57 représente le diagramme simplifié. Il s'établit un équilibre de fonctionnement tel qu'à un courant  $i = \frac{U}{Z}$  correspond une tension U (en quadrature avec i).

Pour retrouver la tension E, il faudrait un complément d'excitation, tel que l'on obtienne un courant  $i_t$ , en quadrature avec E, et qui ramène U à la valeur de E.

Ce complément d'excitation est fourni par le courant  $i_c$ , choisi proportionnel à I, et en phase avec lui.

La Figure 58 montre que les 2 triangles représentés sont semblables et que la correction de tension serait valable à toute charge si  $X_d$  était constant ; ( $i_c$  proportionnel à  $X_d \cdot i$ ). Ce n'est malheureusement pas le cas, l'alternateur étant toujours saturé. Il faut donc adjoindre un régulateur qui corrige  $i_t$  d'une façon plus précise. La simple adjonction d'un enroulement parcouru par un courant proportionnel à I ne suffit pas.

## 17.2.4 Transformateur de courant :

Le courant est fourni par l'enroulement primaire "courant" 5 de la Figure 55.

Le transformateur de courant peut être représenté par le schéma équivalent de la Figure 59.

Un transformateur parfait dont le primaire est shunté par une inductance magnétisante  $X_m$  du primaire.

Soit  $I = I_0 + I_1$  avec  $I_0$  correspondant au courant nécessaire pour vaincre la réluctance du circuit magnétique (faible car  $X_m$  est grand). Par ailleurs :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

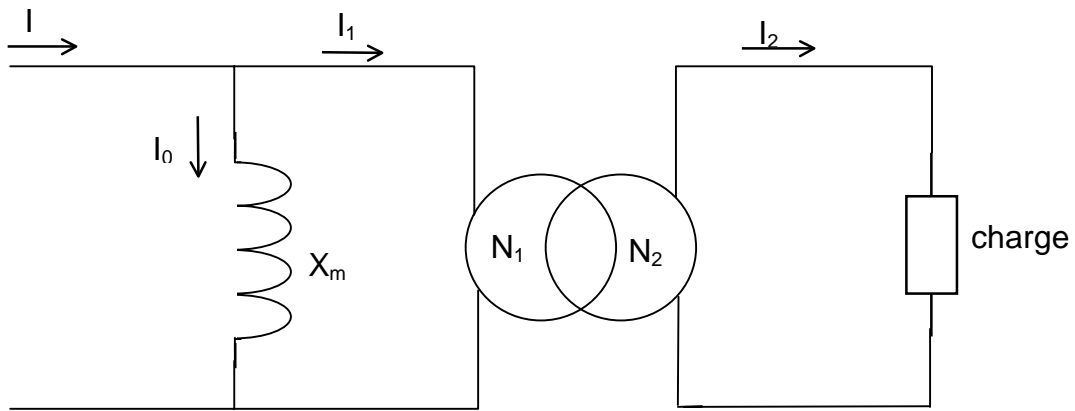


Figure 59

Ce transformateur est saturable

L'enroulement auxiliaire 8 parcouru par un courant continu  $i_1$ , provenant du régulateur 9 sature plus ou moins le circuit magnétique dont la réluctance varie.

Pour une valeur donnée du courant  $I$  débité par l'alternateur, une augmentation de  $i_1$  augmente la saturation, donc la réluctance du circuit. Par suite  $I_0$  doit augmenter et  $I_1$  diminuera, ainsi que  $I_2 = \frac{N_1 I_1}{N_2}$

on a donc ainsi la possibilité en agissant sur  $i_1$  de régler  $I_2$  qui est le courant secondaire du transfo, et par suite le courant  $J$  d'excitation. On peut ainsi parfaire le réglage de  $U$ .

Le rôle du régulateur 9 est de commander  $i_1$  par l'écart entre la tension  $U$  de l'alternateur et une tension de référence égale (ou proportionnelle) à celle que l'on voudrait avoir.

### 17.3 Régulation de la tension et répartition des charges réactives :

Le bloc régulateur se compose de 3 ensembles :

- Pont redresseur (RD) et détecteur de tension (BD).
- Amplificateur à thyristors (AT).
- Déclencheur magnétique pour thyristors(DMT).

et de 2 circuits :

- Répartition des charges réactives (CK).
- Contre-réaction (CR).

Ces ensembles et circuit sont représentés schématiquement sur la Figure 60.

### 17.3.1 Principe de fonctionnement :

- Le pont redresseur RD introduit dans le détecteur de tension une tension proportionnelle à celle de l'alternateur pour la comparer à une tension de référence. Il en sort une tension  $\Delta U$  appelée "erreur de tension".
- Si  $\Delta U > 0$ , (alternateur fournissant une tension trop élevée), la DMT commande une augmentation du courant  $i_1$  produit par l'amplificateur (AT) d'où diminution de l'excitation.
- Si  $\Delta U < 0$ , l'inverse se produit.
- Le transformateur TK alimente le circuit CK et corrige  $\Delta U$  pour tenir compte de la puissance réactive, et de la répartition de celle-ci lorsqu'il y a couplage avec un autre alternateur.
- Le circuit CR étouffe les oscillations et donne plus de stabilité au système.

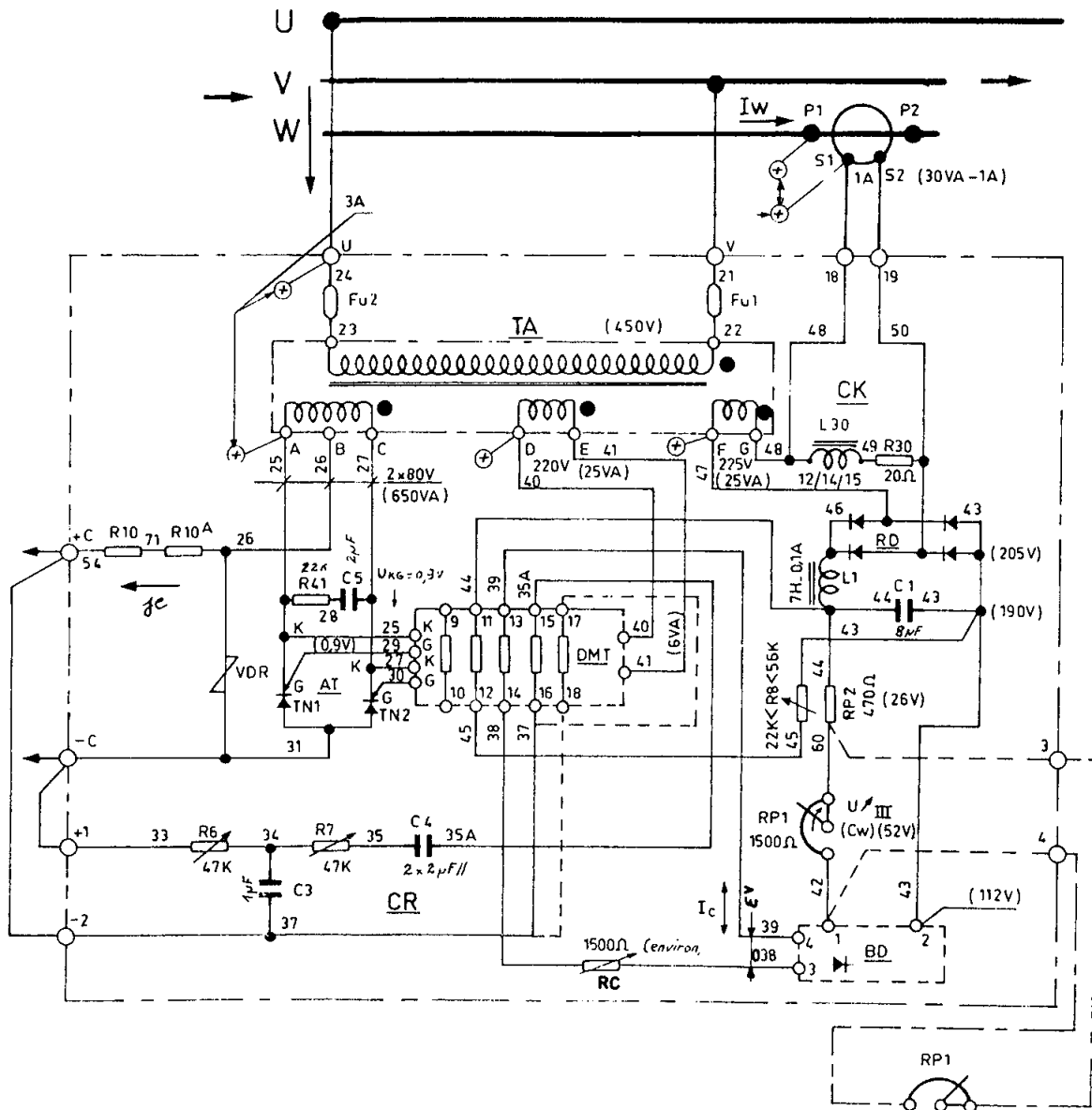


Figure 60

#### 17.4 Pont redresseur et détecteur de tension :

Voir Figure 60.

La tension reçue par le détecteur de tension BD provient du secondaire FG de (TA) qui donne une tension proportionnelle à celle de l'alternateur, tension qui est ensuite corrigée par le circuit (TK,CK) et redressée par le pont RD.  $L_1$  et  $C_1$  filtrent la tension continue qui entre dans BD après réglage par le potentiomètre  $RP_1$  qui permet de la faire varier, donc de choisir la tension de fonctionnement de l'alternateur.

Cette tension, appliquée en 1-2, est appelée "tension de consigne".



Le détecteur de tension va comparer cette tension de consigne avec la tension de référence donnée par 2 diodes zener  $Z_1$  et  $Z_2$  (Figure 61) stabilisées en température par les thermistances  $Th_1$  et  $Th_2$ .

La Figure 61 indique comment est réalisé le montage du détecteur de tension.

La chute de tension aux bornes des thermistances varie avec la température, (elles ont un coefficient de température négatif) et compense l'accroissement de tension Zener des diodes avec la température. L'ajustement de cette compensation se fait au moyen de  $R_3$  et  $R_4$ .

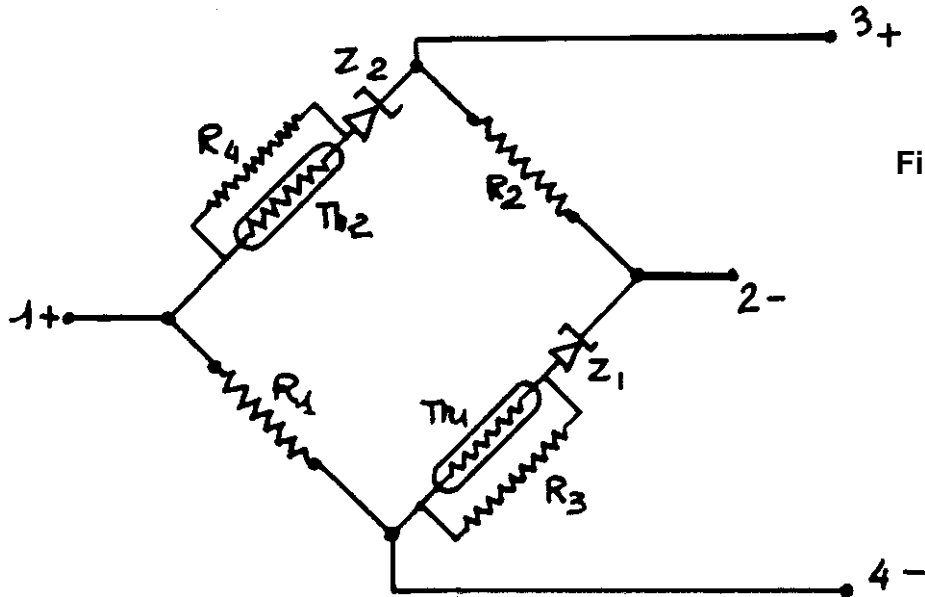


Figure 61

- Si la tension de consigne est correcte, le pont est équilibré et la tension entre les bornes 3 et 4 est nulle.
- Si la tension de consigne est trop élevée, 3 devient + et 4 devient -, il apparaît une tension  $\Delta U$  positive qui provoquera un courant positif dans l'enroulement 13-14 du DMT.
- Si la tension de consigne est trop faible  $\Delta U$  sera négative et 13-14 du DMT sera parcouru par un courant négatif.

### 17.5 Amplificateur à thyristors (AT) :

Le courant de sortie est le courant continu  $i_1$  de saturation des transformateurs d'intensité. La résistance  $R_{10}$  de la Figure 60 limite le courant maximal de sortie et diminue la constante de temps ( $t_c = \frac{L}{R}$ ) du circuit.

$Z_3$  et  $Z_4$  sont des diodes Zener qui protègent les thyristors  $TH_1$  et  $TH_2$  des éventuelles surtensions provenant du circuit de charge (circuit de saturation des transformateurs d'intensité). Elles limitent la tension aux bornes des thyristors à la valeur de leur tension de claquage.

L'ensemble  $R_{41} C_5$  absorbe les surtensions qui risquent de se produire en cas d'ouverture du circuit primaire de TA (circuits selfiques).

### 17.6 Déclencheur magnétique pour thyristors (DMT) :

Ce déclencheur est constitué par un ampli magnétique auto-saturé dont l'onde de sortie est appliquée au circuit gâchette-cathode des thyristors à contrôler.

L'ampli magnétique ayant la même alimentation que celle qui apparaît aux bornes cathode-anode des thyristors, on commande l'amorçage de ceux-ci en faisant varier l'angle d'allumage (Figure 62).

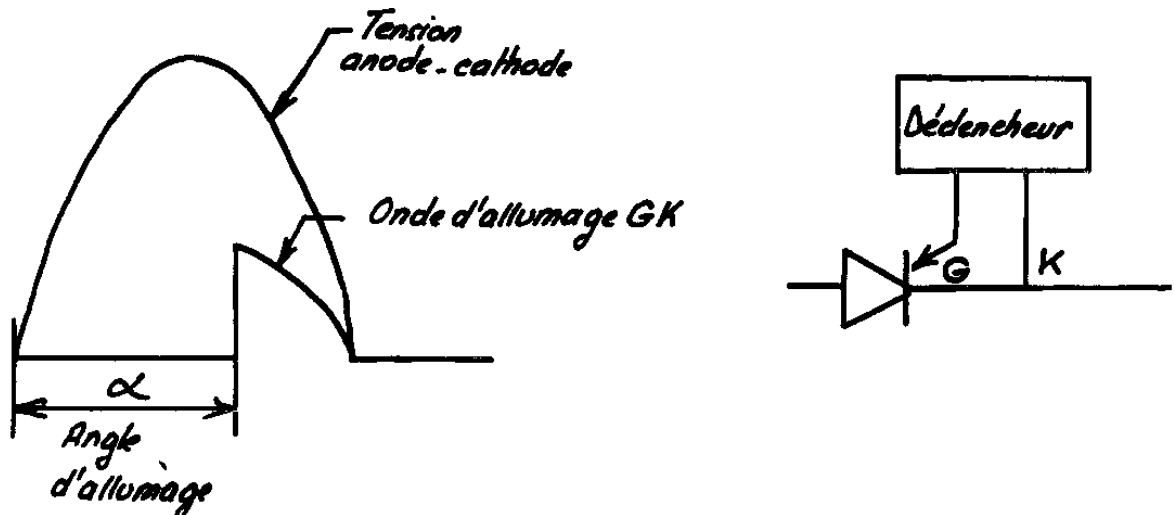


Figure 62

L'ampli magnétique possède 2 circuits de charge monoalternance (partie droite de la Figure 65), composés chacun d'un enroulement de 1520 tours, des diodes  $D_1$  et  $D_2$  et d'une diode Zener  $Z_1$  qui limite la tension appliquée au circuit GK.

Pendant l'alternance de charge, C1 se charge à travers D3 et R2. Le transistor TS1 se trouve débloqué lorsque la tension de C1 devient supérieure à celle de S3 (en fin d'alternance : voir Figure 66).

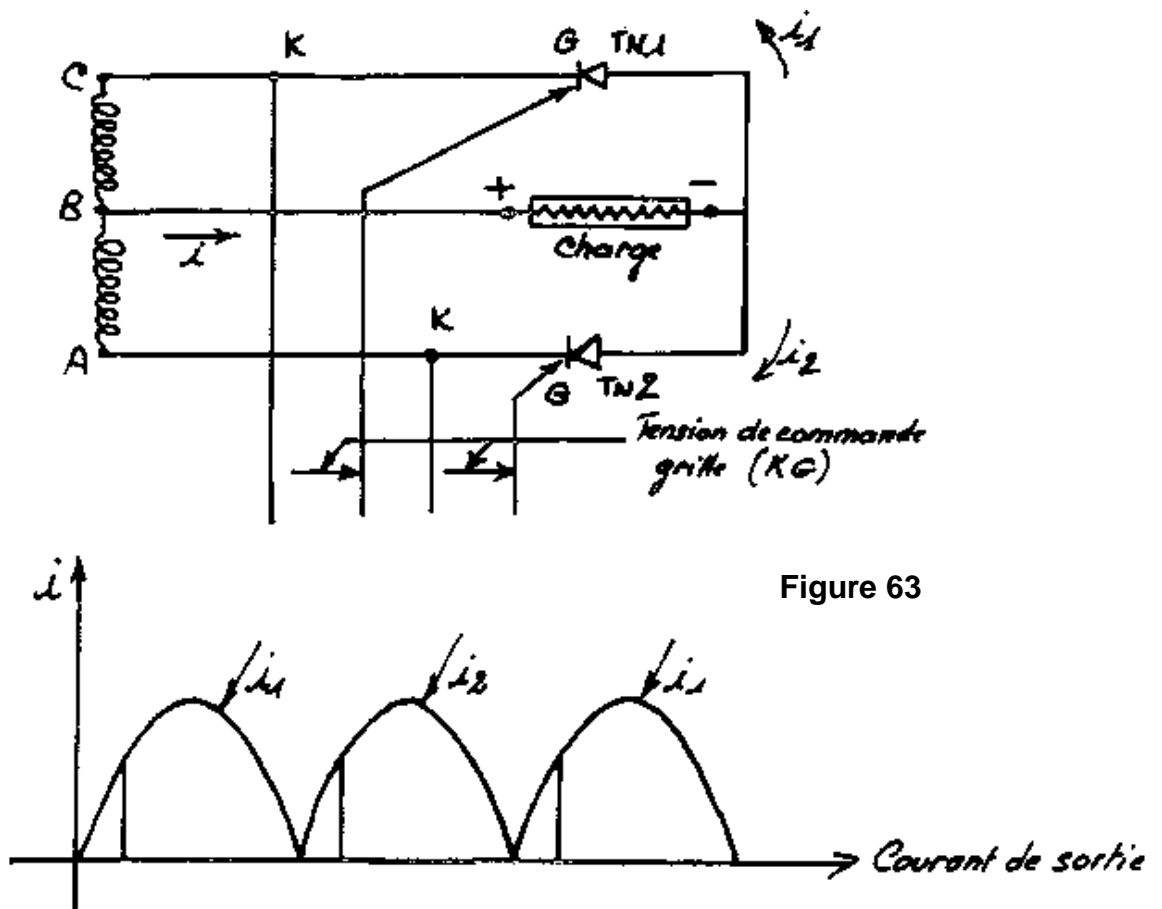


Figure 63

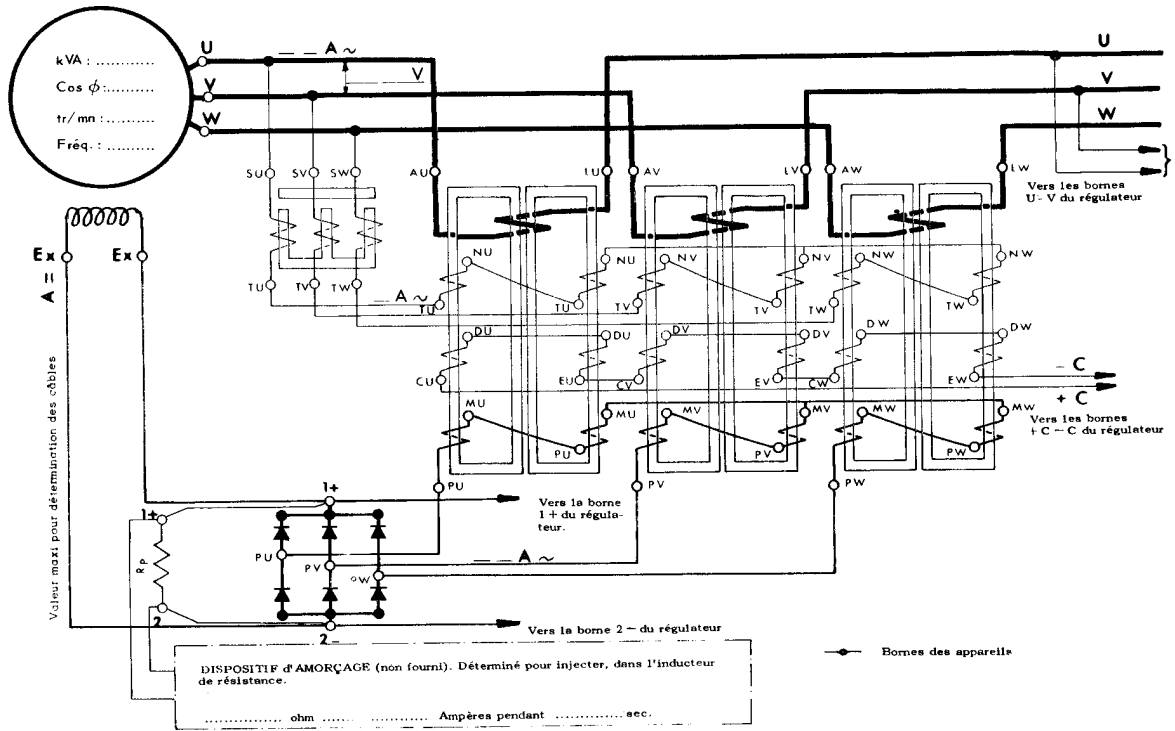
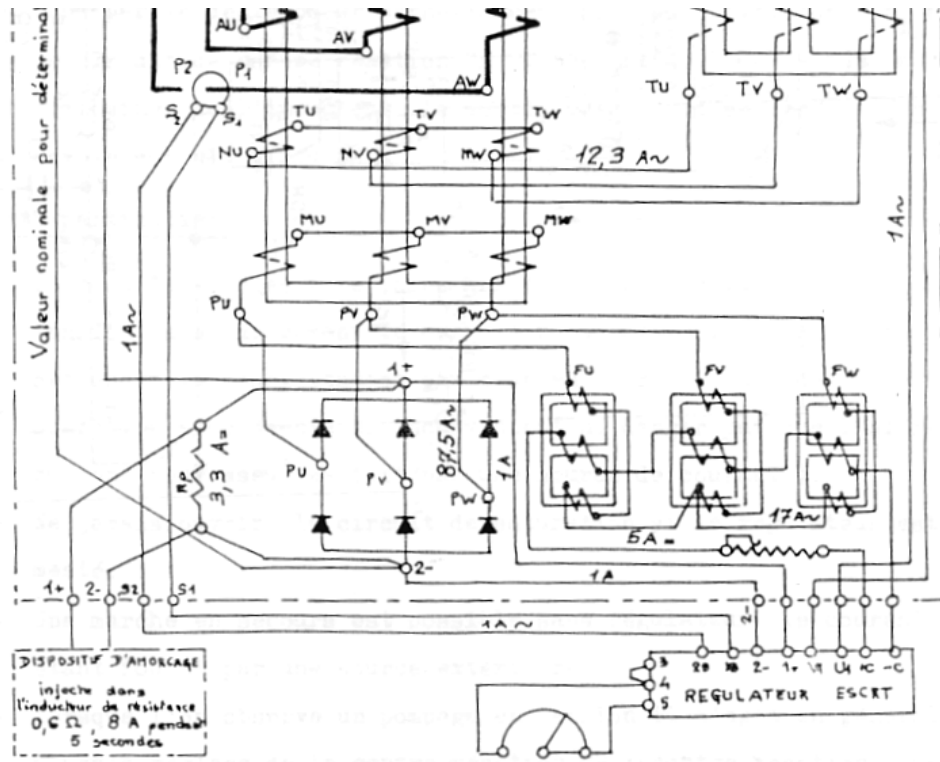


Figure 64



Jeumont-Schneider

Figure 65

La partie gauche de la Figure 65 représente un circuit de polarisation interne de l'ampli magnétique qui permet de réduire les effets de variations de tension et de fréquence d'alimentation. Ce circuit, dit de désaturation, possède une limitation d'intensité pour conserver à l'ampli magnétique les mêmes qualités de sensibilité qu'un montage ordinaire : le réglage s'effectue au moyen de  $P_1$ . Par ailleurs, un circuit appelé « entrée sensible » peut bloquer la désaturation en agissant sur le transistor de limitation d'intensité (bornes 17-18).

### 17.6.1 Fonctionnement :

Le fonctionnement du déclencheur est assez complexe, aussi nous nous limiterons à en donner une idée qualitative.

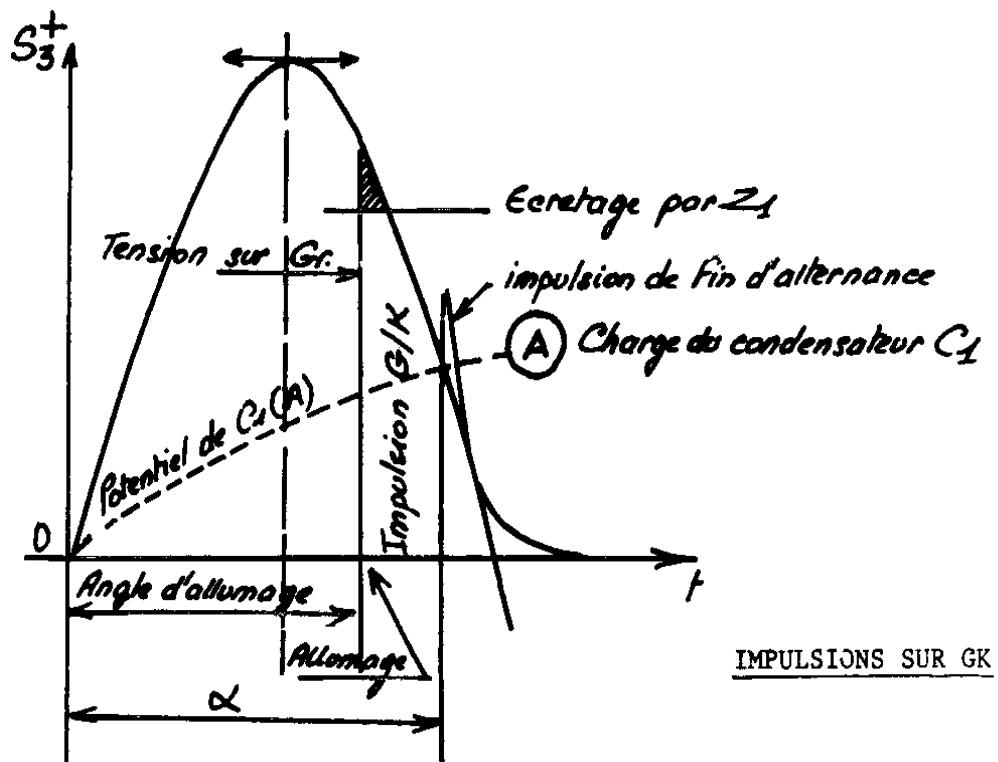


Figure 66

Pour avoir une bonne précision dans l'instant du début de conduction des thyristors, il est nécessaire d'utiliser un signal de commande à front raide, en l'occurrence la tension de sortie d'un amplificateur magnétique qui a pris le nom de « déclencheur magnétique pour thyristors » ou DMT. Sa caractéristique fondamentale est celle de l'angle d'allumage en fonction des ampères tours de commande Figure 67.

La Figure 66 représente l'onde de tension durant la demi-période positive, tant que le noyau 1-2 (1520 t) n'est pas saturé, aucun courant ne circule et aucune tension n'apparaît en GK. Dès que le noyau est saturé, toute la tension se reporte sur le circuit extérieur en GK et  $R_1$ , d'où impulsion entre gâchette et cathode et amorçage du thyristor.

L'instant où la saturation a lieu dépend des ampères tours de commande (sur les enroulements 9-10,11-12, 13-14, 15-16) ce qui donne la relation angle d'amorçage en fonction des AT de commande de la Figure 67 ci-après.

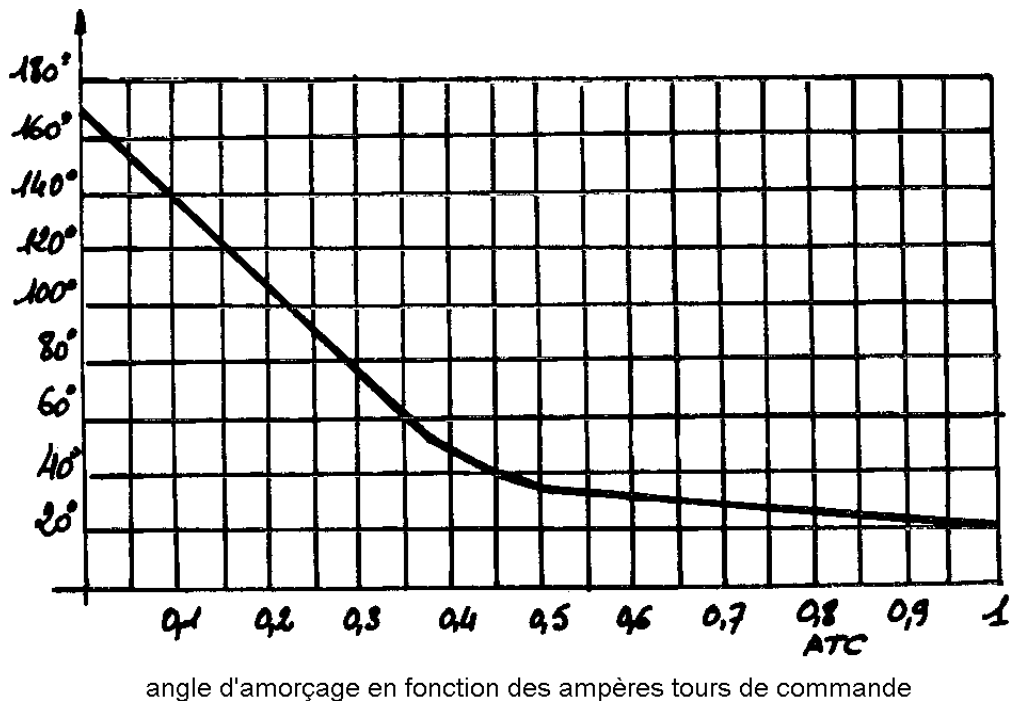


Figure 67

La diode Zener  $Z_1$  en parallèle avec GK écrête l'amplitude de l'impulsion et réduit la puissance dissipée par le thyristor. Durant la demi-période négative, le thyristor et sa commande sont bloqués.

Un autre circuit utilise le thyristor  $TS_1$  et a pour but de donner une impulsion de fin d'alternance de façon qu'au moment où l'on supprime l'impulsion d'amorçage (c'est à dire au moment où l'on coupe une charge selfique), le thyristor puisse rester conducteur alors que la tension d'alimentation  $c_3s_3$  est négative. En effet, le courant de décharge selfique garde le même sens que celui qu'il avait durant l'alternance positive de la tension et il faut que ce « post courant » ait lieu. Il ne peut avoir lieu que si la gâchette du thyristor est positive, même si l'on est en alternance de tension négative.

Le condensateur  $C_1$  se charge à travers  $R_2$  et  $D_3$  et le potentiel du point A s'élève pendant l'angle  $(0, \alpha)$  (Figure 66).  $TS_1$  est bloqué car le potentiel du point A par rapport à S est négatif, donc  $TS_1$  est un interrupteur ouvert.

En  $\alpha$ , le condensateur  $C_1$  peut se décharger à travers  $TS_1$  qui est débloquent (potentiel de A supérieur à celui de S), et envoie une décharge brutale dans le circuit de sortie, le maintenant à un potentiel positif un certain temps après que l'alternance de tension soit devenue négative.

L'angle  $\alpha$  est situé aux alentours de  $165^\circ$  (entre  $160^\circ$  et  $175^\circ$ , et non réglable).

La Figure 60 montre que l'on a un 2<sup>ème</sup> déclencheur alimenté par  $e_4s_4$  décalé de  $180^\circ$  par rapport à  $e_3s_3$  de façon à fonctionner quand le premier est bloqué par sa tension inverse.

L'enroulement 9-10 sert à la polarisation de l'ampli par l'intermédiaire de R8. Un courant positif dans 9-10 augmente le courant de sortie.

Si la tension appliquée au détecteur de tension augmente, le courant dans 13-14 augmente la saturation du DMT de façon à accroître le courant de sortie du régulateur, et diminuer l'excitation de l'alternateur.

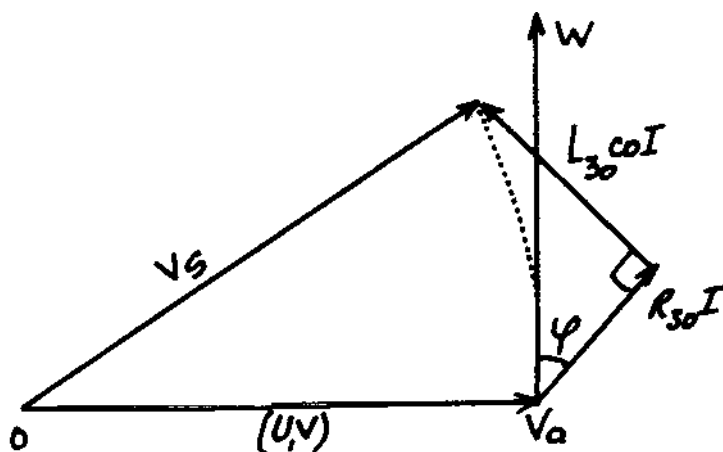
### 17.7 Circuit de répartition des charges réactives (CK) :

Le primaire du transformateur TA (Figure 60) détecte la tension (U,V) de l'alternateur. Sur la 3<sup>ème</sup> barre W de celui-ci, on place un transformateur d'intensité TK qui fournit aux éléments  $R_{30}$  et  $L_{30}$  une intensité proportionnelle au courant I débité et en phase avec lui.

Les tensions aux bornes de  $R_{30}$  et  $L_{30}$  s'ajoutent vectoriellement à celle aux bornes de FG ( $V_a$ ) et donnent une tension résultante  $V_s$ , appliquée à RD et « vue » par le détecteur de tension BD (Figure 68).

Les valeurs de  $R_{30}$  et  $L_{30}$  sont choisies de telle façon que pour le  $\cos \varphi$  nominal ( $\cos \varphi = 0,8$  en général) on ait choisi  $V_s = V_a$ .

Figure 68



Si le  $\cos \varphi$  est inférieur à la valeur nominale (l'alternateur fournit trop de puissance réactive), le détecteur « verra »  $V_s > V_a$  et réagira comme si la tension était trop élevée, et diminuera l'excitation, donc l'alternateur fournira moins de réactif (Figure 69).

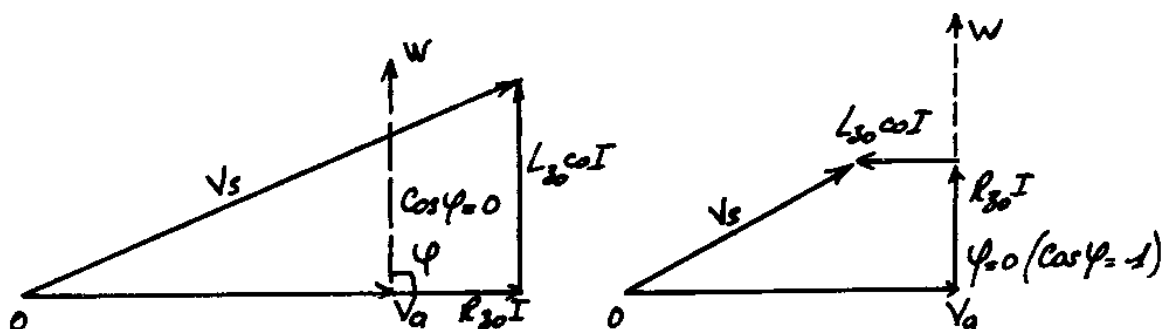


Figure 69

**17.8 Circuit de stabilisation ou de courte réaction (CR) :**

Alimenté par la tension d'excitation (bornes 1-2) (Figure 60), il comporte une cellule de filtrage ( $R_6$ ,  $R_7$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ) et un enroulement de commande (15-16) dans le DMT.

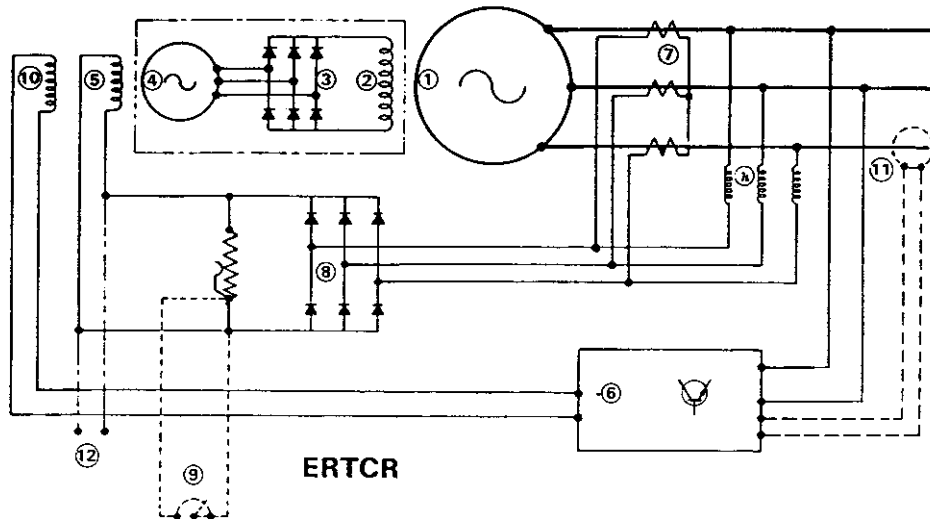
Lorsque l'on est en régime permanent, le condensateur  $C_4$  découple les bornes 15 et 16 de la tension continue constante appliquée entre 1 et 2.

Une augmentation rapide de l'excitation est reportée sur les bornes 15-16 et produit dans l'enroulement un courant qui augmente le courant de sortie du régulateur (donc qui a tendance à diminuer l'excitation) et combat la variation initiale de l'excitation. Il y a amortissement des régimes transitoires et amélioration de la stabilité du régulateur.



### 17.9 Autres synoptiques d'excitation d'alternateur :

#### SANS BAGUES SANS BALAIS



générateur { 1 stator  
2 rotor

3.pont redresseur,

4.induit,

5.inducteur,

6.régulateur,

7.transformateurs d'intensité

8. pont redresseur,

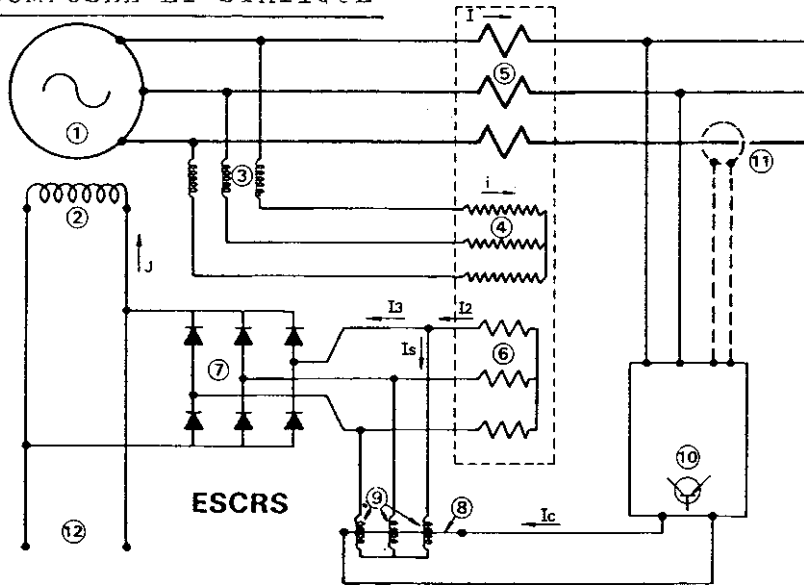
9.réglage de la tension,

10.deuxième inducteur de l'excitatrice,

11.transformateur de courant

12.circuit d'amorçage

## COMPOSEE ET STATIQUE



générateur { 1 stator  
2 rotor

3. selfs,

primaire transformateur { 4 information tension  
5 information intensité

6. secondaire transformateur,

7. pont redresseur,

8. courant de saturation,

9. selfs saturables,

10. régulateur,

11. transformateur de courant pour opérations annexes,

12. circuit d'amorçage.