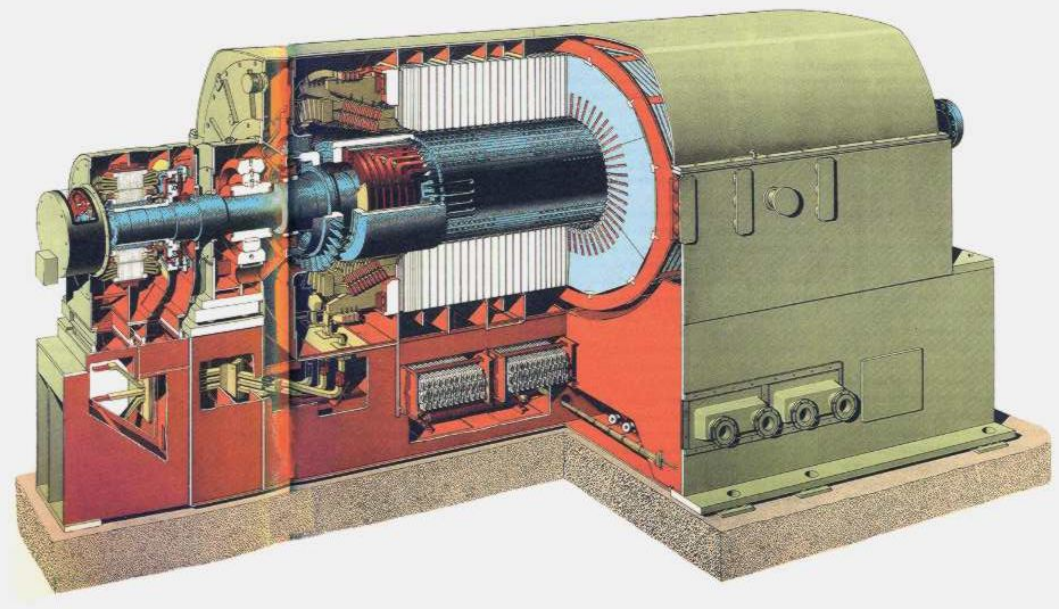
L3

MACHINES SYNCHRONES

Cours et Problèmes

Claude CHEVASSU



version du 5 février 2014

Table des matières

1 Machines synchrones **1**

1.1 Symboles . . . 2

1.2 Construction - Principe . . . 2

1.2.1 Force électromotrice . . . 2

1.2.2 Fonctionnement en charge . . . 11

1.3 Alternateur autonome . . . 18

1.3.1 Machine synchrone couplée au réseau . . . 19

1.3.2 Diagramme de Blondel . . . 24

1.4 Couplage des alternateurs . . . 30

1.4.1 Condition préalable au couplage . . . 32

1.4.2 Répartition des puissances entre deux alternateurs . . . 35

1.4.3 Conséquences des fautes de couplage . . . 37

1.4.4 Répartition optimale des puissances . . . 38

2 Statisme **43**

2.1 Statisme . . . 43

2.2 Stabilité du couplage . . . 45

2.2.1 Statisme négatif . . . 46

2.3 Répartition des charges . . . 48

3 Sécurités d'un alternateur **51**

4 Délestage **53**

4.1 Augmentation progressive de la charge . . . 53

4.2 Perte d'un groupe électrogène . . . 54

4.3 Défauts électriques 54

5 Excitation **55**

5.1 Généralités 55
5.1.1 Définition du système d'excitation 55
5.1.2 Fonctions devant être assurées par le système d'excitation 55
5.1.3 Comportement vis-à-vis des petites perturbations 56
5.2 Sources de puissance rotorique 56
5.2.1 Alternateur-excitateur débitant sur redresseurs 57
5.3 Modalités de réglage de l'excitation 57
5.3.1 Autoalimentation 58
5.4 Théorie simplifiée de la composition 61
5.4.1 Principe 61
5.4.2 Composition série 62
5.4.3 Composition parallèle 64
5.5 Exemples d'excitation 66

6 Exercices et problèmes **69**

6.1 Exercices et problèmes sur la machine synchrone 69
6.1.1 Alternateur monophasé 69
6.1.2 Alternateur triphasé 69
6.1.3 Alternateur triphasé 70
6.1.4 Moteur synchrone 70
6.1.5 Compensateur synchrone 71
6.1.6 Groupe convertisseur tournant 72
6.1.7 Couplage d'un alternateur sur le réseau : faute de couplage 73
6.1.8 Questions sur le statisme 73
6.1.9 Exercice sur le statisme 74
6.1.10 corrigé de l'exercice 6.1.1, page 69 76
6.1.11 corrigé de l'exercice 6.1.2, page 69 76
6.1.12 corrigé de l'exercice 6.1.3, page 70 77
6.1.13 corrigé de l'exercice 6.1.4, page 70 77
6.1.14 corrigé de l'exercice 6.1.5, page 71 80

6.1.15 corrigé de l'exercice 6.1.6, page 72 82
6.1.16 corrigé de l'exercice 6.1.7, page 73 85
6.1.17 Corrigé des questions sur le statisme 86
6.1.18 Corrigé de l'exercice sur le statisme 6.1.9 page 74 87

Chapitre 1

Machines synchrones

La machine synchrone est le générateur d'énergie électrique par excellence, celui qui alimente les réseaux transportant l'énergie sous forme de tensions alternatives sinusoïdales, on l'appelle alors *alternateur*. Les centrales de production d'énergie électrique sont équipées d'alternateurs triphasés. De l'alternateur de bicyclette délivrant seulement quelques watt à l'alternateur de centrale nucléaire fournissant 1,6 GW le principe de fonctionnement et les modélisations classiques sont relativement semblables.

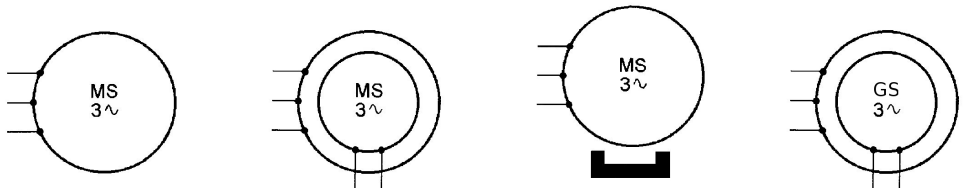
Comme toutes les machines électriques tournantes, la machine synchrone est réversible et peut également fonctionner en moteur. Pour des raisons économiques, au-delà de 10 MW, on ne trouve plus que des moteurs synchrones car on sait les faire fonctionner à $\cos\varphi = 1$, ce qui permet de réduire significativement le courant absorbé par rapport à un moteur asynchrone de même puissance et donc de diminuer la section des câbles et le calibre des protections. Les moteurs des paquebots à propulsion électriques sont des machines synchrones autopilotées d'une puissance unitaire de 20 MW. Actuellement, le moteur le plus puissant du monde est un moteur de 100 MW entraînant les ventilateurs d'une soufflerie apparteant à la NASA. [1]

Dans une première partie l'alternateur sera présenté de façon très simple. Les particularités du fonctionnement en moteur seront vues à la fin du chapitre.

1. NASA : National Aeronautics and Space Administration ou administration nationale de l'aéronautique et de l'espace, organisme qui s'occupe des programmes spatiaux aux États Unis d'Amérique.

1.1 Symboles

Voici les différents symboles utilisés pour représenter la machine synchrone, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice (alternateur) :



(a) Symbole général d'un moteur synchrone.

(b) Symbole d'un moteur synchrone triphasé à rotor bobiné.

(c) Symbole d'un moteur synchrone triphasé à aimants.

(d) Symbole d'un alternateur triphasé à rotor bobiné.

FIGURE 1.1 – Symboles de la machine synchrone.

1.2 Construction - Principe

Quelque soit sa constitution et son nombre de pôles, une machine synchrone est constituée de deux circuits indépendants :

— **Le bobinage d'excitation** : il est constitué d'un bobinage enroulé sur le rotor et traversé par le courant continu « d'excitation » : I_e. C'est lui qui permet la création des pôles magnétiques dits « rotoriques » et l'instauration d'un flux donné dans le circuit magnétique. Ce bobinage est parfois remplacé par des aimants permanents surtout dans le domaine des petites et moyennes puissances.

— **Le circuit d'induit** : il est constitué des trois bobinages triphasés, de constitution symétrique, pratiqué sur le stator de façon répartie, et par lesquels transite la puissance électrique de la machine.

Il est à noter que, si les enroulements statoriques sont fixes, celui de l'excitation est tournant.

1.2.1 Force électromotrice

Dans le fascicule intitulé « Généralités sur les machines électriques », nous avons vu que l'on pouvait produire une tension sinusoïdale à l'aide d'un induc-

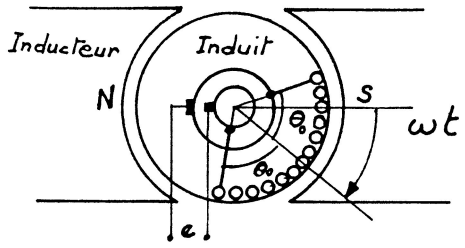


FIGURE 1.2 – Constitution d'une machine synchrone : induit tournant, inducteur fixe.

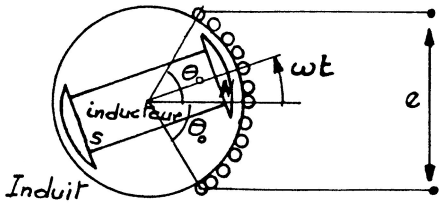


FIGURE 1.3 – Constitution d'une machine synchrone : induit fixe, inducteur tournant.

teur fixe et d'un induit mobile. Cette tension a pour valeur :

$$e = nN\phi \sin\theta_0 \cos\omega t$$

Cette tension est recueillie par des contacts glissants (bagues). Seul le déplacement relatif de l'induit par rapport à l'inducteur importe : on peut donc obtenir le même résultat en prenant un *induit fixe* et un *inducteur mobile*. la réalisation sera plus simple : seul le courant continu d'excitation de l'inducteur traversera des contacts glissants. L'induit pourra être plus complexe (induit triphasé) et parcouru par des courants plus élevés.

1.2.1.1 Exemple d'enroulement d'induit

On remarque que deux conducteurs de l'induit diamétralement opposés ont des forces électromotrices de même module, en opposition de phase. On réalisera donc un enroulement analogue à celui d'une dynamo à courant continu : la figure 1.4 montre un exemple pour 10 conducteurs.

On remarque que la f.é.m. est maximale quand les pôles sont perpendiculaires à l'axe de la bobine ainsi constituée.

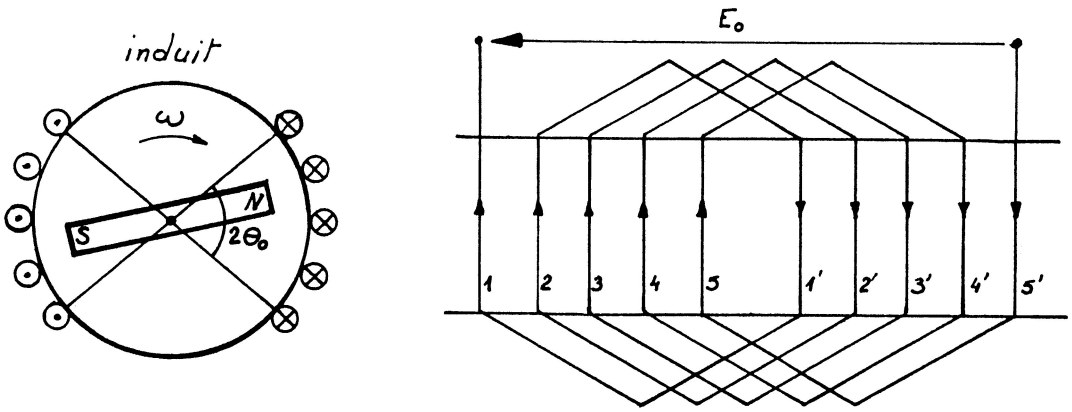


FIGURE 1.4 – Induit d'une machine synchrone à 10 conducteurs.

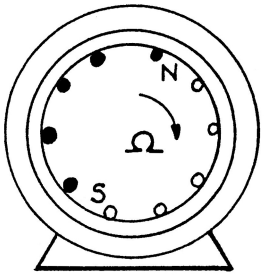


FIGURE 1.5 – Inducteur d'une machine synchrone à pôles lisses.

NOTA : Le bobinage de l'inducteur ne présente aucune difficulté de principe : on dispose un certain nombre de spires autour des pôles du rotor. Cet inducteur sera alimenté en courant continu d'excitation par l'intermédiaire de deux bagues conductrices.

On peut utiliser un inducteur à pôles lisses (dont l'entrefer est constant) : les spires sont disposées dans des encoches comme le montre la figure 1.5, ou une machine à pôles saillants (dont l'entrefer est variables) comme le montre la figure 1.7.

1.2.1.2 f.é.m.

Soit n_1 le nombre total de conducteurs mis en série (il est différent du nombre total n de conducteurs disposés sur l'induit) (dans l'exemple de la figure 1.4 $n_1 = 10$), on a :

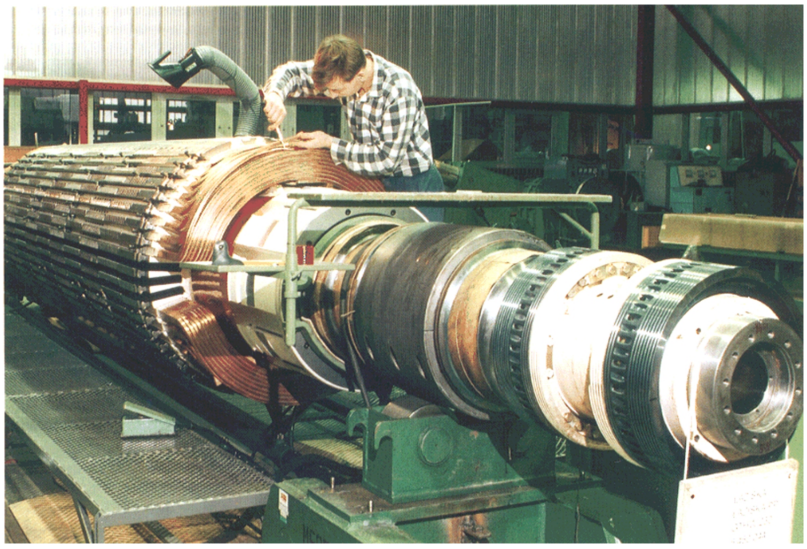


FIGURE 1.6 – rotor d'une machine synchrone à pôles lisses.

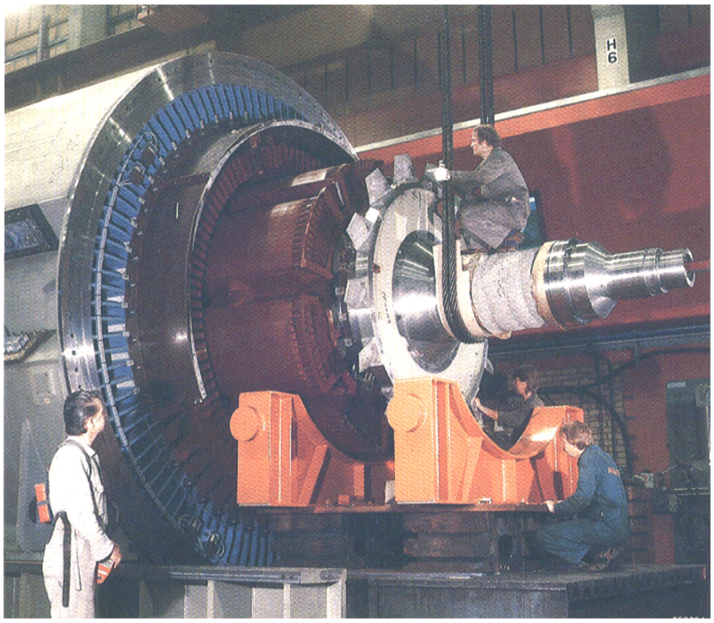


FIGURE 1.7 – rotor d'une machine synchrone à pôles saillants.

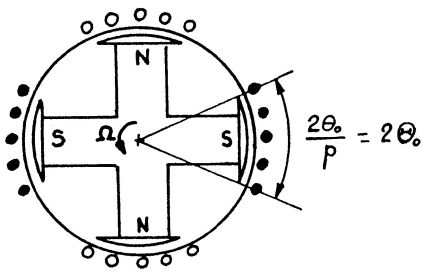


FIGURE 1.8 – Exemple de bobinage d'une machine synchrone à 2 paires de pôles et 20 conducteurs sur l'induit.

$$n_1 = n\frac{4\theta_0}{2\pi} \text{ soit } n = \frac{\pi}{2\theta_0}n_1$$

La force électromotrice obtenue est d'autre part doublée par l'utilisation des conducteurs diamétralement opposés, soit finalement, en notant N_S la vitesse de rotation :

$$e = \frac{\pi n_1}{2\theta_0} \times 2 \times N_S\phi \sin\theta_0 \cos\omega t$$

$$e = \frac{\pi \sin\theta_0}{\theta_0} N_S n_1 \phi \cos\omega t$$

Cas général : alternateur à $2p$ pôles L'inducteur comporte $2p$ pôles, et l'induit comporte p fois le bobinage précédent : par exemple $p = 2$; $n_1 = 20$, voir la figure 1.8.

Cette machine est équivalente à une machine bipolaire pour laquelle : $\begin{cases} \omega = p\Omega_S \\ \theta = p\Theta \end{cases}$ et comportant le même nombre n_1 de conducteurs. N_S devenant pN_S, la force électromotrice s'écrira donc :

$$e = \frac{\pi \sin\theta_0}{\theta_0} \times n_1 \times p \times N_S \times \phi \times \cos\omega t$$

avec $\theta_0 = p\Theta_0$

Sa valeur efficace E est telle que :

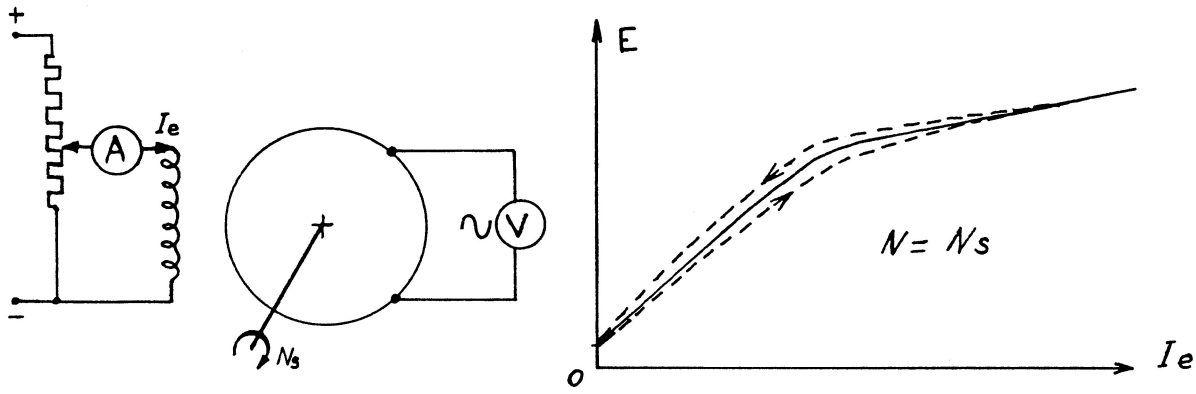


FIGURE 1.9 – Caractéristique à vide d'une machine synchrone.

$$E = \left(\frac{\pi \sin\theta_0}{\sqrt{2}\theta_0}\right) \times n_1 \times p \times N_S \times \phi(I_e)$$

Le facteur entre parenthèses, appelé coefficient de Kapp, tient compte en particulier de la répartition des conducteurs à la périphérie du stator et donc des déphasages existant entre les f.é.m. qui y sont induites.

En introduisant un coefficient k lié à la construction, on aura finalement :

$$E = kN_S\phi(I_e)$$

avec : $e = E\sqrt{2}\cos\omega t$

$$\omega = p\Omega \text{ ou } f = pN_S$$

Cette dernière formule qui relie la fréquence, le nombre de pôles et la vitesse de rotation, est identique à la formule de Ferraris sur les inductions tournantes.

1.2.1.3 Caractéristique à vide

La f.é.m. est proportionnelle à la vitesse de rotation et au flux magnétique. La fréquence étant en général imposée, on devra entraîner l'alternateur à vitesse constante N_S.

On relève expérimentalement la f.é.m. E en faisant varier le courant continu d'excitation I_e et on trace la caractéristique à vide, qui, à un facteur près, est la courbe d'aimantation du circuit magnétique comme le montre la figure 1.9.

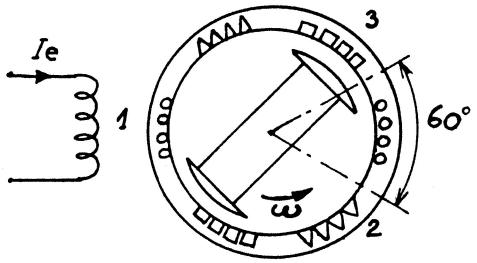


FIGURE 1.10 – Alternateur triphasé : répartition des trois enroulements de l'induit.

1.2.1.4 Alternateur triphasé

Le coefficient de Kapp est maximal pour $\theta_0 = 0$ (et vaut 2,22) ; il décroît si θ_0 augmente et ne vaut plus que 1,41 pour $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$. Comme les conducteurs, tous en série, ont les mêmes pertes Joule il est donc peu rentable de disposer les conducteurs sur toute la périphérie de l'induit. On peut prendre : $2\theta_0 = \frac{2\pi}{6}$. Le facteur de Kapp vaut encore 2,12 et la bobine ainsi constituée n'occupe que le tiers de l'induit.

On peut alors disposer deux autres enroulements identiques, électriquement indépendants comme le montre la figure 1.10.

Ces enroulements présenteront des f.é.m. de même valeur E, de même pulsation ω, mais déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ en raison de leur disposition dans le stator :

$$\begin{cases} e_1 = E\sqrt{2}\cos(\omega t) \\ e_2 = E\sqrt{2}\left(\cos\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_3 = E\sqrt{2}\left(\cos\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

On pourra ensuite coupler en étoile ou en triangle les trois enroulements. Tout le stator est utilisé. Dans la suite du cours, nous n'étudierons que des alternateurs triphasés en rapportant les grandeurs à une phase (en ramenant le montage en étoile si nécessaire par la transformation de Kennelly). Le schéma de principe d'un tel alternateur est donné à la figure 1.11.

1.2.1.5 Excitation de la machine synchrone

L'inducteur doit être alimenté en tension continue. on peut utiliser :

— Une génératrice à courant continu auto-excitée.

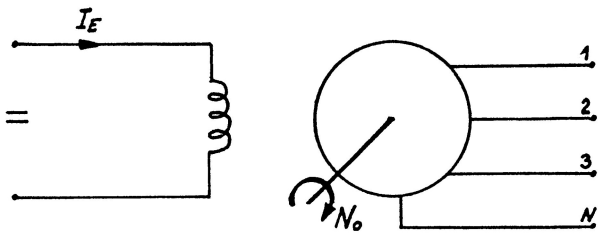


FIGURE 1.11 – Alternateur triphasé : schéma de principe.

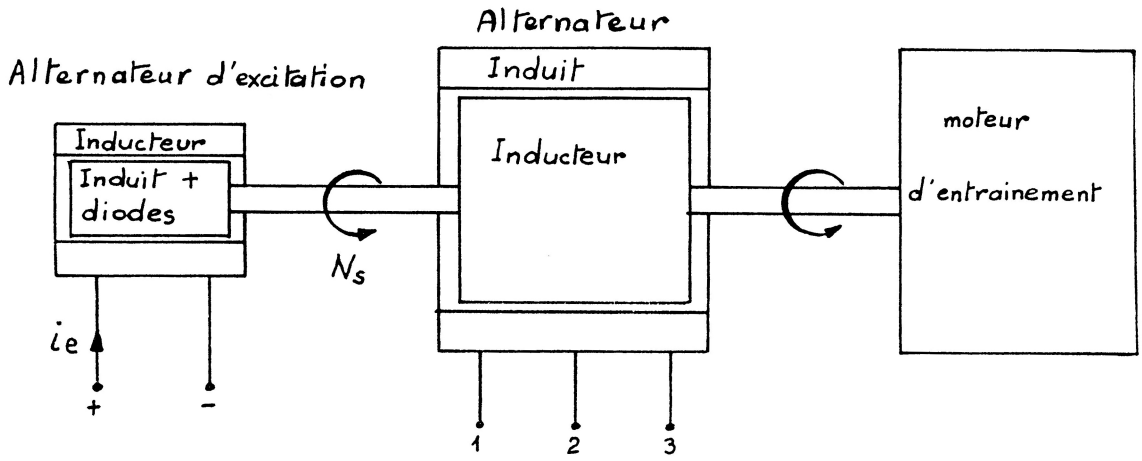


FIGURE 1.12 – Schéma de principe d'un alternateur triphasé sans bagues ni balais.

— Un petit alternateur dont on redresse la tension. On peut dans ce cas se passer de balais : l'alternateur d'excitation est à induit tournant ; sa tension, redressée par des diodes, excite l'inducteur tournant de l'alternateur principal comme le montre la figure 1.12. Le courant i_e est fourni par un régulateur électronique chargé de maintenir la tension de sortie constante, l'alternateur d'excitation sert en outre d'amplificateur de puissance.

— Des redresseurs, commandés ou non, utilisant une tension alternative. Dans le cas d'un fonctionnement en alternateur, on peut utiliser la tension alternative produite ; on obtient un montage auto-excité qui obéit aux mêmes conditions d'amorçage que les génératrices à courant continu (présence de flux rémanent en particulier).

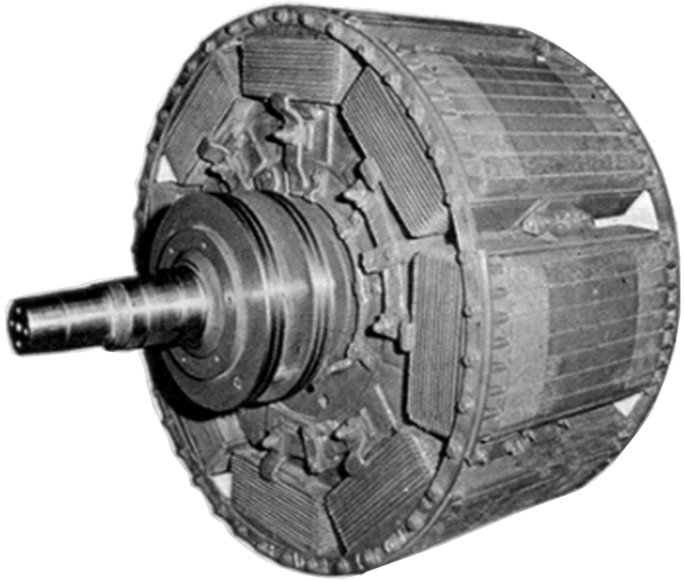


FIGURE 1.13 – rotor d'un moteur de locomotive BB 15055 de puissance 5,6 MW, on distingue les bagues permettant l'injection du courant continu.

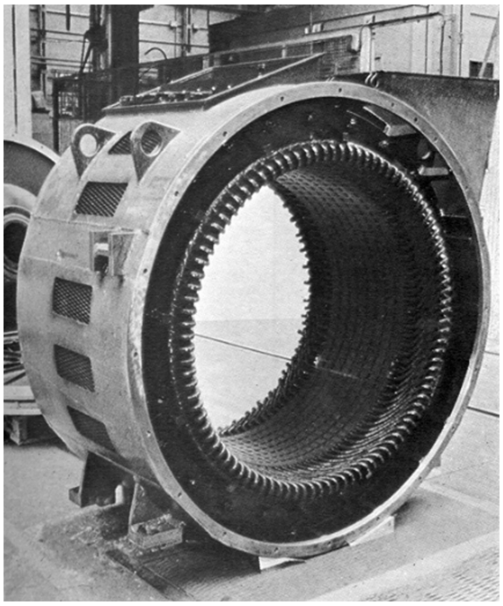


FIGURE 1.14 – stator d'un moteur de locomotive BB 15055 de puissance 5,6 MW.

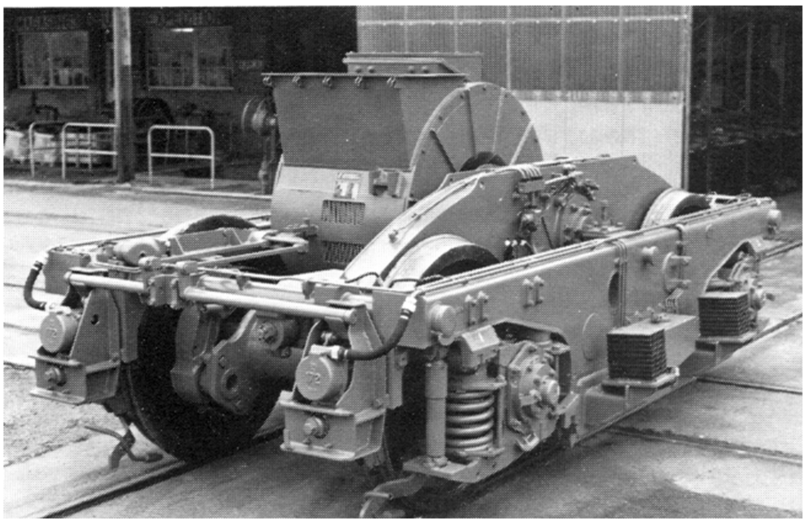


FIGURE 1.15 – moteur monté sur un bogie d'une locomotive BB 15055.

1.2.2 Fonctionnement en charge

Lorsque des courants triphasés équilibrés parcourent l'induit, ils engendrent (théorème de Ferraris) une induction tournante à p paires de pôles, dont la vitesse N_S est égale à celle du rotor.

On aura donc simultanément dans une machine synchrone deux inductions tournantes, à la vitesse N_S :

— l'induction B_R créée par l'inducteur tournant ;

— l'induction B_S engendrée par le stator.

Le décalage angulaire entre ces deux inductions dépend du déphasage entre la f.é.m. induite E et le courant d'induit I dans une phase.

Si E et I sont déphasés de Ψ, le décalage, en angle électrique, de B_R et B_S est $(\frac{\pi}{2} + \Psi)$.

En effet, nous avons vu que l'induction B_S était dans l'axe d'une bobine quand le courant y était maximum alors que la f.é.m. était maximale quand l'induction B_R était normale à l'axe (voir la figure 1.16).

Si la machine n'est pas saturée, on peut superposer les effets des deux inducteurs et l'étude est particulièrement simple : c'est la méthode de Behn-Eschenburg[2] qui permet de définir le schéma équivalent et le couple.

2. Hans Behn-Eschenburg est né le 10 janvier 1864 à Obertrass (aujourd'hui Zurich), il meurt le 18 mai 1938 à Küsnacht. Il fait des études de mathématiques et de physique à Zu-

FIGURE 1.16 – Décalage des inductions statorique et rotorique.

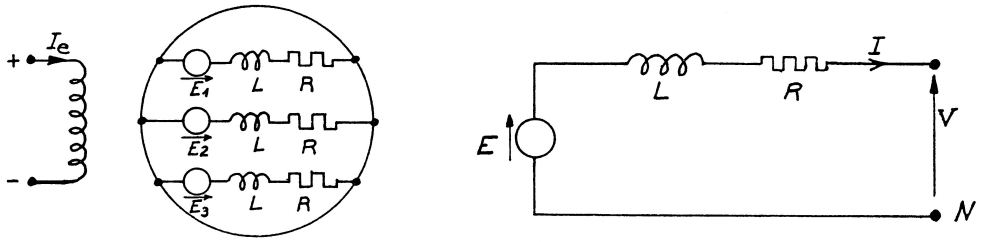


FIGURE 1.17 – Schéma équivalent de la machine synchrone.

1.2.2.1 Schéma équivalent

La création de l'induction B_S correspond à l'existence d'une inductance synchrone L par phase de l'induit.

D'autre part, chaque enroulement présente une résistance R. Le schéma équivalent est donc celui de la figure 1.17.

On aura, par phase, en supposant un courant débité I, avec un déphasage $\varphi = \left(\widehat{\vec{V}, \vec{I}}\right)$:

$\underline{E}(I_e) = \underline{V} + R\underline{I} + jL\omega\underline{I}$: c'est l'équation de maille qui donne le diagramme de Behn-Eschenburg qui ressemble à celui de Kapp pour le transformateur. Mais ici, en raison de l'entrefer, nous aurons : $R \ll L\omega$.

Méthode de Potier Lorsque l'alternateur est saturé, on ne peut plus, en toute rigueur, utiliser la méthode précédente. Il faut composer les forces magnéto-

rich et Berlin entre 1886 et 1890. Behn-Eschenburg travaille dès 1892 à la fabrique de machines Oerlikon, où il devient chef électricien (1897-1911), directeur (1911-1913), directeur technique général (1913-1928) et conseiller d'administration (1919-1938). Il se distingue dans la construction des moteurs monophasés à collecteur pour la traction. Il a donné son nom au diagramme à une réactance de la machine synchrone.

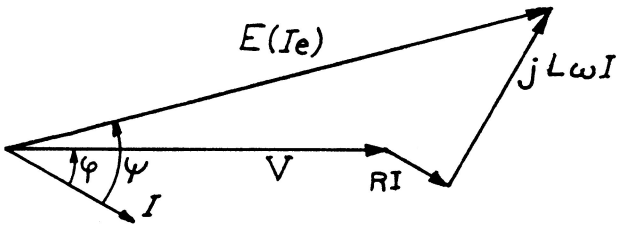


FIGURE 1.18 – Diagramme de Behn-Eschenburg de la machine synchrone.

motrices tournantes dues à l'inducteur, au rotor, ξ_R, et à l'induit, au stator, ξ_S, déphasées, elles aussi, de $\frac{\pi}{2}+\Psi$.

On en déduit la force magnétomotrice résultante ξ_r qui, compte tenu de la caractéristique d'aimantation, conduit au flux et à la f.é.m. résultante E_r :

$$\underline{\xi_r} = \underline{\xi_R} + \underline{\xi_S}$$

En divisant cette expression par le nombre de spires de l'inducteur à courant continu, on fait apparaître :

— $I_e = \frac{\xi_R}{n}$ courant inducteur (continu) ;

— $I_{er} = \frac{\xi_r}{n}$ courant inducteur résultant de l'inducteur et de l'induit ;

— $\alpha I = \frac{\xi_S}{n}$ courant continu équivalent à l'induit.

$\underline{I_{er}} = \underline{I_e} + \alpha \underline{I}$ avec α paramètre fixe.

La f.é.m. en charge E_r est donnée par la caractéristique à vide, pour la valeur I_{er} du courant d'excitation. L'induit présente en outre une inductance de fuites favorisée par l'entrefer, λ, constante.

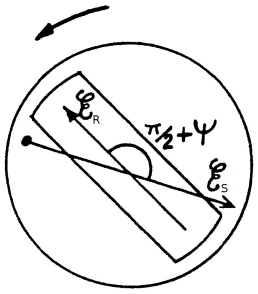


FIGURE 1.19 – Forces magnétomotrices pour l'établissement du diagramme de Potier de la machine synchrone.

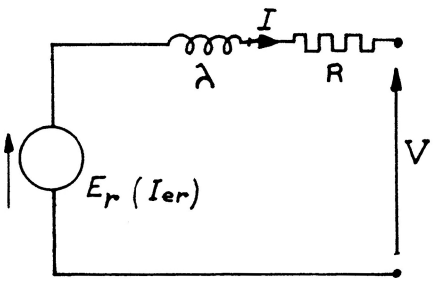


FIGURE 1.20 – Modèle de Potier de la machine synchrone.

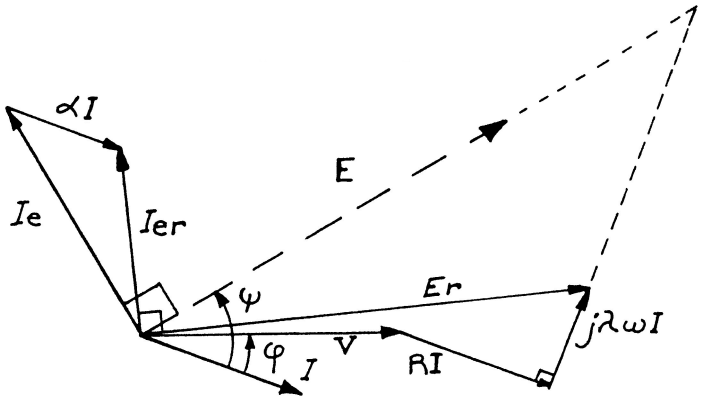


FIGURE 1.21 – Diagramme de Potier de la machine synchrone.

Partant de V, I, φ, on construit E_r. On lit I_{er} sur la caractéristique à vide et on le porte avec 90° d'avance sur E_r (décalage des f.é.m. déjà étudié). On construit (αI) en phase avec I et on obtient I_e.

On peut compléter le diagramme en plaçant E, en retard de 90° sur I_e, ce qui fait apparaître l'angle Ψ.

La méthode de Potier, plus rigoureuse quand les machines sont saturées, conduit à des calculs plus longs et plus difficiles à exploiter.

Dans le cadre de ce cours, nous en resterons à la méthode de Behn-Eschenburg. On notera que l'inductance de fuites λ est incluse dans l'inductance synchrone L.

1.2.2.2 Détermination des éléments du schéma équivalent

La f.é.m. $E(I_e)$ est connue par la caractéristique à vide. On mesure, en courant continu, la résistance R de chaque enroulement. On pourrait mesurer directement L ou $L\omega$ (mesure d'impédance) mais on préfère utiliser les méthodes

suivantes :

Essai en court-circuit sous excitation réduite On mesure I_e et I_{cc}. On peut tracer la caractéristique $I_{cc}(I_e)$.

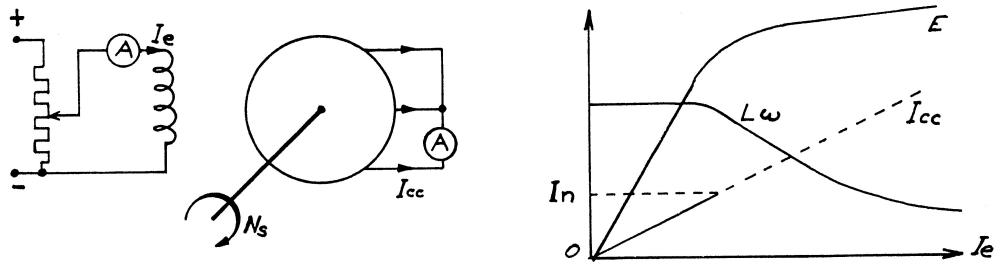


FIGURE 1.22 – Essai en court-circuit de la machine synchrone.

Le flux résultant étant très faible, la machine n'est pas saturée et la caractéristique en court-circuit est rectiligne. On obtient ainsi l'impédance interne d'une phase de l'alternateur :

$\left|R + jL\omega\right| = \frac{E(I_e)}{I_{cc}(I_e)}$ puisque $V = 0$; $\underline{E} = \left(R + jL\omega\right)\underline{I_{cc}}$

On en déduit $L\omega$. Par ce calcul, on voit que $L\omega$ est constant tant qu'il n'y a pas saturation (machine linéaire).

NOTA : On vient en fait d'appliquer le théorème de Thévenin à un générateur triphasé linéaire.

Essai sur inductance On fait débiter la machine sur des inductances pures. Le diagramme devient alors celui de la figure 1.24.

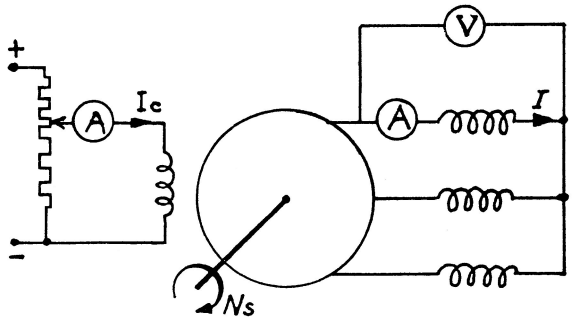


FIGURE 1.23 – Essai de la machine synchrone : débit sur des inductances pures.

Compte tenu des ordres de grandeur, on a : $L\omega I \backsimeq E - V$

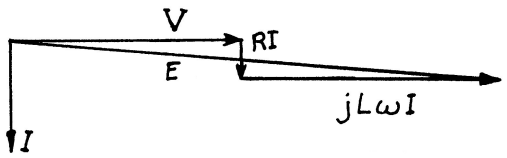


FIGURE 1.24 – Débit sur des inductances pures : diagramme de Kapp.

On mesure donc $V(I_e)$ et par comparaison avec la courbe à vide, on a $(L\omega I)$ et $(L\omega)$. Cette méthode, plus coûteuse, car il faut des inductances importantes, donne de meilleurs résultats car $L\omega$ est mesuré dans des conditions de flux plus normales qu'en court-circuit. Cela revient, en fait, à tenir compte implicitement de la non linéarité en mesurant $L\omega$ au voisinage des conditions normales de fonctionnement (proches de la saturation). $L\omega$ est alors un paramètre, fonction de I_e, défini autour d'un point moyen, un peu comme les paramètres dynamiques en électronique (résistance d'une diode).

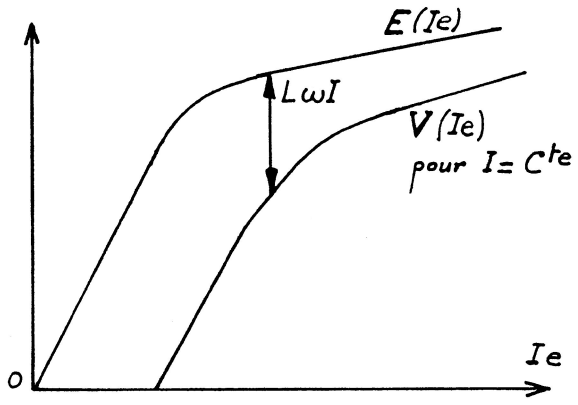


FIGURE 1.25 – Essai de la machine synchrone : débit sur des inductances pures.

1.2.2.3 Couple électromagnétique

L'interaction entre $\overrightarrow{B_R}$ et $\overrightarrow{B_S}$ engendre un couple électromagnétique C_e. Il est facile de calculer son expression à partir du schéma équivalent.

Si la machine fournit les courants triphasés I, sous les tensions simples V, avec un déphasage φ, on aura :

Puissance électrique fournie : $P = 3VI\cos\varphi$.

Pertes Joule dans l'induit : $P_J = 3RI^2$.

La somme de ces deux puissances provient du moteur d'entraînement qui fournit en outre les pertes mécaniques p_m : $P_{\text{méca fournie}} = P + P_J + p_m$.

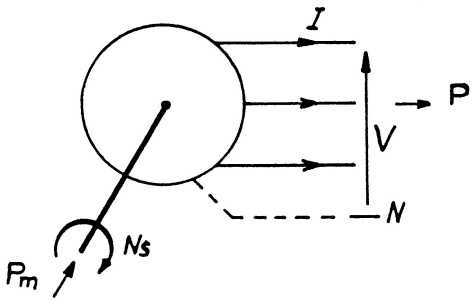


FIGURE 1.26 – Grandeurs servant au calcul du couple électromagnétique de la machine synchrone.

La puissance électromagnétique P_e, correspondant au couple électromagnétique C_e s'écrit :

$$P_e = P + P_J = P_{\text{méca fournie}} - p_m = C_e \Omega_s$$

On obtient ainsi une expression précise du couple, mais peu utilisable pour un raisonnement général. Si on néglige les pertes (ce qui suppose un rendement égal à un), on aura :

$$P_e = C_e \Omega \backsimeq 3 V I \cos\varphi$$

Dans cette hypothèse, le diagramme de Behn-Eschenburg se simplifie (RI est négligeable) comme on le voit sur la figure 1.27 :

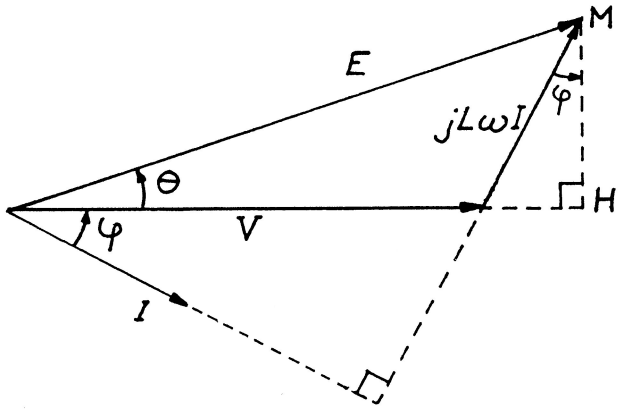


FIGURE 1.27 – Diagramme de Behn-Eschenburg simplifié pour le calcul du couple électromagnétique de la machine synchrone.

Or :

$$HM = L\omega I \cdot \cos\varphi = E\sin\theta$$

D'où :

$$P_e \backsimeq \frac{3V}{L\omega} \times \overline{HM}$$

et le couple peut s'écrire :

$$C_e = \frac{3V}{L\omega\Omega_s} \times \overline{HM}$$

Ou, enfin, compte tenu de $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$:

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega_s} \backsimeq \left(\frac{3p}{L\omega^2}\right) VE\sin\theta$$

Compte tenu des conventions de signes utilisées, il s'agit ici d'un couple *résistant* (opposé à N_s) que le moteur d'entraînement doit vaincre. Si θ se trouve être négatif, C_e est alors négatif et donc moteur.

1.3 Alternateur autonome

La machine synchrone, entraînée à N_s par un moteur (thermique en général), alimente un récepteur triphasé de facteur de puissance $\cos\varphi$. Si on veut assurer une tension U imposée, pour un débit I et un déphasage φ, on construit le diagramme de Behn-Eschenburg qui donne la f.é.m. E nécessaire et par suite le courant d'excitation I_e.

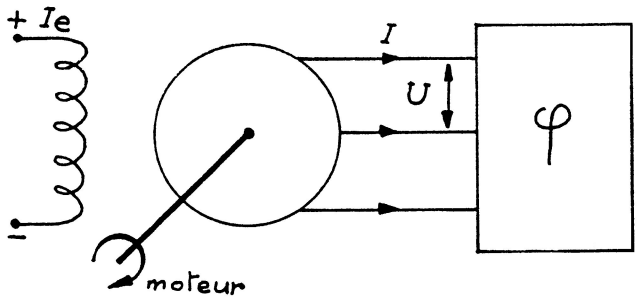


FIGURE 1.28 – Alternateur autonome.

Inversement, si I_e, donc E, est fixé, on peut calculer, par ce diagramme, la tension obtenue pour un débit I et un $\cos\varphi$ donnés :

$$\underline{E} = \underline{V} + R\underline{I} + jL\omega\underline{I}$$

On construit $R\underline{I}$ et $jL\omega\underline{I}$. On connait φ et donc la direction de V : on connait $|\underline{E}|$. On en déduit la solution graphique de la figure 1.29.

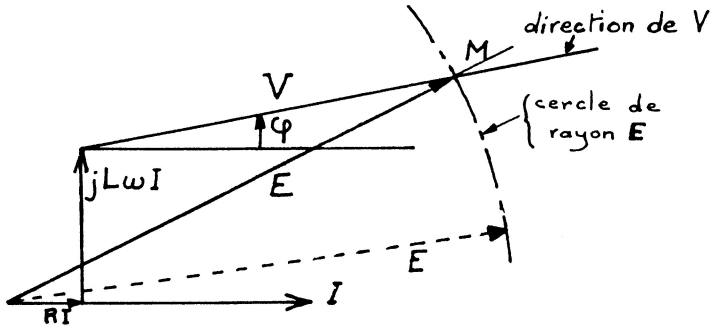


FIGURE 1.29 – Alternateur autonome : diagramme de Behn-Eschenburg pour le calcul de E.

Ces deux types d'études conduisent aux courbes suivantes :

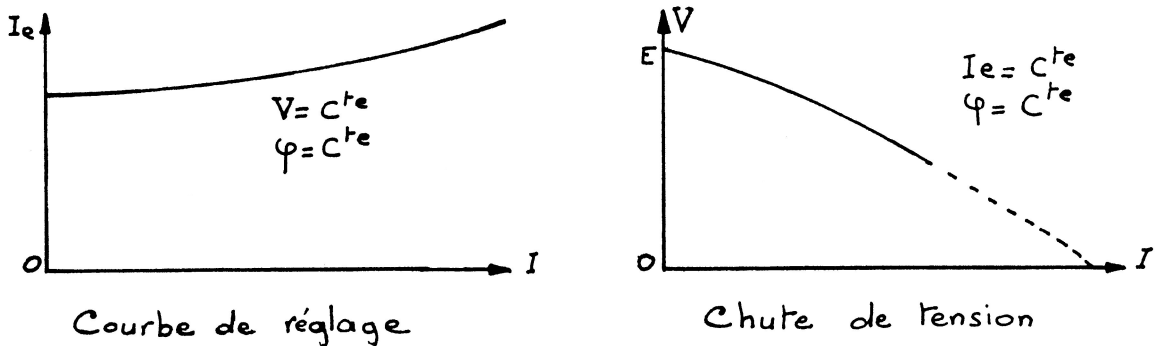


FIGURE 1.30 – Courbe de réglage et de la chute de tension de la machine synchrone en alternateur autonome.

1.3.1 Machine synchrone couplée au réseau

On couple une machine synchrone à un réseau triphasé afin, soit :

— de fournir une puissance supplémentaire à ce réseau : la machine synchrone se comporte alors en *alternateur* ;

— de produire de la puissance mécanique : la machine synchrone se comporte alors en *moteur synchrone*.

Ces fonctionnements sont parfaitement réversibles et nécessitent tous deux les mêmes opérations de *couplage*.

1.3.1.1 Couplage

On ne peut brancher directement le stator d'une machine synchrone sur un réseau : les courants seraient trop intenses (limités seulement par l'impédance interne $R + jL\omega$) et si la vitesse du rotor diffère de N_s, il ne pourrait y avoir de couple : les inductions B_R et B_S tournant à des vitesses différentes, le couple produit serait oscillatoire et de valeur moyenne nulle.

Pour réaliser un couplage optimal d'une machine synchrone, il faut :

— l'entraîner à une vitesse N proche de N_s par un moteur auxiliaire ;

— l'exciter pour produire des f.é.m. égales aux tensions du réseau ;

— coupler quand les f.é.m. et les tensions correspondantes du réseau sont en phase.

Il ne circule alors aucun courant dans l'induit. Le montage pratique est celui de la figure 1.31.

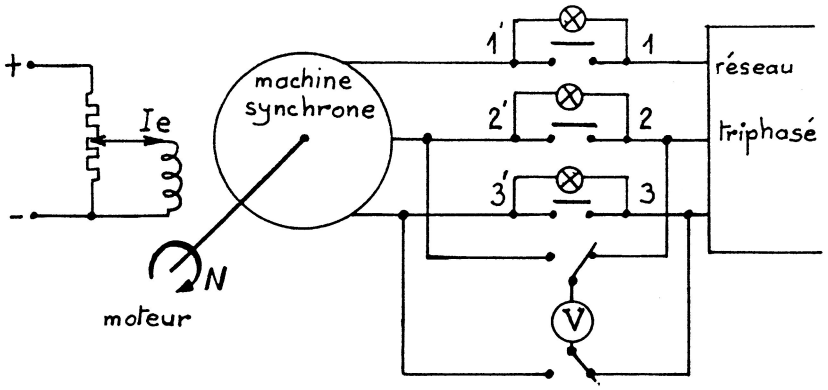


FIGURE 1.31 – Couplage d'une machine synchrone sur un réseau : montage pratique.

Pour vérifier :

— la vitesse : $N = N_s$;

— l'ordre de succession des phases (1, 2, 3 pour le réseau et 1', 2', 3' pour la machine synchrone) ;

— l'égalité des phases : $\arg \underline{E} = \arg \underline{V}$

On utilise des lampes de couplage qui sont placées en parallèle sur le disjoncteur de couplage. Ces lampes sont alimentées sous les tensions : $\underline{U'} = \underline{V} - \underline{E}$ comme le montre la figure 1.32.

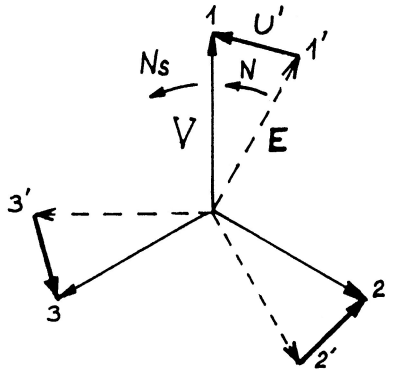


FIGURE 1.32 – Tensions du réseau et de la machine synchrone pendant le couplage.

En agissant sur I_e, on règle l'égalité $|E| = |V|$ à l'aide du voltmètre.

Comme N est différent de N_s, les trois tensions U' varient à la fréquence $|N_s - N|$.

Si l'ordre des phases est correct les trois tensions U' varient simultanément et les trois lampes s'allument ou s'éteignent ensemble.

NOTA : Si l'ordre des phases est incorrect, on vérifiera que les lampes s'éteignent puis s'allument successivement : il faut alors intervertir deux phases.

On ajuste la vitesse N en agissant sur le régulateur du moteur d'entraînement (+ vite - vite) afin que l'éclat des lampes varie lentement et *on couple à l'extinction des lampes*. On a alors $\underline{E} = \underline{V}$.

NOTA : On peut utiliser un synchronoscope dont l'aiguille tourne à une vitesse égale à $|N_s - N|$ et passe par zéro quand $\underline{V}$ et $\underline{E}$ sont en phase.

1.3.1.2 Effet du couple appliqué à la machine synchrone

A l'issue du couplage, le courant est nul et si on néglige les pertes, le couple mécanique C_m fourni par le moteur d'entraînement est lui aussi négligeable. On a donc, pour une phase, le diagramme de la figure 1.33 où $\underline{V} = \underline{E}$.

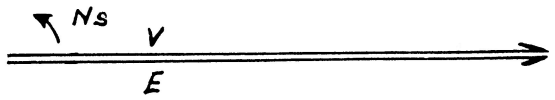


FIGURE 1.33 – Diagramme de Behn-Eschenburg de la machine synchrone juste après le couplage.

Si on augmente le couple C_m fourni par le moteur, le rotor accélère et les f.é.m. se décalent en avance par rapport aux tensions V. Il apparaît alors des courants triphasés I tels que : $\underline{E} = \underline{V} + jL\omega\underline{I}$ (en négligeant RI). Le diagramme est alors celui de la figure 1.34 et montre que la machine synchrone oppose alors un couple électromagnétique résistant C_e, proportionnel à $\sin\theta$. L'équilibre dynamique est atteint pour un angle θ tel que : $C_e = C_m$. θ devient fixe et on a alors : $N = N_s$. Le rotor tourne exactement à la vitesse du champ tournant. La puissance fournie par le moteur est transmise au réseau : la machine synchrone fonctionne en *alternateur*.

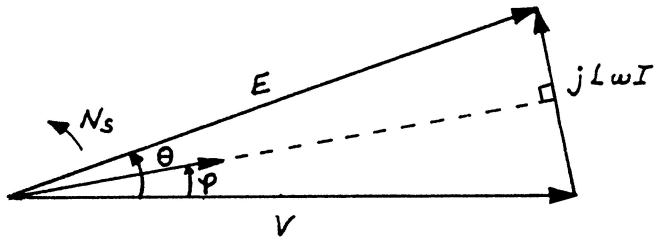


FIGURE 1.34 – Diagramme de Behn-Eschenburg de la machine synchrone : après le couplage et une augmentation du couple moteur.

Si le couple appliqué est négatif, c'est à dire si on remplace le moteur par une charge mécanique, le rotor ralentit et les f.é.m. se décalent en arrière. On obtient un fonctionnement symétrique : le couple de la machine synchrone change de signe, comme θ, et devient moteur. A l'équilibre on a : $C_e = C_m$ et $N = N_s$.

La puissance reçue par la charge provient du réseau : la machine synchrone fonctionne en *moteur synchrone*.

Avec les conventions utilisées (I fourni), on voit que $\cos\varphi$ est négatif (puissance « fournie » négative). Il sera plus commode de considérer les courants absorbés I' par le moteur synchrone :

$$\underline{I'} = -\underline{I}$$

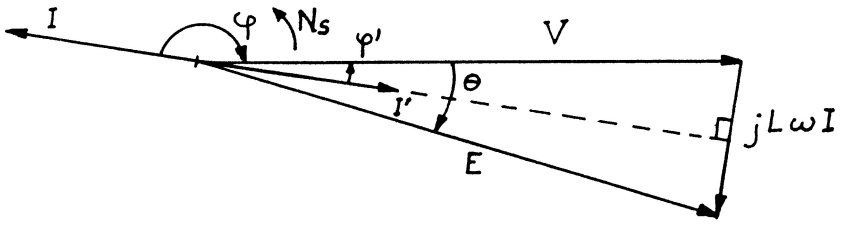


FIGURE 1.35 – Diagramme de Behn-Eschenburg de la machine synchrone en fonctionnement moteur.

et de parler de la puissance *absorbée* : $P = 3VI'\cos\varphi$.

Le fonctionnement alternateur ou moteur dépend uniquement du sens du couple mécanique appliqué. En régime établi, la vitesse de rotation est égale à celle des inductions tournantes : $N = N_S$.

Le couple électromagnétique tend à maintenir le rotor à la vitesse des champs tournants : on l'appelle *couple synchronisant*.

REMARQUES :

— Les couples applicables sont limités car θ est solution de :

$$C_m = C_e = \left(\frac{3p}{L\omega^2}\right) VE\sin\theta$$

Ici, V et E ont même module et il n'y aura de solution que si : $|C_m| < \left(\frac{3p}{L\omega^2}\right) V^2$. Si C_m sort de ces limites, le couple délivré par la machine synchrone ne peut plus retenir le rotor : il y a *décrochage* du rotor. Les courants deviennent très intenses et comme N et N_S sont devenus très différents, il n'y a plus qu'un couple électromagnétique alternatif, nul en moyenne. Cet incident brutal et dangereux doit donc être évité.

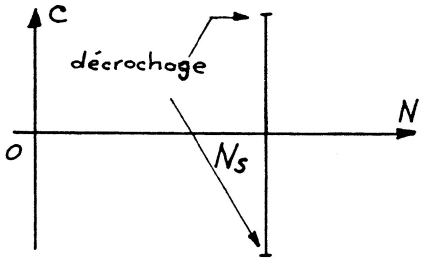


FIGURE 1.36 – Caractéristique mécanique de la machine synchrone, limites de décrochage.

— La vitesse du rotor est constante en régime établi, mais, lors de l'application d'un couple C_m, comme le rotor se *décale* d'un angle θ, sa vitesse instantanée doit fluctuer avant de reprendre la valeur N_S. On obtient en général une oscillation amortie de la vitesse :

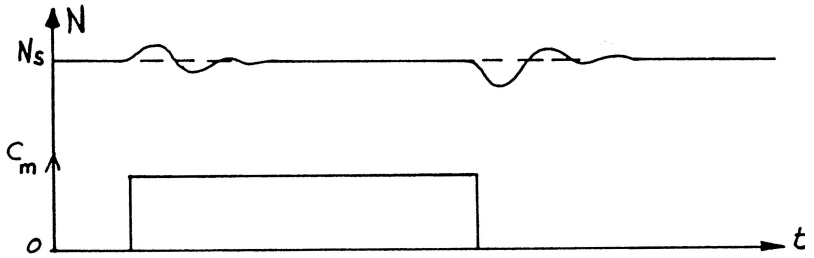


FIGURE 1.37 – Oscillation de vitesse lors de l'application brutale d'un couple résistant.

— L'utilisation en moteur synchrone suppose l'emploi d'un moteur auxiliaire de petite puissance permettant le démarrage et le couplage à puissance nulle. Les dispositifs d'électronique de puissance permettent désormais de démarrer en alimentant le stator par des tensions de fréquence très faible.

1.3.2 Diagramme de Blondel

1.3.2.1 Diagramme de Blondel

On suppose que le réseau est à tension V et fréquence constante. Pour étudier l'influence du couple et du courant d'excitation de la machine synchrone on utilise le diagramme de Behn-Eschenburg dans lequel le vecteur V est invariant. Pour simplifier l'étude, on négligera les pertes Joule : $RI \ll L\omega I$.

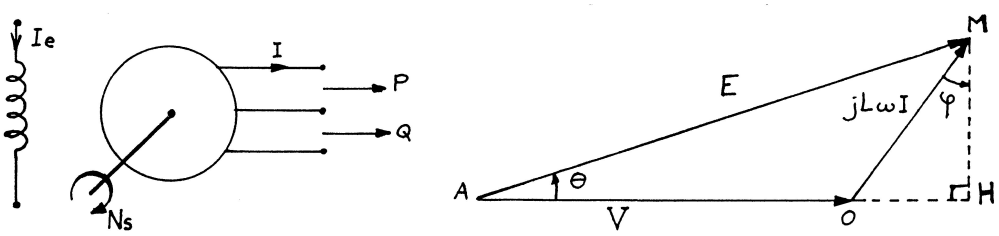


FIGURE 1.38 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone.

Au paragraphe 1.2.2.3, nous avons vu que $\overline{HM}$ est proportionnel à la puissance électrique fournie ($P \simeq P_e$) et au couple électromagnétique C_e, si V est constant.

On a de même : $\overline{OH} = L\omega I \cdot \sin\varphi = L\omega \cdot \frac{Q}{3V}$.

$\overline{OH}$ et $\overline{HM}$ mesurent les puissances active et réactive fournie au réseau : on peut donc lire directement ces puissances en mesurant les projections de $\overline{OM}$ sur deux axes orthogonaux gradués en puissances actives et réactives avec :

$P = \frac{3V}{L\omega} \times \overline{HM} = C_e\Omega_S$

$Q = \frac{3V}{L\omega} \times \overline{OM}$

On lit directement l'angle φ : $\varphi = (OP; OM)$. Enfin OM est proportionnel au courant I.

Si P est positive, le fonctionnement est alternateur, si P est négative, le fonctionnement est moteur.

On peut limiter ce diagramme à sa portion utile :

— la f.é.m. est limitée, par la saturation, à une valeur E_m : cercle centré en A et de rayon E_m ;

— le courant débité doit être inférieur ou égal à sa valeur nominale I_n : cercle centré en O et de rayon $L\omega I_n$;

— l'angle θ doit être inférieur à 90°. Pour conserver une marge de sécurité et éviter le décrochage, on fixe en général une limite inférieur : $|\theta| < \theta_m$.

REMARQUES :

— Dans ce diagramme, on suppose $L\omega$ constant ;

— si l'on tient compte de R, le diagramme de Blondel est plus compliqué mais obéit aux mêmes principes.

1.3.2.2 Utilisation du diagramme

Le diagramme comprend quatre quadrants. Lorsque le vecteur $jL\omega\vec{I}$ se situe au-dessus du vecteur $\vec{V}$, la machine fonctionne en alternateur comme le montre les figures 1.40 et 1.41. Lorsque le vecteur $jL\omega\vec{I}$ se situe en-dessous du vecteur $jL\omega\vec{I}$, la machine fonctionne en moteur comme le montre les figures 1.42, 1.43 et 1.44. La puissance change bien évidemment de signe lorsque la machine passe d'alternateur à moteur ou inversement, il en résulte que la projection du vecteur $jL\omega\vec{I}$ sur la verticale, donnant un segment de longueur proportionnel à la puissance active, change de signe elle aussi.

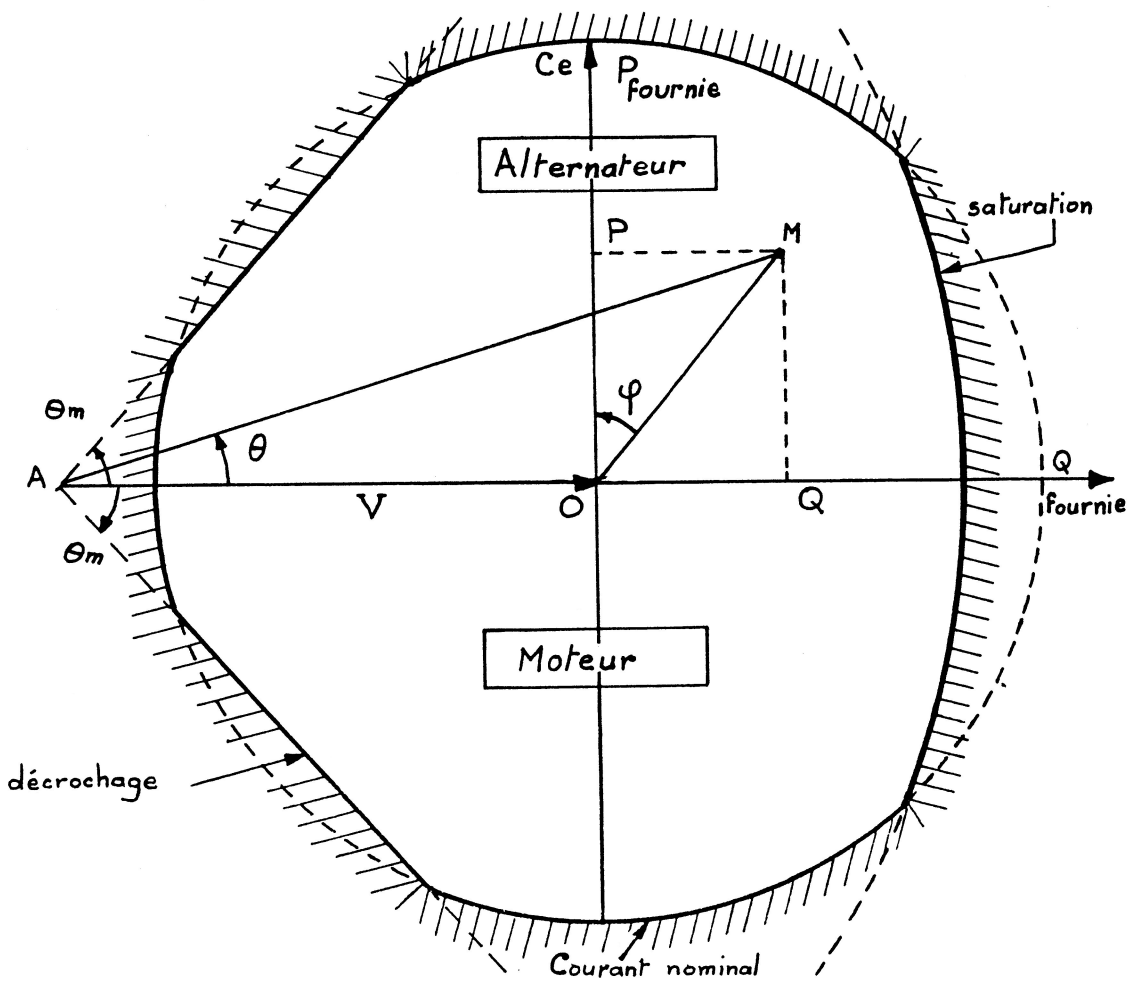


FIGURE 1.39 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone, diverses limitations.

Selon la valeur de l'excitation, on peut avoir un alternateur qui fournit de la puissance réactive ou qui en absorbe ainsi qu'un moteur synchrone qui absorbe ou produit de la puissance réactive.

REMARQUE : La machine synchrone est la seule machine que l'on sache faire fonctionner en moteur à $\cos\varphi = 1$.

Nous avons déjà vu l'influence du couple appliqué à la machine synchrone. Il reste à étudier l'influence de I_e.

Supposons que l'on applique, après le couplage, un couple mécanique moteur : la machine synchrone oppose, à l'équilibre, un couple C_e et fournit au

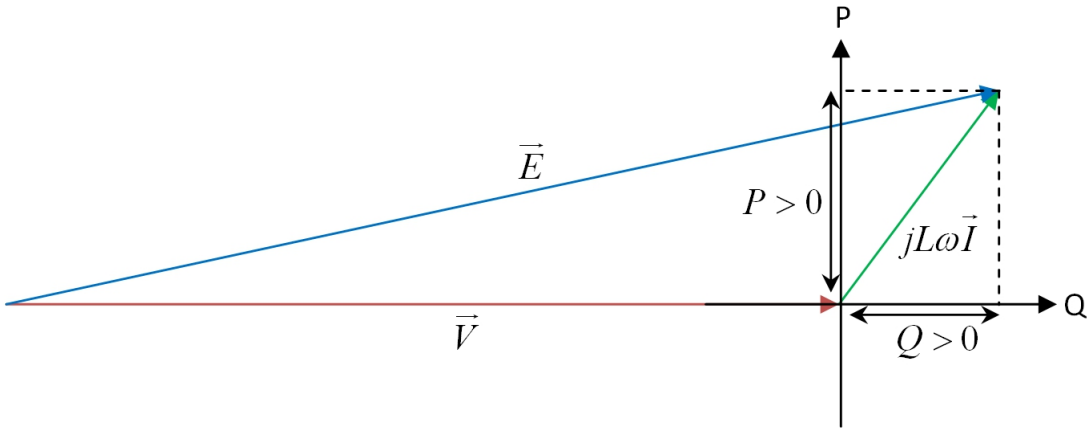


FIGURE 1.40 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone fonctionnant en alternateur sur-excité fournissant à la fois de la puissance active et de la puissance réactive au réseau.

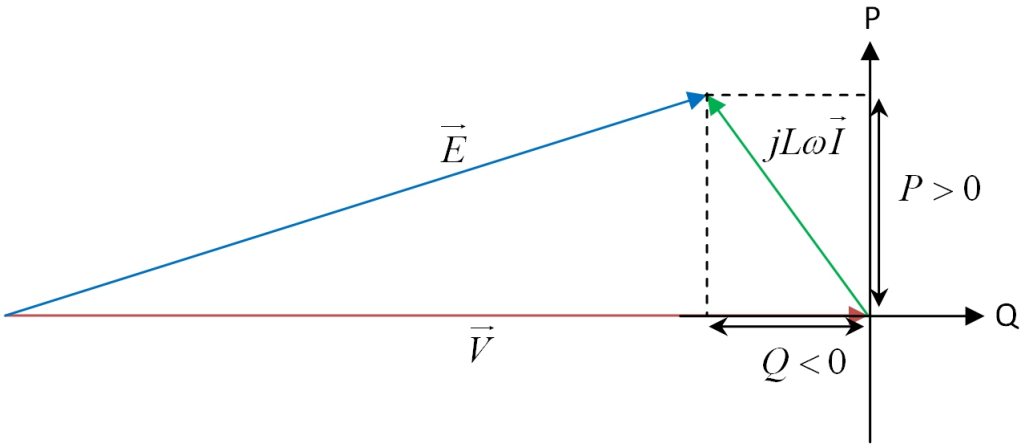


FIGURE 1.41 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone fonctionnant en alternateur sous-excité fournissant la puissance active et de la puissance au réseau et absorbant de la puissance réactive sur ce même réseau.

réseau une puissance active P. Le point M vient en M_1, d'ordonnée P.

Si on fait varier I_e, E varie. Si le couple appliqué reste constant, le point M se déplace sur la droite d'ordonnée P.

Si I_e augmente, E croit, le point se déplace vers la droite. On obtient par exemple M_2 : pour ce point, l'alternateur fournit de la puissance réactive au réseau.

Si I_e diminue, le point vient par exemple en M_3 : l'alternateur fournit tou-

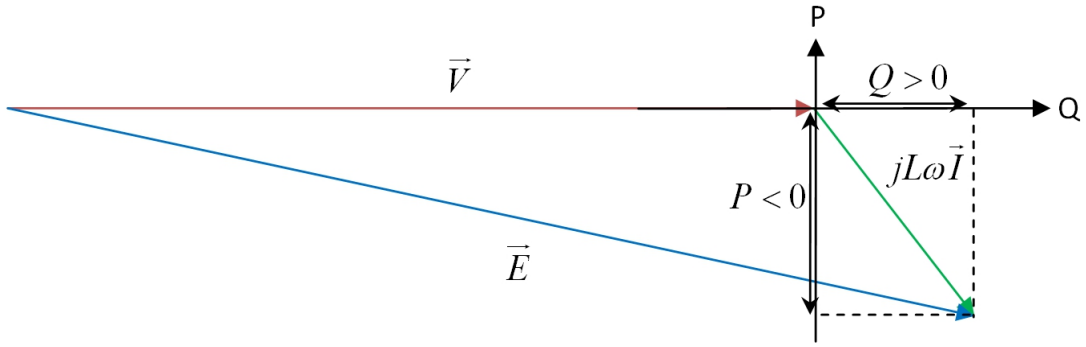


FIGURE 1.42 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone fonctionnant en moteur sur-excité absorbant de la puissance active sur le réseau tout en lui fournissant de la puissance réactive.

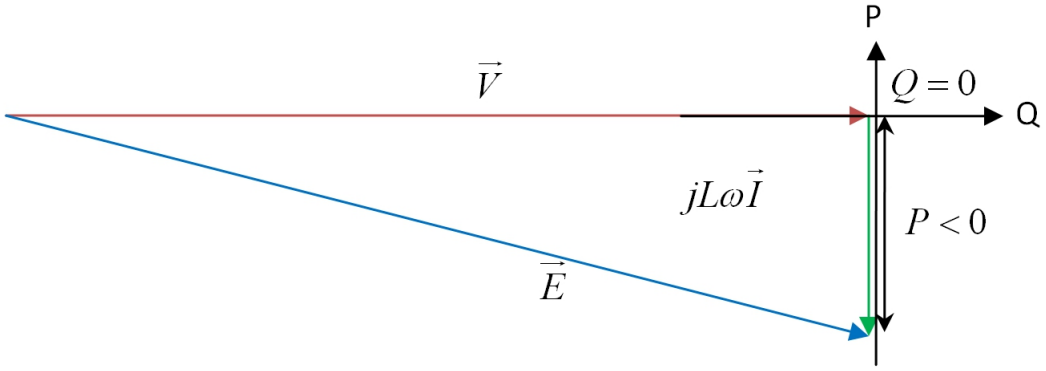


FIGURE 1.43 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone à l'excitation « normale » fonctionnant en moteur n'absorbant que de la puissance active sur le réseau.

jours P mais absorbe cette fois de la puissance réactive.

— **le couple appliqué détermine la puissance active échangée** ;

— **le courant d'excitation détermine la puissance réactive échangée**.

On voit aussi que le courant d'excitation permet de régler la valeur du déphasage φ.

Du diagramme précédent on déduit aussi le courant I fourni, proportionnel à OM. On voit que si I_e est faible (cas M_3), OM_3 et donc I est élevé.

Si I_e est élevé (cas M_2), le courant est à nouveau élevé. Le courant I passe par un minimum lorsque OM est porté par l'axe OP ($\varphi = 0$; $Q = 0$).

On peut représenter I en fonction de I_e à puissance P constante. on obtient

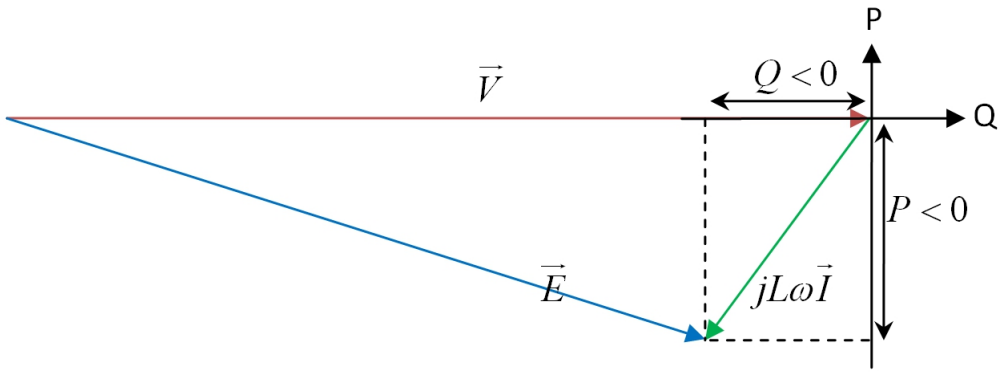


FIGURE 1.44 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone fonctionnant en moteur sous-excité absorbant à la fois de la puissance active et de la puissance réactive sur le réseau.

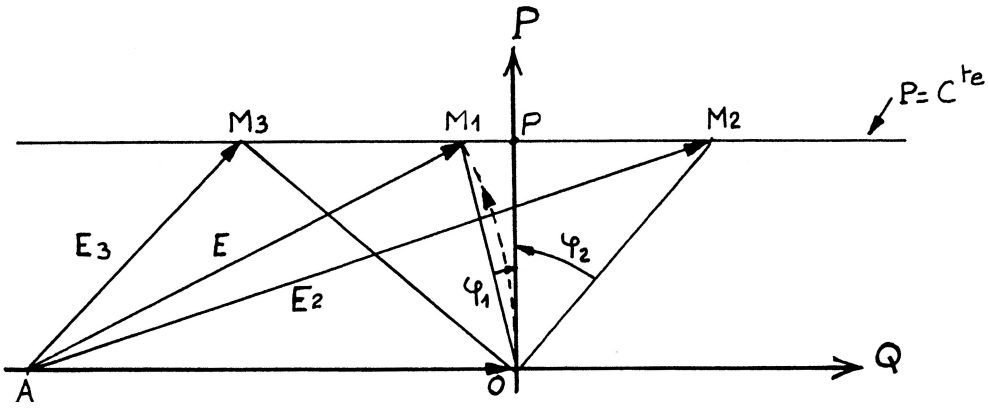


FIGURE 1.45 – Diagramme de Blondel : déplacement du point de fonctionnement sur une droite d'équipuissance.

un réseau de courbes en V, ce sont les courbes de Mordey de la figure 1.46. Ces courbes sont en particulier limitées par la saturation et par les risques de décrochage. Ces caractéristiques illustrent le comportement d'un alternateur couplé sur un réseau beaucoup plus puissant que lui et entraîné par un diesel ou une turbine à puissance constante. Le réseau lui impose la tension et la fréquence. Chaque valeur du débit de fluide, eau ou vapeur pour une turbine, ou du « cran de pétrole » pour un diesel correspond à une valeur de la puissance absorbée et donc de la puissance utile. Si, à débit ou cran de pétrole constant, on modifie l'intensité du courant d'excitation I_e, on ne change pas la puissance active qui ne dépend que de la turbine ou du diesel, mais on change la puissance réactive échangée entre l'alternateur et le réseau.

On peut relever directement ces courbes ou les prédéterminer en écrivant : $P_u = 3VI\cos\varphi = \text{cte}$.

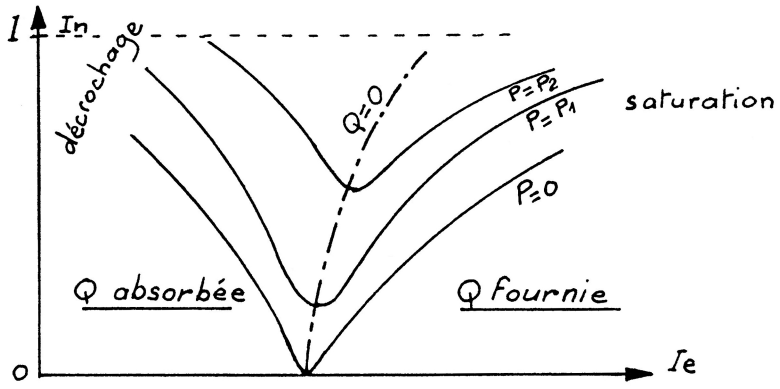


FIGURE 1.46 – Courbe de Mordey.

Pour le moteur synchrone, on obtient le même réseau de courbes : **le moteur synchrone présente un facteur de puissance réglable** : sous-excité (I_e faible), il absorbe de la puissance réactive ; sur-excité, il fournit de la puissance réactive.

C'est la seule machine électrique dont le facteur de puissance est réglable lorsqu'elle fonctionne en récepteur.

REMARQUES : Dans le fonctionnement à puissance active nulle (couple mécanique nul), la machine synchrone ne peut qu'échanger de la puissance réactive avec le réseau : sous-excitée, elle en absorbe et se comporte comme une inductance réglable ; sur-excitée, elle en fournit et se comporte comme un condensateur réglable. Dans ce cas elle peut servir à relever le facteur de puissance d'une installation (compensateur synchrone).

1.4 Couplage des alternateurs

A bord des navires, la centrale de production de l'énergie électrique est équipée de plusieurs alternateurs plutôt que d'un seul dont la puissance serait suffisante pour alimenter tout le bord. Ce choix permet :

— de limiter les effets provoqués par la panne d'un alternateur (un unique alternateur en panne priverait le navire de toute puissance électrique) et de réduire la puissance de la machine de secours à prévoir ;

— de répartir la puissance demandée par le bord entre plusieurs alternateurs fonctionnant au voisinage de leurs puissances nominales et donc au voisinage du rendement maximum ;

— de simplifier les problémes de réalisation et d'exploitation des alternateurs.

La marche en parallèle de plusieurs alternateurs pose deux problèmes :

— la régulation de tension de chaque alternateur ;

— la régulation de fréquence de chaque machine et donc la régulation de vitesse de la machine qui entraîne l'alternateur.

Le premier problème est résolu par le fonctionnement *en parallèle*, chaque alternateur se voit imposer la tension du réseau sur lequel il est couplé. La régulation de la tension du réseau ainsi constitué devient un *problème d'ensemble*, il convient d'agir sur toutes les machines du réseau et non sur l'une d'entre elles seulement.

Il en est de même pour le problème de la régulation de fréquence : un alternateur couplé sur un réseau voit sa fréquence, et donc sa vitesse de rotation $\Omega_S = \frac{2\pi f}{p}$, imposé par le réseau à moins qu'il ne soit capable d'entraîner tous les autres alternateurs du réseau à la fréquence qu'il imposerait. La régulation de fréquence est à résoudre au niveau de l'ensemble des machines.

La mise en service d'un alternateur résout les problèmes suivant :

— couplage de l'alternateur sur le réseau ;

— répartition des puissances entre cette machine et le réseau (répartition des puissances actives et réactives entre deux alternateurs en parallèle) ;

— répartition optimale des puissances ;

— stabilité du fonctionnement de l'alternateur.

Le couplage en série n'est pas utilisé car il conduit à un fonctionnement instable. 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 1.47. Si l'alternateur n°1 prenait de l'avance, l'angle ψ_1 deviendrait plus grand. La puissance électromagnétique $E_1 I \cos\psi_1$ de cet alternateur deviendrait plus petite et il opposerait au diesel ou à la turbine qui l'entraîne un couple résistant plus faible, cause d'un nouvel accroissement de vitesse. La marche en série est donc instable et par conséquent inutilisable Sauf le cas très rare de deux alternateurs mécaniquement accouplés (les anges ψ_1 et ψ_2 sont alors liés entre eux). Le couplage série servirait à obtenir des tensions élevées mais c'est ce que permet le transformateur statique.

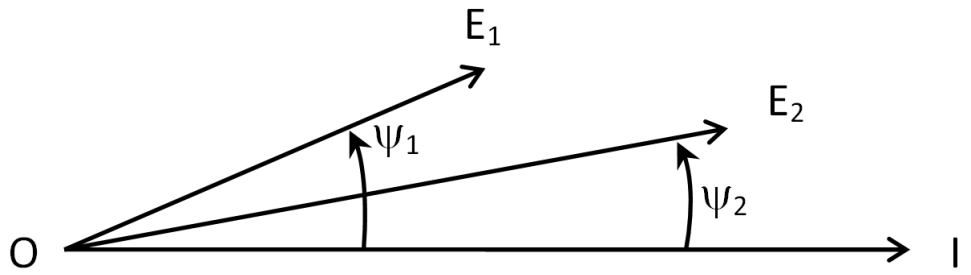


FIGURE 1.47 – Couplage en série de deux alternateurs.

1.4.1 Condition préalable au couplage

Employons une analogie mécanique pour bien comprendre la nécessité du couplage : l'embrayage à *crabots* (voir figure 1.48), très employé dans les boites de vitesse. Pour que la liaison mécanique s'établisse, les cannelures mâles doivent s'enfoncer dans les cannelures femelles. Pour ce faire, la différence de vitesse entre les deux disques portant les cannelures doit être très faible sinon chaque partie comportant des cannelures – qu'elles soient mâles ou femelles – a l'impression d'avoir en face d'elle un disque plein uniforme et l'embrayage est impossible. Même si la différence de vitesse est suffisamment faible, l'embrayage ne sera possible que si chaque partie est *en phase* avec l'autre, c'est à dire si les cannelures mâles sont bien en face des femelles. On comprend bien que si les cannelures mâles (respectivement femelles) d'un disque sont en face des cannelures mâles (respectivement femelles) de l'autre disque, l'embrayage sera, là aussi, impossible.

Cet exemple mécanique montre la nécessité :

— d'avoir les deux axes à des vitesses très proches ;

— d'avoir un déphasage quasi nul

On peut assimiler le champ statorique et le champ rotorique aux deux disques portant des cannelures d'un embrayage à crabots. Pour que ces deux champs se couplent, il est nécessaire que leur vitesse relative soit faible et qu'ils soient à peu près en phase.

Soit un générateur G débitant dans un réseau extérieur quelconque. Soit U la tension entre les bornes de couplage. Désignons par E, la f. é. m. du générateur G, par Z son impédance interne. 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 la relation :

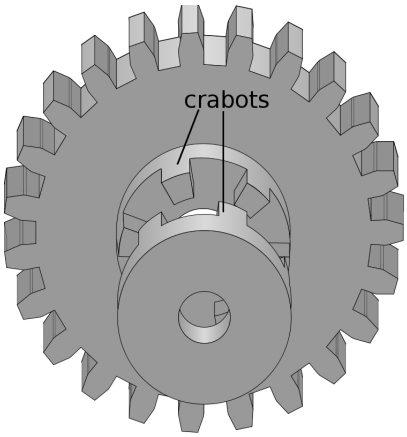


FIGURE 1.48 – Embrayage à crabots.

$$\underline{E} = \underline{U} + \underline{Z}\,\underline{I} \Rightarrow \underline{I} = \frac{\underline{E} - \underline{U}}{\underline{Z}} \text{générateur}$$

$$\underline{E} = \underline{U} - \underline{Z}\,\underline{I} \Rightarrow \underline{I} = \frac{\underline{U} - \underline{E}}{\underline{Z}} \text{moteur}$$

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 le disjoncteur de couplage.

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.é.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. $e(t)$ de l'alternateur à coupler doit se superposer à la courbe de la tension $u(t)$ entre les barres desquelles sont déjà connectés les autres alternateurs. Or, pour que deux sinusoïdes se superposent, il faut :

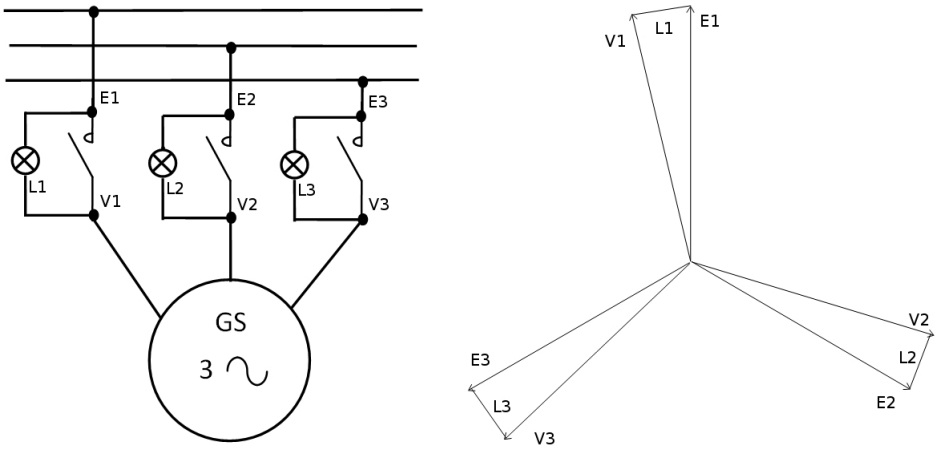
— Un même ordre de succession des phases ;

— l'égalité de leurs valeurs maximales, donc de leurs valeurs efficaces ;

— l'égalité de leurs fréquences ;

— l'égalité des phases (un déphasage nul entre elles).

Le dispositif de la figure 1.49 permet de vérifier que ces conditions sont remplies. Le même ordre de succession des phases se traduit par des « feux battants », l'égalité des fréquences et des phases par l'extinction permanente des lampes. Il est toutefois préférable de vérifier l'égalité des tensions à l'aide du voltmètre situé sur le tableau de couplage. En pratique, on réglera la fréquence de l'alternateur à coupler à une valeur légèrement supérieure à celle du réseau. Les lampes clignoteront lentement, passant toutes ensembles par des phases de luminosité maximum (opposition de phase) et d'extinction. Si une phase d'extinction dure environ 3 secondes, les fréquences seront suffisamment proches pour que l'on puisse envisager de coupler. On estimera le milieu d'une phase d'extinction (déphasage nul) et on donnera l'ordre de couplage à cet instant.

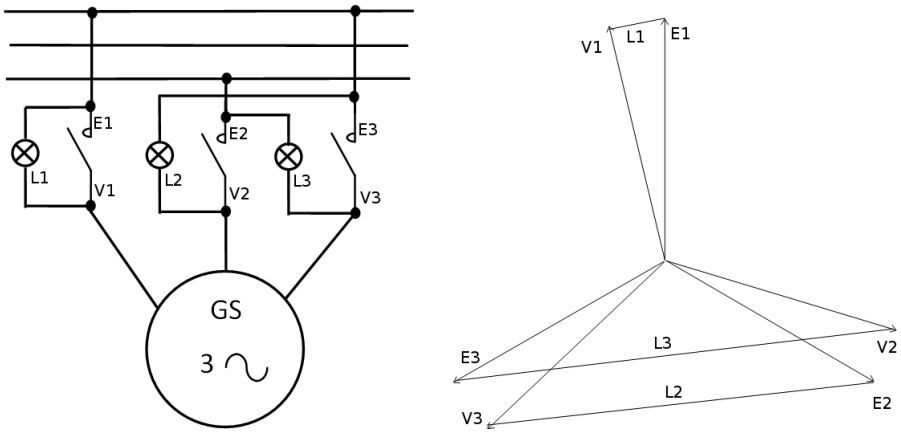


(a) Couplage à feux battants. (b) Couplage à feux tournants.

FIGURE 1.49 – Dispositifs de détermination du déphasage à feux battants.

On peut améliorer la précision du couplage en utilisant le dispositif (b) de la figure 1.50 où les feux sont dits « tournants ». Le couplage sera commandé à l'extinction de L_1 et à l'égalité de luminosité de L_2 et L_3. Cela peut s'apprécier plus finement que le milieu de la phase d'extinction des lampes connectées à feux battants.

Pour une précision accrue, il est conseillé d'utiliser un synchronoscope lorsque celui-ci est présent sur le tableau de couplage. il s'agit d'un petit moteur asynchrone monophasé alimenté par une phase du réseau et par la phase homologue de l'alternateur à coupler. le moteur est à phase auxiliaire diphasé comme



(a) Couplage à feux battants. (b) Couplage à feux tournants.

FIGURE 1.50 – Dispositifs de détermination du déphasage à feux tournants.

le montre la figure 1.51, il est à l'arrêt lors de l'égalité des fréquences et il indique le signe de l'écart de fréquence par son sens de rotation (alternateur à coupler de fréquence supérieure à celle du réseau si la rotation à lieu dans le sens des aiguilles d'une montre). Plus l'aiguille du synchronoscope tourne vite, plus l'écart de fréquence est important. En pratique, il faut que l'aiguille du synchronoscope tourne suffisamment lentement (un tour en 4 ou 5 secondes minimum), on donne l'ordre de fermeture du disjoncteur de couplage vers « midi moins cinq ou moins dix » selon la taille du disjoncteur de couplage et donc selon le temps mis par les pôles à se fermer.

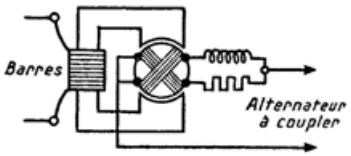


FIGURE 1.51 – Principe d'un synchronoscope.

1.4.2 Répartition des puissances entre deux alternateurs

On a déjà envisagé (1.3.2.2) le cas d'un alternateur couplé sur un réseau et nous en avions tiré les conclusions suivantes :

— la puissance active fournie au réseau par l'alternateur ne dépend que de

la machine d'entraînement (turbine ou diesel) puisque la vitesse de rotation est imposée par la fréquence du réseau ;

— la puissance réactive fournie au réseau est aussi fonction du courant d'excitation I_e.

On peut en déduire les manœuvres à effectuer pour répartir les puissances actives et réactives entre deux ou plusieurs alternateurs :

— on répartie la puissance active demandée par le réseau (en laissant inchangé le courant d'excitation des alternateurs) en agissant sur l'admission du fluide dans les turbines ou en agissant sur le crand de pétrole des diesels qui entraînent les alternateurs ;

— on répartie la puissance réactive demandée par le réseau en modifiant les courants d'excitations I_e.

On peut visualiser ces opérations en adoptant des diagrammes de Behn-Eschenburg simplifiés (on néglige R devant la réactance synchrone $L\omega$).

On part d'un alternateur fournissant P_t et Q_t comme le montre la figure 1.52. Ensuite, juste après la fermeture des pôles du disjoncteur de couplage de l'alternateur n°2, le diagramme de Behn-Eschenburg devient celui de la figure 1.53.

On commande, par l'intermédiaire du « plus vite », le cran de pétrole du diesel ou le débit dans la turbine de l'alternateur n°2 jusqu'à ce que cet alternateur fournisse la même puissance que l'alternateur n°1. Simultanément, on agit sur le « moins vite » de l'alternateur n°1 pour qu'il fournisse moins de puissance. Sans cela, la fréquence du réseau augmenterait. Les extrémités des vecteurs E_1 et E_2 décrivent des arcs de cercle„ l'extrémité de E_1 descend, celle de E_2 monte, comme le montre la figure 1.54. On surveille les wattmètres des alternateurs sur le tableau de couplage afin de s'assurer que les puissances débitées par les deux alternateurs deviennent identiques, égales à la moitié de celle que demande le réseau.

Ensuite, on surexcite l'alternateur n°2 pendant que l'on désexcite le n°1. L'alternateur n°2 va fournir de la puissance réactive pendant que le n°1 en fournit moins. On surveille des varmètres ou, à défaut, les ampèremètres des alternateurs, afin de s'assurer de l'égalité des puissances réactives débitées par chacun des deux alternateurs (égalité des intensités affichées par les ampèremètres). Pendant cette opération, les extrémités des vecteurs E_1 et E_2 de déplacent sur des droites horizontales d'équipuissance ($P_t/2$) comme le montre la figure 1.55.

1.4.3 Conséquences des fautes de couplage

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

— tensions : ±5 % ;

— fréquences : de 0,1 à 0,5 Hz, et avant le couplage on choisit $f_{\text{alternateur}} > f_{\text{réseau}}$;

— phase : 5° max.

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

Inégalité des tensions : 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. Ce courant 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.

Différence de phases : (entre la f.é.m. de l'alternateur et la tension U entre barres), elle donne lieu entre l'alternateur et les barres à un courant 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 détérioration de l'accouplement entre le moteur et l'alternateur ou, plus grave, une rupture d'arbre.

Différence des fréquences : dans ce cas la roue polaire parcourt un certain angle 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.

1.4.4 Répartition optimale des puissances

L'ensemble des deux alternateurs identiques en parallèle présente des pertes Joule *minimales* lorsque les puissances active et réactive des deux alternateurs sont égales.

Désignons par :

— I_1, I_2, I, les courants des alternateurs et celui 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.

Les pertes Joule dans l'ensemble des deux alternateurs supposés identiques de résistance statorique R s'exprime par :

$$P_J = 3R\left(I_1^2 + I_2^2\right) = 3R\left(I_{a1}^2 + I_{r1}^2 + I_{a2}^2 + I_{r2}^2\right) = 3R\left[(I_{a1} + I_{a2})^2 - 2I_{a1}I_{a2} + (I_{r1} + I_{r2})^2 - 2I_{r1}I_{r2}\right]$$

Comme le courant du réseau alimenté est supposé sans changement :

$$I_{a1} + I_{a2} = I_a = \text{cte} \qquad \text{et} \qquad I_{r1} + I_{r2} = I_r = \text{cte}$$

Le minimum de P_J correspondra aux égalités : $I_{a1} = I_{a2}$ et $I_{r1} = I_{r2}$, en effet :

$$dP_J = \frac{\partial P_J}{\partial I_{a1}} + \frac{\partial P_J}{\partial I_{a2}} + \frac{\partial P_J}{\partial I_{r1}} + \frac{\partial P_J}{\partial I_{r2}}$$

Or :

$$\frac{\partial P_J}{\partial I_{a1}} = 2I_{a1} - 2I_{a2}$$

$$\frac{\partial P_J}{\partial I_{a2}} = 2I_{a2} - 2I_{a1}$$

$$\frac{\partial P_J}{\partial I_{r1}} = 2I_{r1} - 2I_{r2}$$

$$\frac{\partial P_J}{\partial I_{r2}} = 2I_{r2} - 2I_{r1}$$

Si P_J est minimum, alors $dP_J = 0 \Rightarrow \frac{\partial P_J}{\partial I_{a1}} = \frac{\partial P_J}{\partial I_{a2}} = \frac{\partial P_J}{\partial I_{r1}} = \frac{\partial P_J}{\partial I_{r2}} = 0 \Rightarrow I_{a1} = I_{a2}$ et $I_{r1} = I_{r2}$. Cela correspond, puisque la tension U est la même pour les deux alternateurs, à l'égalité de leurs puissances actives et réactives.

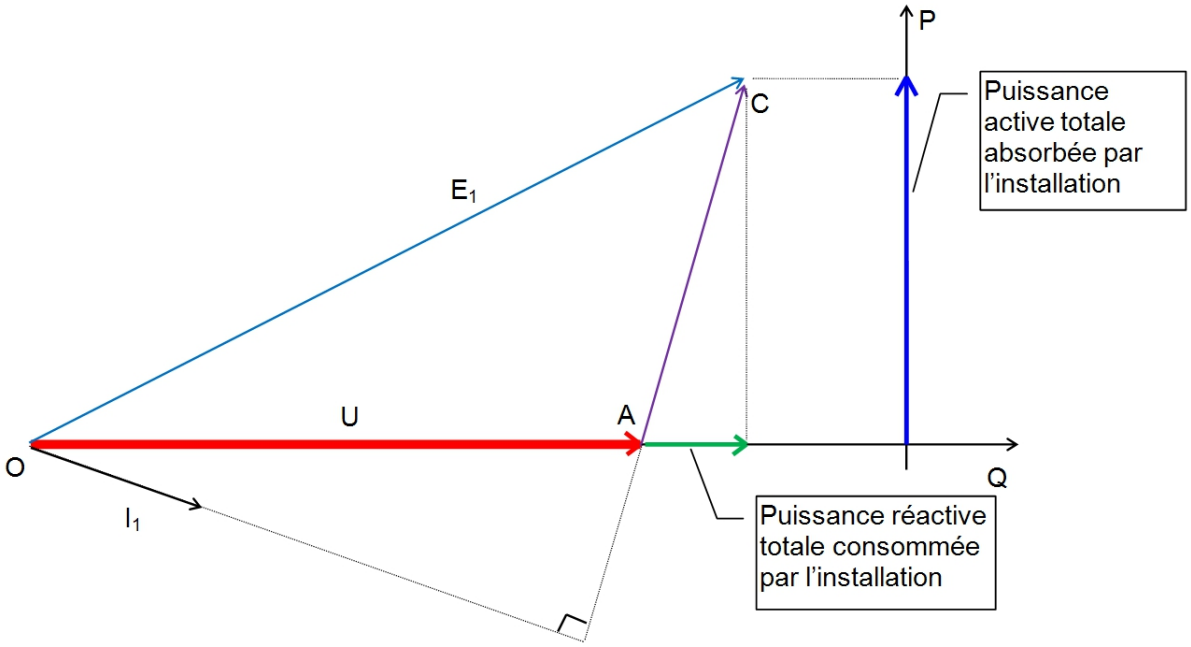


FIGURE 1.52 – Diagramme de Behn-Eschenburg montrant la répartition des puissances : avant le couplage du deuxième alternateur .

1.4.4.1 Mode opératoire du couplage d'un alternateur sur un réseau alimenté

Dégrossissage de la vitesse : on agit sur la consigne du régulateur de vitesse du moteur d'entraînement et on règle ainsi la fréquence (contrôle par le fréquencemètre).

Réglage de l'excitation à vide : on agit sur la consigne du régulateur de tension de manière à régler la f.é.m. à vide. On prendra E légèrement supérieure à la tension U du réseau (contrôle par le voltmètre).

Vérification de la concordance des phases et mise au synchronisme : on exerce une action fine sur le régulateur de vitesse (contrôle par le synchronoscope et/ou par les lampes de synchronisation).

Couplage proprement dit : ordre de fermeture du disjoncteur dès que le synchronisme est atteint :

- à *feux battant* : lorsque les lampes sont éteintes (pendant des intervalles de temps supérieures à 3 secondes) ;
- à *feux tournant* : lorsqu'elles sont au maximum de luminosité (pendant des intervalles de temps supérieures à 3 secondes) ;
- au synchronoscope : lorsque l'aiguille tourne dans le sens des aiguilles d'une montre (vitesse légèrement supérieure à la vitesse de

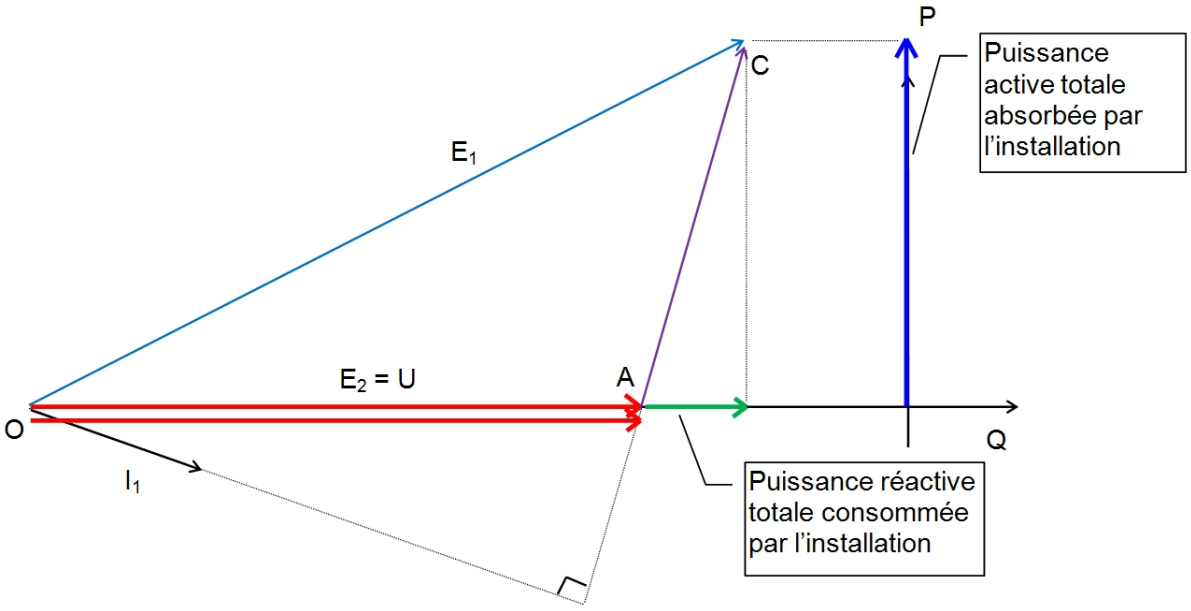


FIGURE 1.53 – Diagramme de Behn-Eschenburg montrant la répartition des puissances : le deuxième alternateur vient juste d'être couplé .

synchronisme du réseau) et passe par midi moins 10, moins 5.

Charge de l'alternateur, répartition des puissances actives : on fait débiter l'alternateur sur le réseau de manière à le charger progressivement (contrôle par l'ampèremètre). Ceci se fait en agissant sur la consigne du régulateur de vitesse du moteur d'entraînement (+ vite et - vite). Il y a lieu d'agir simultanément sur tous les régulateurs de vitesse afin de maintenir la fréquence du réseau à sa valeur nominale. On répartit de cette manière, les puissances actives entre les alternateurs (contrôle par les wattmètres).

Répartition des puissances réactives : on réduit les courants de circulation entre alternateurs (courant déwatté) par action sur les consignes de tension (égalisation des facteurs de puissance) de manière à se rapprocher du fonctionnement optimum. Il y a lieu d'agir simultanément sur tous les régulateurs de tension afin de maintenir la tension du réseau à sa valeur nominale. Le contrôle des facteurs de puissance se fait en utilisant les varmètres ou en observant les ampèremètres (égalité des courants débités lorsque les puissances actives et réactives sont les mêmes).

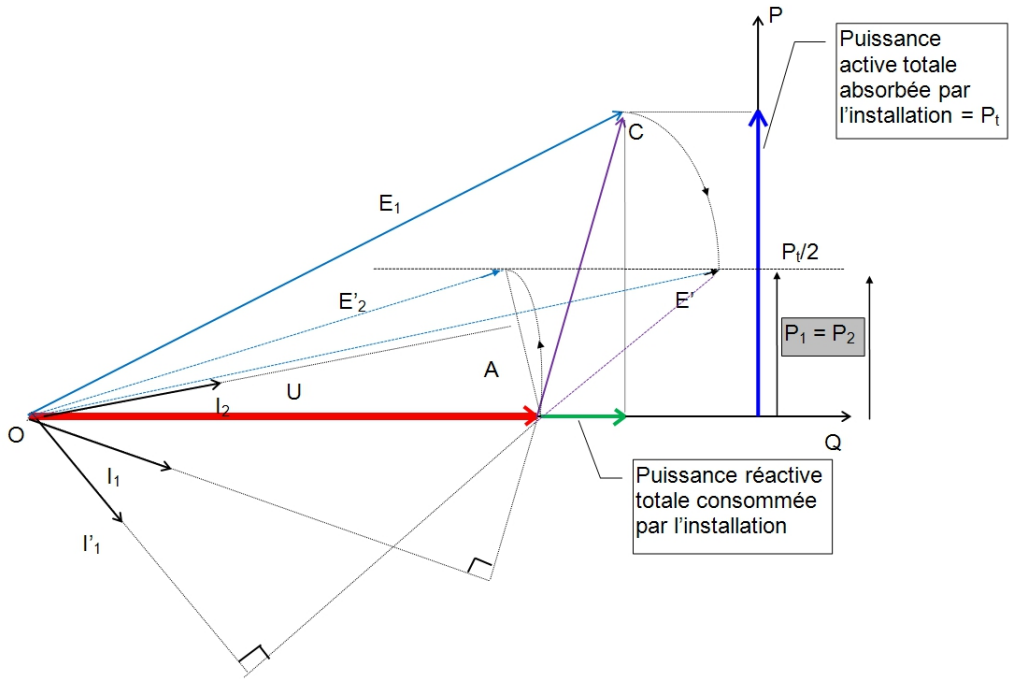


FIGURE 1.54 – Diagramme de Behn-Eschenburg montrant la répartition des puissances : pendant et après l'égalisation des puissances actives.

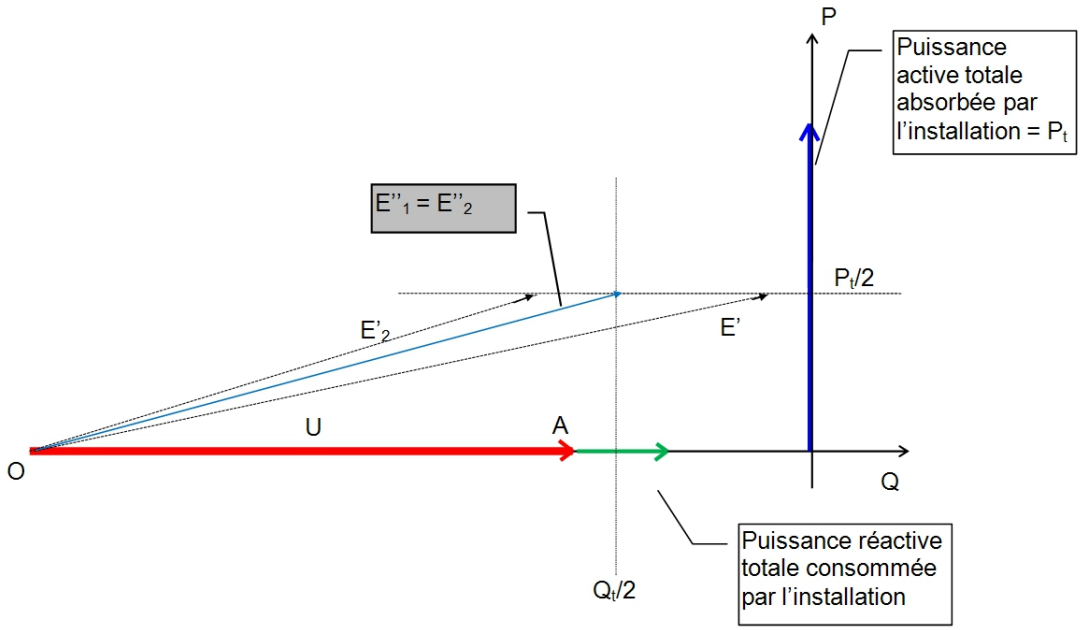


FIGURE 1.55 – Diagramme de Behn-Eschenburg montrant la répartition des puissances : pendant et après l'égalisation des puissances réactives.

Chapitre 2

Statisme

2.1 Statisme

Tout moteur thermique (ou turbine à vapeur ou hydraulique) est muni d'un régulateur centrifuge qui agit sur l'admission de carburant dans les cylindres (ou de vapeur ou d'eau sur les aubes de la turbine) afin de maintenir constante la vitesse. La figure 2.2 page suivante 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.

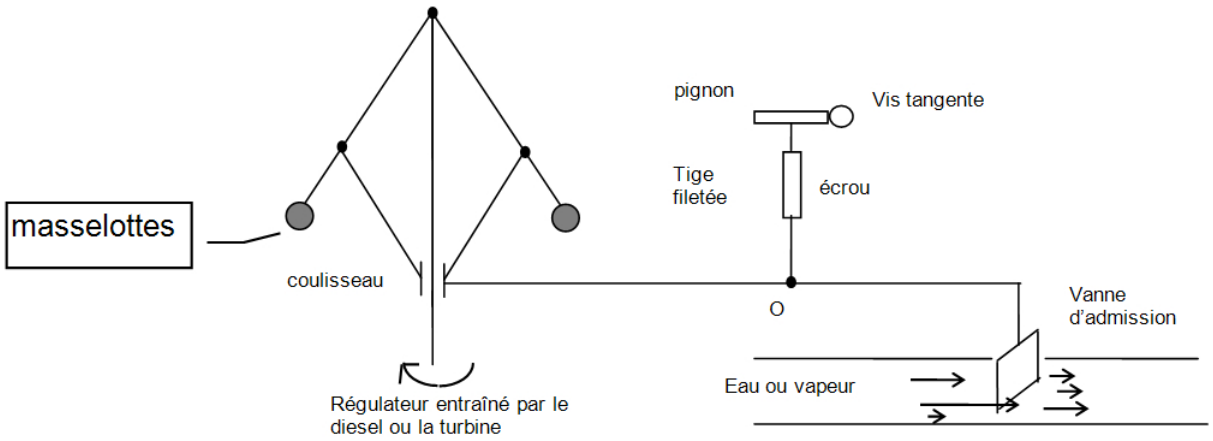


FIGURE 2.1 – Schéma de principe d'un régulateur de vitesse.

Quand la vitesse augmente, le régulateur ferme la vanne d'admission du carburant dans les cylindres (ou de la vapeur ou de l'eau pour une turbine) et la puissance décroît. Quand la vitesse diminue, le régulateur ouvre plus la vanne

d'admission et la puissance croit. La courbe représentative de la puissance du moteur (muni de son régulateur) en fonction de la vitesse a donc l'allure indiquée à la figure 2.2.

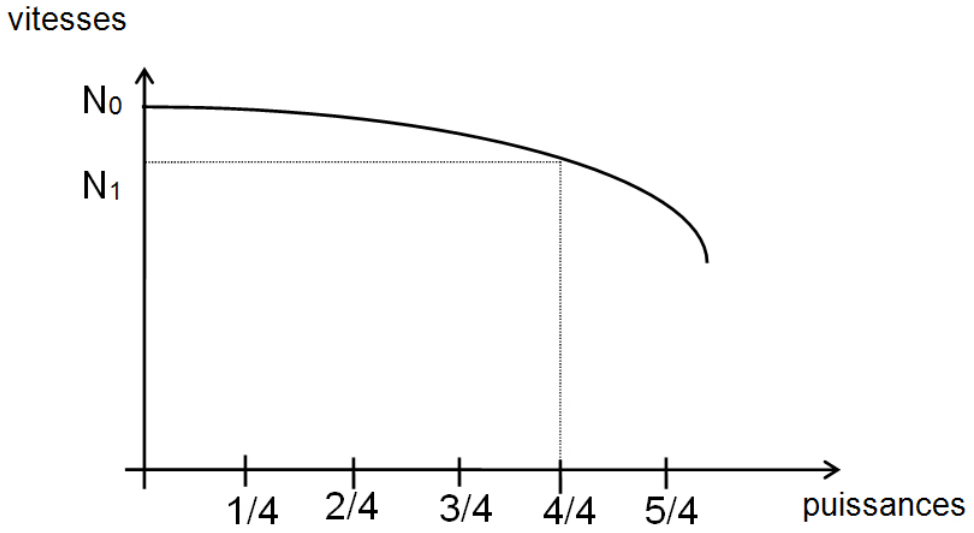


FIGURE 2.2 – Caractéristique mécanique d'un moteur thermique muni de son régulateur de vitesse.

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

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

Le statisme peut s'exprimer en pourcentage, on dira par exemple que le statisme d'un régulateur de vitesse est de 10% si la vitesse passe de 1500 $\mathrm{tr\,min^{-1}}$ à vide, à 1350 $\mathrm{tr\,min^{-1}}$ en pleine charge.

Le statisme est la pente de la courbe $N = f(P)$. Pour des raisons de simplification de représentation graphique, nous assimilerons cette courbe à une droite.

Considérons maintenant les moteurs de deux alternateurs en parallèle. Nous pouvons poser que :

— Il est rare que leurs statismes soient identiques : les courbes de réglage N(P) sont distinctes ;

— 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 2.3 montre, que la loi de répartition d'une puissance P entre les deux machines est parfaitement définie par la condition d'égalité des vitesses.

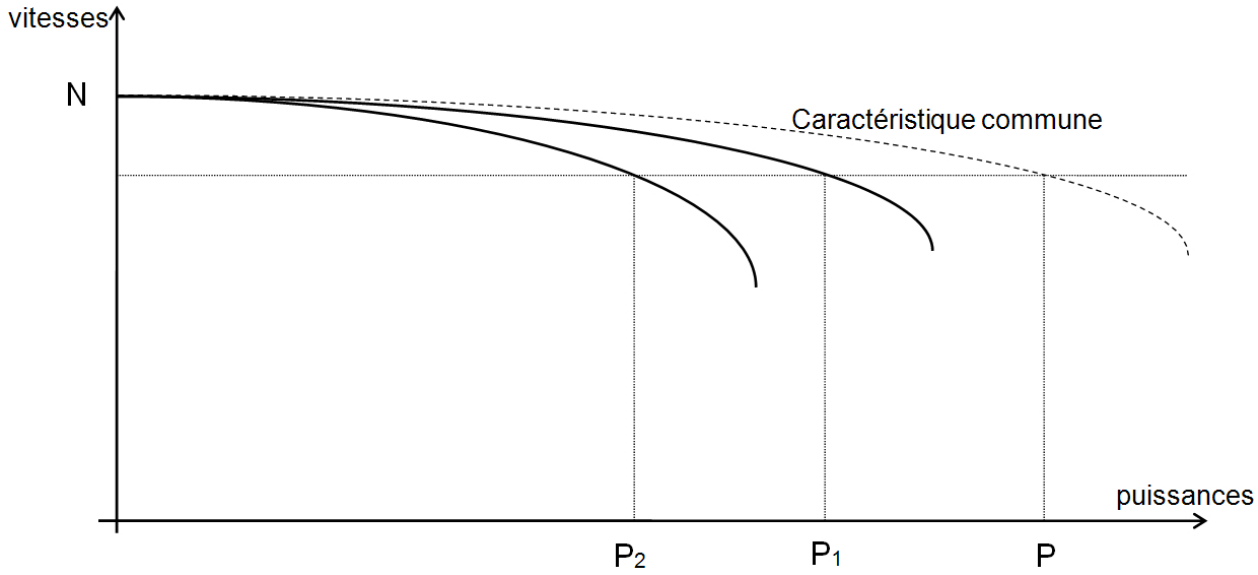


FIGURE 2.3 – Caractéristiques mécaniques de deux moteurs thermiques muni de leur régulateur de vitesse et fonctionnant en parallèle.

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 2.2 page ci-contre) du levier du régulateur. Tel sera le mode de répartition des charges entre les groupes électrogènes.

2.2 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 comme montré à la figure 2.4 page suivante.

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 ?

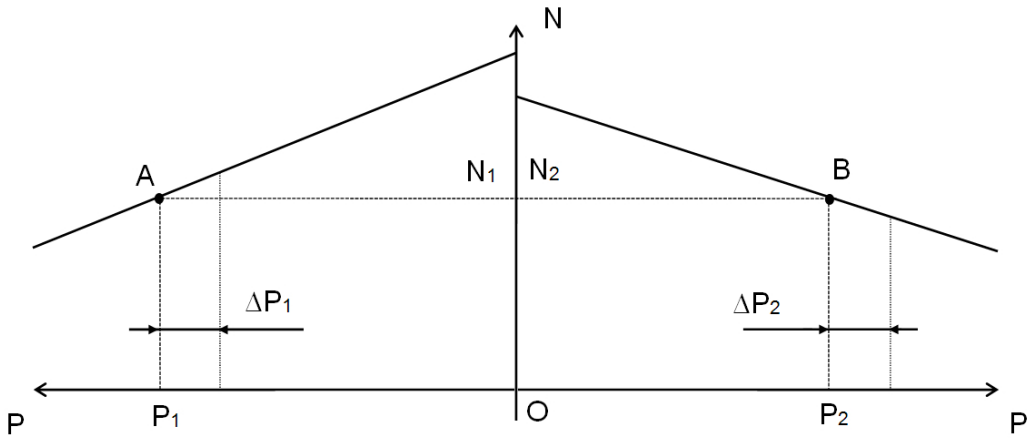


FIGURE 2.4 – Stabilité de deux machines fonctionnant en parallèle.

Imaginons qu'accidentellement, P_1 diminue de $\Delta P1$, alors N_1 a tendance à augmenter. P (puissance totale absorbée par l'installation) étant fixe, P2 variera en sens inverse. Cette augmentation de N_1 entraîne une augmentation de $P_1 = 2\pi \times \Delta N_1 \times C_1$, 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.

Pour des caractéristiques montantes (statisme négatif), un raisonnement identique conduit à la conclusion inverse. La répartition des puissances est instable et une machine aura tendance a 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.

2.2.1 Statisme négatif

Supposons que ce soit à nouveau la machine n° 1 qui fournisse un peu moins de puissance, ΔP_1 en moins. L'installation absorbant une puissance P supposée constante à un instant donné (figure 2.5 page ci-contre), 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 ($P_1 = 2\pi \times N_1 \times C_1$). Dans le même temps, la machine n° 2 fournit la puissance supplémentaire ΔP_2 et sa vitesse augmente, ce qui entraîne une nouvelle augmentation de la puis-

sance 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.

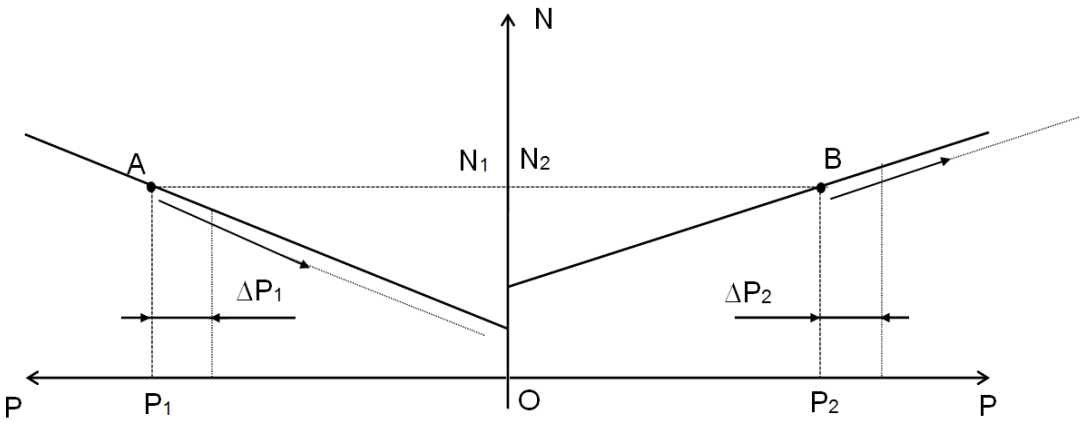


FIGURE 2.5 – Instabilité de deux machines fonctionnant en parallèle.

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 2.6. Le fonctionnement est juste à la limite entre stabilité et instabilité.

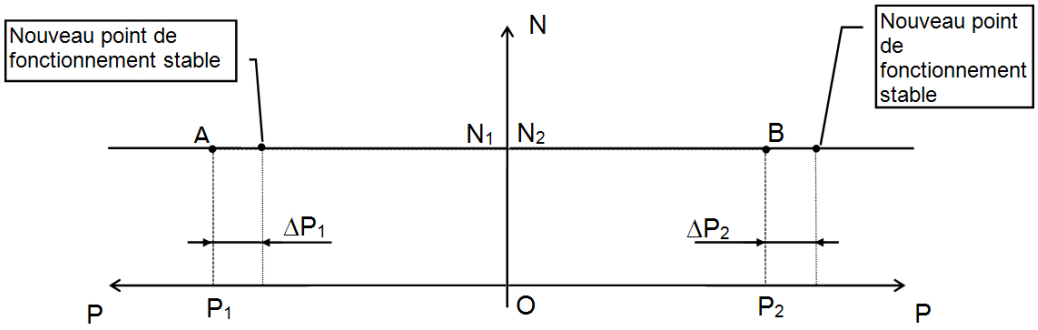


FIGURE 2.6 – Astatisme de deux machines fonctionnant en parallèle.

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

Conclusion : il faut du statisme positif !

2.3 Répartition des charges

La stabilité du couplage étant admise, il nous reste à étudier la problème de la répartition des charges entre les alternateurs. La figure 2.7 montre les caractéristiques mécaniques. Un état d'équilibre étant donné, nous avons :

— $N = N_0$;
— groupe 1 : puissance P_1 ;
— groupe 2 : puissance P_2,
— installation : $P_{\text{totale}} = P_1 + P_2$.

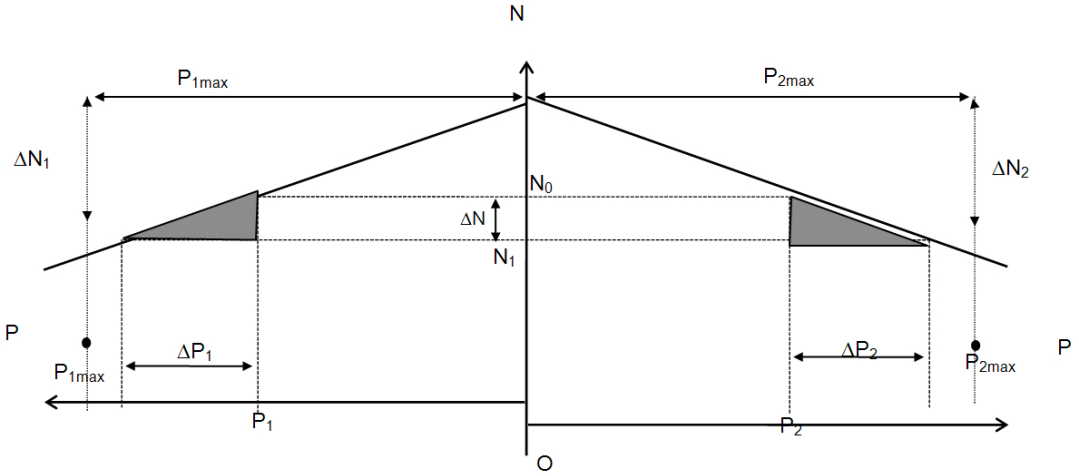


FIGURE 2.7 – Fonctionnement parallèle de deux machines.

Si l'installation a besoin de plus de puissance, cette puissance supplémentaire sera répartie entre les deux diesels en fonction des caractéristiques de leur régulateur. Un nouvel état d'équilibre s'établira après étouffement du régime transitoire et nous aurons : $N = N_1$ et

$$P_{\text{totale}} = \Delta P_1 + \Delta P_2 \tag{2.3.1}$$

En remarquant que les triangles $[\Delta N_1, P_{1\max}, N_1 = f(P_1)]$, $[\Delta N_2, P_{2\max}, N_2 = f(P_2)]$ de la figure 2.7 sont semblables, nous pouvons écrire la relation :

$$\frac{\frac{\Delta P_1}{\Delta N}}{\frac{\Delta P_2}{\Delta N}} = \frac{\frac{\Delta P_{1\max}}{\Delta N_1}}{\frac{\Delta P_{2\max}}{\Delta N_2}} \Rightarrow \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{P_{1\max}}{P_{2\max}} \times \frac{\Delta N_2}{\Delta N_1} \tag{2.3.2}$$

Les équations 2.3.1 page ci-contre et 2.3.2 page précédente donnent les expressions suivantes pour ΔP_1 et ΔP_2 :

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

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

Les accroissements de charge pris par deux groupes couplés sont proportionnels à leurs puissances maximales respectives ($P_{1\max}$ et $P_{2\max}$) et au statisme de l'autre groupe. En effet, ΔN_1 et ΔN_2 sont proportionnelles au statisme.

Dans le 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 l'équation 2.3.2 page ci-contre, cette condition impose l'égalité des statismes : $\Delta N_1 = \Delta N_2$, voir la figure 2.8

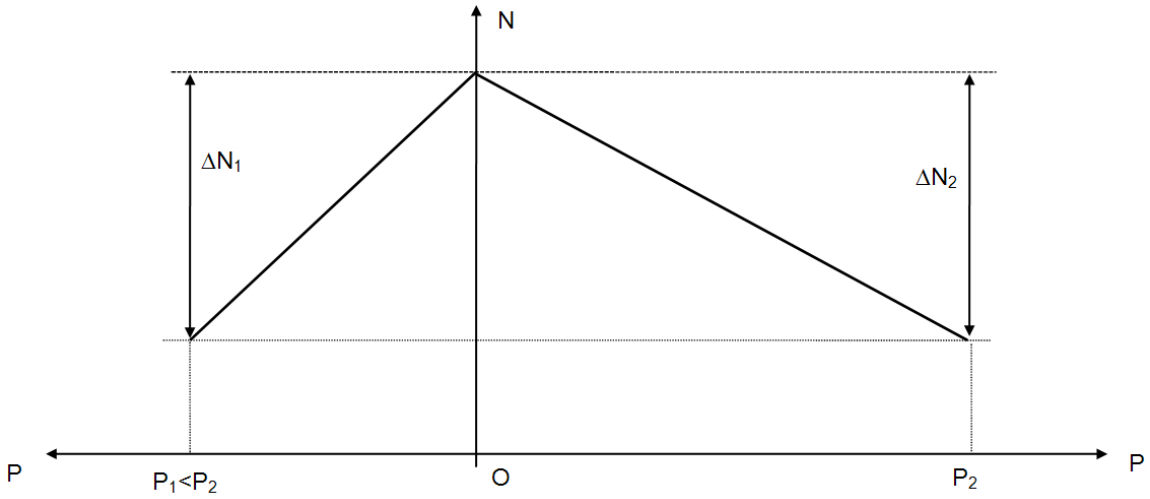


FIGURE 2.8 – Fonctionnement parallèle de deux machines de statisme différent.

Chapitre 3

Sécurités d'un alternateur

Afin de protéger l'alternateur contre des dommages d'origine électrique ou mécanique et de protéger également le moteur Diesel [1] qui l'entraîne, le disjoncteur de couplage est ouvert en cas de :

1. protections reliées aux transformateurs de tension :
   - manque de tension ($0,75 \times U_{\text{nominale}}$ pendant 3 s $\Rightarrow$ arrêt général) ;
   - surtension ($1,1 \times U_{\text{nominale}}$ pendant 2 s $\Rightarrow$ arrêt général) ;
   - maximum de fréquence ($1,05 \times F_{\text{nominale}}$ pendant 2 s $\Rightarrow$ arrêt général) et minimum de fréquence ($0,95 \times F_{\text{nominale}}$ pendant 2 s $\Rightarrow$ arrêt général) ;
   - contrôle de la synchronisation : empêcher la fermeture durant la synchronisation si : fréquence $< \pm 1$ Hz, tension $< \pm 5$ %, phase $< 10°$;
2. protections reliées aux transformateurs de courant coté ligne :
   - relais à retour de puissance active [2], (1-5 % si turbine, 5-20 % si Diesel, pendant 2 s $\Rightarrow$ arrêt général) ;
   - maximum de courant, ($1,5 \times I_n$ pendant 2 s $\Rightarrow$ arrêt général) ;
   - protection différentielle alternateur qui assure que $\overrightarrow{I_1} + \overrightarrow{I_2} + \overrightarrow{I_3} \approx \overrightarrow{0}$ (pour groupes > 2 MVA).

1. Si la machine qui entraîne l'alternateur est une turbine, les sécurités électriques sont bien évidemment les mêmes, il n'y a de différences qu'au niveau des sécurités mécaniques

2. Ceci afin d'éviter que la machine synchrone ne fonctionne en *moteur* et n'entraîne le Diesel ou la turbine, ce qui consommerait de la puissance active sur le réseau et pourrait également conduire à des incidents mécaniques graves comme des ruptures d'accouplement voir d'arbre au niveau du Diesel ou de l'alternateur

3. protections mécaniques générales du groupe reliées à des détecteurs :
   - température stator (recommandée pour alternateurs au-dessus de 2 MVA) ;
   - température paliers (recommandée pour alternateurs au-dessus de 8 MVA) ;
   - protection terre du rotor.
4. protections mécaniques liées au Diesel d'entraînement de l'alternateur :
   - pression d'huile de lubrification insuffisante ;
   - températures d'échappement trop élevées ;
   - température paliers trop élevée ;
   - survitesse.

Chapitre 4

Délestage

Le délestage est souvent nécessaire afin d'assurer que les éléments essentiels d'un réseau électrique restent alimentés en énergie durant les pointes de consommation ou lors de perturbations du réseau électrique.

Dans un système de distribution électrique, la seule énergie additionnelle disponible est celle fournie par la réserve tournante des machines. Par conséquent, les sites alimentés uniquement par des groupes électrogènes, comme les navires, ont peu de réserves et sont très susceptibles à l'instabilité résultant d'une perturbation telle qu'un défaut dans le système de distribution électrique.

Le délestage est à considérer dans trois cas différents :

— augmentation progressive de la charge ;
— perte d'un groupe électrogène ;
— défauts électriques.

Pour une alimentation électrique fiable du réseau électrique d'un navire, le délestage dans chacun des cas ci-dessus doit être étudié. En général, le système de délestage doit vérifier en permanence l'équilibre entre la charge et la puissance disponible afin de délester les charges non essentielles et maintenir ainsi la stabilité du système. On trouvera ci-après la description des effets et des remèdes dans chacun des cas.

4.1 Augmentation progressive de la charge

Il est possible qu'à certaines périodes la charge excède la puissance nominale des groupes électrogènes. Les groupes électrogènes de production sont

prévus pour une surcharge de 10 % pendant une heure, ainsi, lors d'une évolution progressive de la charge, le système de délestage peut effectuer en temps réel tous les calculs et donner les ordres de délestage aux charges non essentielles. Des automates peuvent reconnecter les charges non essentielles après la période de pointe.

4.2 Perte d'un groupe électrogène

La perte d'un groupe peut brusquement entraîner une réduction considérable de la puissance disponible par rapport aux besoins de la charge. Le délestage immédiat des charges non essentielles est alors nécessaire afin d'assurer la stabilité du réseau de distribution.

Sans délestage, il y aura déclenchement par surcharge, baisse de tension, ou baisse de fréquence, conduisant à la perte probable de la totalité de l'alimentation électrique. Le système de délestage doit être programmé pour envoyer immédiatement les ordres de déclenchement nécessaires. Le délestage peut se faire en moins de 200 ms, ce qui est généralement suffisant pour empêcher de perdre la stabilité du système, et pourrait éventuellement conduire à une panne totale du réseau de distribution interne (black-out).

4.3 Défauts électriques

Les défauts électriques sont détectés par les relais de protection, provoquant le déclenchement des disjoncteurs et isolant ainsi l'équipement défectueux. Durant le temps d'élimination du défaut, la tension dans la zone du défaut peut tomber pratiquement à zéro, ce qui peut entraîner le ralentissement de tous les moteurs de l'installation. À l'élimination du défaut, les moteurs absorberont un courant supplémentaire pour retrouver leur vitesse normale. Cela pourrait accentuer la chute de tension dans certaines zones de l'installation, avec un effet « boule de neige » jusqu'au déclenchement des disjoncteurs alimentant les parties saines de l'installation.

Pour empêcher une telle perte de stabilité, il est nécessaire d'avoir un système de délestage agissant sur baisse de tension et/ou baisse de fréquence. Pour déterminer les charges à éliminer par délestage, ainsi que les niveaux de tension et de fréquence devant provoquer le délestage, il est nécessaire d'effectuer une étude de stabilité du réseau. Cette étude modélise la réponse dynamique du système lors de perturbations et permet de préparer une stratégie de délestage.

Chapitre 5

Excitation

5.1 Généralités

5.1.1 Définition du système d'excitation

Le courant d'excitation des machines synchrones est obtenu à partir d'un ensemble appelé *système d'excitation* comportant, dans la majorité des cas :

— 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 puissances 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 ;

— éventuellement, des *étages amplificateurs intermédiaires*, intercalés entre le régulateur et la source de puissance.

5.1.2 Fonctions devant être assurées par le système d'excitation

Le système d'excitation des machines synchrones est amené à jouer un rôle important dans deux catégories de circonstances :

— d'une part, il contribue au *réglage de tension* dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire lorsque les conditions extérieures

appliquées, et notamment la tension aux bornes, ne varient pas avec simultanément une grande amplitude et une grande rapidité. On considère dans ce cas le comportement du système d'excitation vis-àvis des *petites perturbations* ;

— d'autre part, il contribue au *rétablissement de conditions normales* de fonctionnement, à la suite de variations brutales et de grande amplitude, des conditions extérieures appliquées, et notamment de la tension aux bornes. On considère alors le comportement du système d'excitation vis-à-vis des *grandes perturbations*.

5.1.3 Comportement vis-à-vis des petites perturbations

La première qualité du réglage de tension est la *précision*. La précision statique, c'est-à-dire la réponse du système d'excitation, une fois éteints les régimes transitoires, peut être caractérisée :

— soit par la *variation maximale de tension* $\Delta U/U_n$ admissible lorsque l'on modifie le régime des puissances active et réactive (exemple : $\Delta U/U_n =$ 1% lorsque l'on passe du régime à vide au régime nominal) ;

— soit par le gain statique $G = \frac{\Delta V_f/V_{fn}}{\Delta U/U_n}$ caractérisant la variation relative de la tension d'excitation V_f que le régulateur de tension doit provoquer lorsque se produit une variation de tension aux bornes de la machine synchrone. Un ordre de grandeur usuel est $G \simeq 30$.

La deuxième qualité du réglage de tension est la *rapidité*. Le système d'excitation doit réagir rapidement à une variation de tension de moyenne importance (par exemple, $\Delta U/U_n = 5$ à 10%). Pour cela, il faut un temps de réponse faible ; on est aussi amené, parfois, à adopter un *gain transitoire* plus élevé que le gain statique.

5.2 Sources de puissance rotorique

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 (§ 5.4 page 61 et 5.3).

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 (autoalimentation).

Par la suite, nous ne nous intéresserons pas aux excitatrices à courant continu.

5.2.1 Alternateur-excitateur débitant sur redresseurs

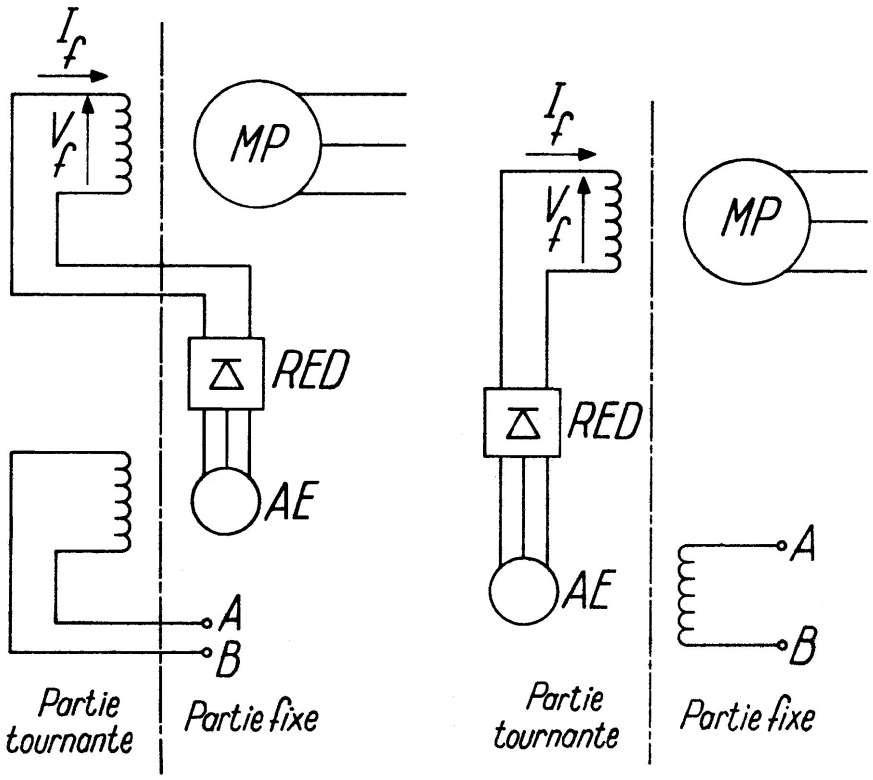
Il existe deux variantes selon que l'alternateur-excitateur est de conception classique, c'est-à-dire à inducteur tournant et induit fixe, ou l'inverse. Ces deux variantes sont représentées schématiquement à la figure 5.1 page suivante et, pour les rendre plus claires, on a indiqué la démarcation entre les éléments fixes et les éléments tournants. Lorsque les courants doivent traverser cette démarcation, il est nécessaire d'utiliser des bagues et des 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 5.1b page suivante est de ne nécessiter aucun contact glissant. Cet avantage est très important dans le cas de très gros alternateurs, dont le courant d'excitation atteint des valeurs élevées (plus de 3000 A pour un alternateur de 600 MW).

Cependant, la solution de la figure 5.1b page suivante est délicate au point de vue construction : d'une part, il est plus difficile de faire tourner un induit qu'un inducteur, car le premier supporte des tensions et des courants beaucoup plus élevée, et, d'autre part, les redresseurs , tournant à grande vitesse, sont soumis à des contraintes mécaniques importantes. C'est pourquoi les deux solutions sont utilisées à l'heure actuelle pour l'excitation des très gros turboalternateurs.

5.3 Modalités de réglage de l'excitation

Dans le schéma 5.1 page suivante, une source de tension continue réglable doit être appliquée entre les bornes A et B, la puissance de cette source étant



(a) à inducteur tournant. (b) à induit tournant.

FIGURE 5.1 – Principe de l'excitation par alternateur-excitateur. *AE* : alternateur-excitateur. *MP* : machine principale

considérablement plus faible (de l'ordre de 100 fois) que la puissance d'excitation à régler.

Cette source est généralement un pont redresseur à thyristors. Le réglage se fait directement par action sur le pont de thyristors. Notons que dans le schéma de la figure 5.1, les diodes du pont redresseur de puissance pourraient être remplacées par des thyristors, néanmoins cette technique n'est pas encore très développée par suite des difficultés de pilotage des thyristors tournants (cas de la figure 5.1b).

5.3.1 Autoalimentation

Il existe deux procédés d'autoalimentation : à dérivation pure et à composition.

5.3.1.1 Autoalimentation 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 comme le montre la figure 5.2.

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 auxiliaire.

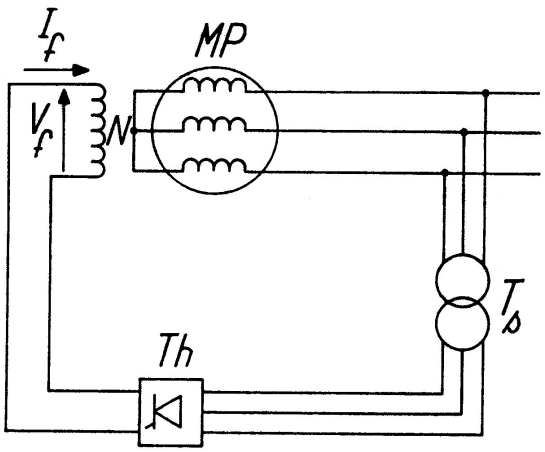


FIGURE 5.2 – Principe de l'excitation par autoalimentation à dérivation pure. MP : machine principale, *Th* : pont de thyristors, *Ts* : transformateur de soutirage.

5.3.1.2 Autoalimentation avec composition série

Un exemple d'une telle réalisation est représenté sur la figure 5.3 page 61. 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 5.2 ;

— 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 composition. 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 5.3 page suivante 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 5.4 page 62. 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.

5.3.1.3 Autoalimentation avec composition parallèle

On peut réaliser une composition parallèle, conformément à la figure 5.5 page 63 en utilisant un transformateur à trois enroulements :

le primaire, placé côté neutre, est traversé par le courant de la machine synchrone ;

le secondaire est alimenté en dérivation sur la sortie de la machine synchrone par l'intermédiaire d'une inductance en série ;

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.

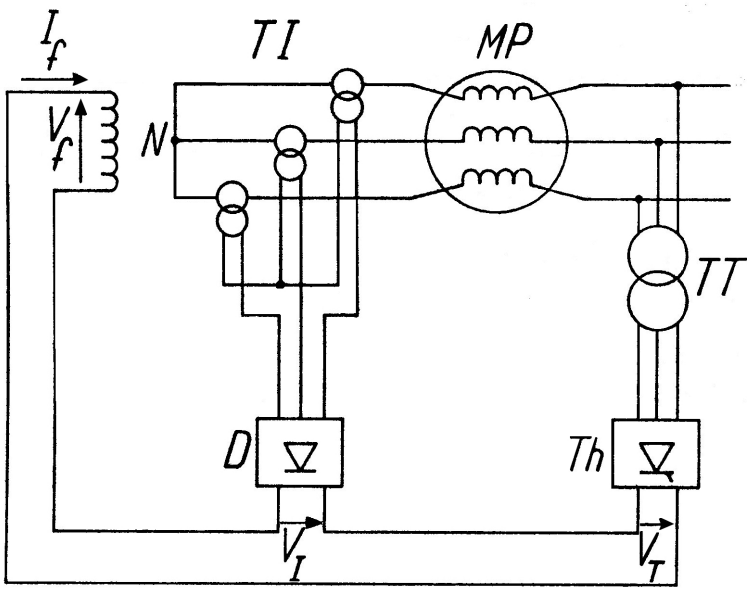


FIGURE 5.3 – Principe de l'excitation par autoalimentation avec composition série. Mise en série des tensions continues. *D* : pont de diodes, *MP* : machine principale, *Th* : pont de thyristors, *TI* : transformateur d'intensité, *TT* ; transformateur de tension.

5.4 Théorie simplifiée de la composition

5.4.1 Principe

Lorsque l'alternateur est à vide et que, par conséquent, il ne débite aucun courant, le courant d'excitation I_0 produit une tension $\vec{E} = \vec{V}$. Ce courant est en quadrature avant par rapport au vecteur $\vec{V}$ comme le montre la figure 5.6 page 63

En effet, nous avons $e = -\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} \Rightarrow \varphi = -\int e \cdot \mathrm{d}t$ ou encore avec des grandeurs sinusoïdales :

$$\underline{\varphi} = -\frac{1}{j\omega} \cdot \underline{E} = j \cdot \underline{E}$$

Le flux est donc en avance sur la tension, comme le flux est proportionnel au courant d'excitation, on en déduit que $\vec{I_0}$ est en avance de 90° sur $\vec{V}$ ou sur $\vec{E}$.

Lorsque l'alternateur débite sur un réseau inductif par exemple, le vecteur $\vec{E}$ doit s'allonger afin que la tension V reste constante. En effet, la chute de ten-

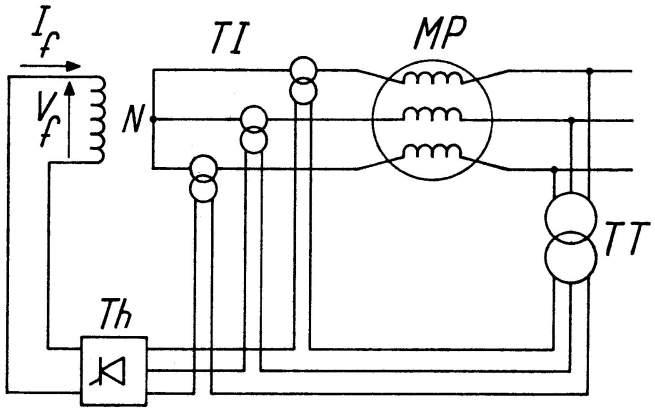


FIGURE 5.4 – Principe de l'excitation par autoalimentation avec composition série. Mise en série des tensions alternatives. *MP* : machine principale, *Th* : pont de thyristors, *TI* : transformateur d'intensité, *TT* ; transformateur de tension.

sion due à l'inductance cyclique (si on néglige la résistance d'un enroulement statorique pour simplifier le propos) doit être compensée :

$$\vec{E} = \vec{V} + jL\omega\vec{I}$$

Le nouveau courant d'excitation $\vec{I_e}$ reste en avance sur $\vec{E}$ de 90°. Ce courant doit désormais être la somme de $\vec{I_0}$ et d'un vecteur courant proportionnel au courant débité :

$$\vec{I_e} = \vec{I_0} - k\vec{I}$$

comme le montre la figure 5.7 page 64

Pour obtenir le courant d'excitation, il faudra donc engendrer un courant d'excitation réglable $\vec{I_0}$ responsable de la tension à vide et lui ajouter une composante proportionnelle au courant débité par l'alternateur $-k\vec{I}$.

Cette composition des vecteurs courants nécessaire pour obtenir le courant d'excitation peut se faire de différentes manières, en série ou en parallèle.

5.4.2 Composition série

La composition série s'effectue selon le schéma monophasé équivalent de la figure 5.8 page 65.

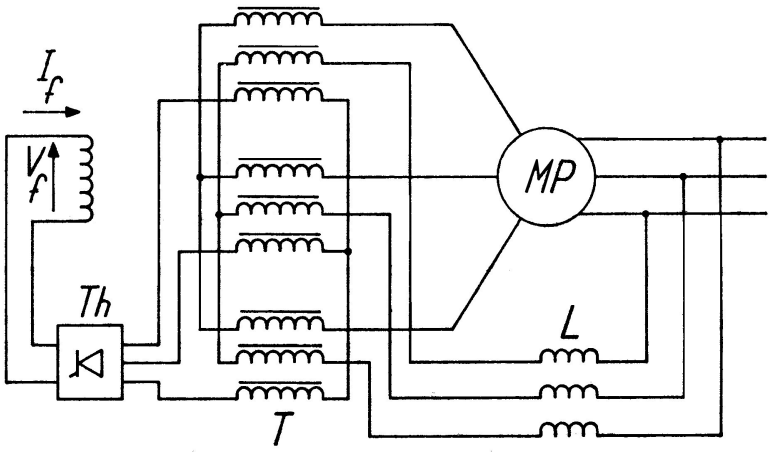


FIGURE 5.5 – Principe de l'excitation par autoalimentation avec composition parallèle. L : inductances, MP : machine principale, T : transformateur triphasé à trois enroulements, Th : pont de thyristors.

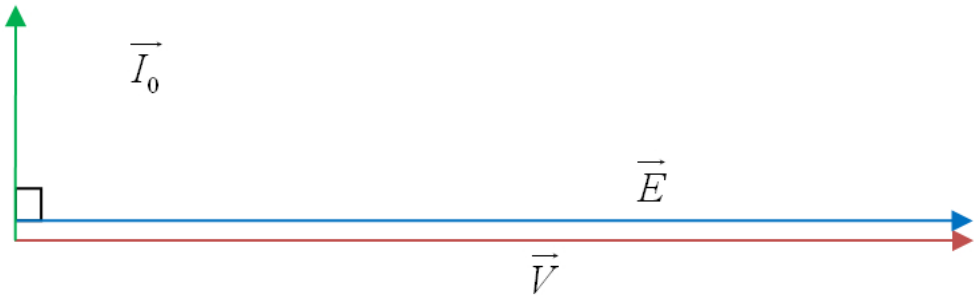


FIGURE 5.6 – Diagramme de Behn-Eschenburg de l'alternateur à vide, position du vecteur courant d'excitation.

Examinons d'abord le système dans lequel la *mise en série* s'effectue du *côté alternatif* (voir la figure 5.4 page précédente).

Le schéma monophasé équivalent comporte (voir la figure 5.8 page 65) :

— 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 ;

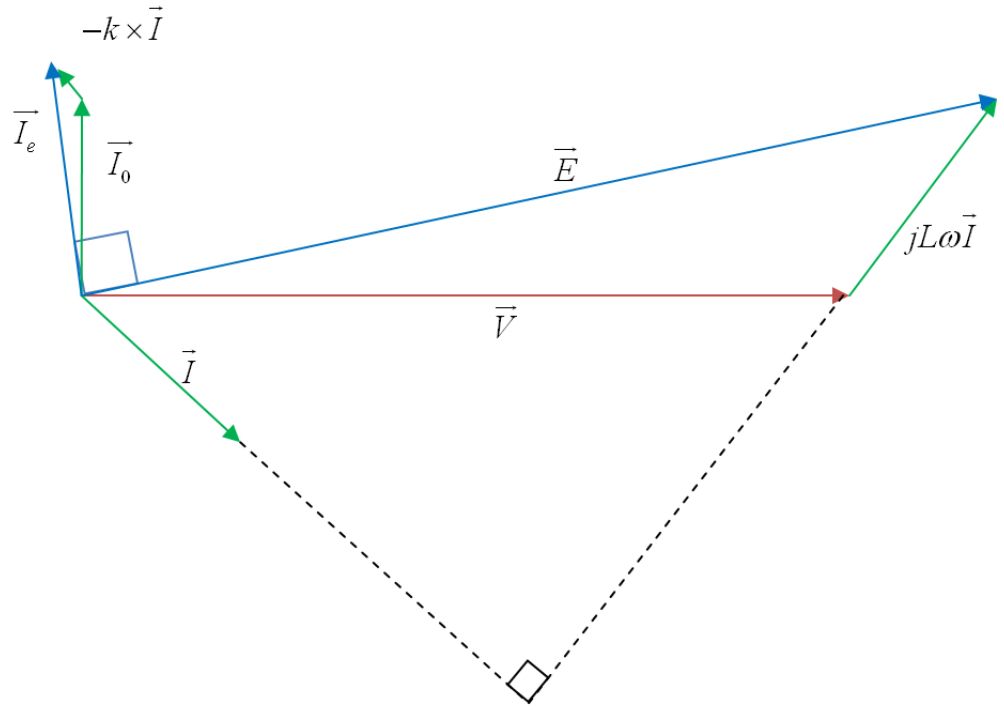


FIGURE 5.7 – Diagramme de Behn-Eschenburg de l'alternateur en charge, position et composition du vecteur courant d'excitation.

  - une inductance de fuites totales N_{1I} au primaire, définie par $N_{1I} = L_{1I} - (M_I^2/L_{2I})$, L_{1I} 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 ramenées au secondaire N_{2T}.

Nous avons la tension aux bornes du pont redresseur qui est égale à :

$$\underline{V_s} = \underline{V_I} + \underline{V_T}$$

V_T est la tension responsable du courant d'excitation I_0 permettant d'avoir une tension à vide correcte. V_I est la tension image du courant débité par l'alternateur.

5.4.3 Composition parallèle

La figure 5.5 page précédente montre le montage triphasé de l'excitation composée parallèle. La figure 5.9 page ci-contre montre le schéma équivalent

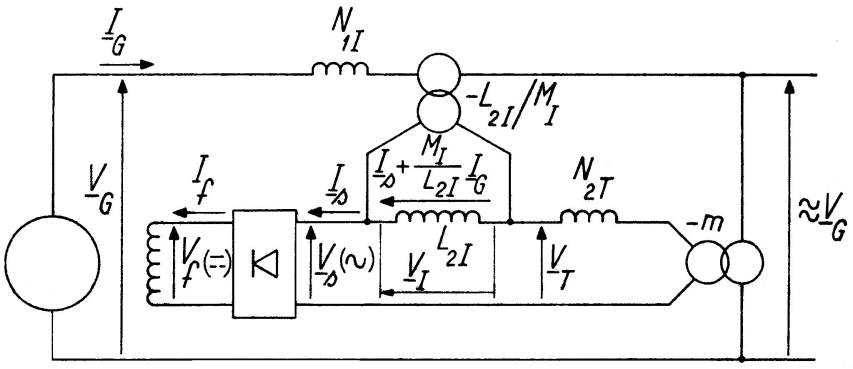


FIGURE 5.8 – Schéma monophasé équivalent de l'autoalimentation avec composition série.

monophasé de ce montage. On obtient dans l'enroulement secondaire n_3 un nombre d'ampères-tours égale à la somme des ampères-tours dus au courant d'excitation $\underline{I}_2$ responsable de la tension à vide et aux ampères-tours dus au courant débité par l'alternateur $\underline{I}_G$. L'inductance L permet de régler I_0 afin de régler la valeur de la tension à vide. Les différents nombres de spires sont choisis pour que la somme des ampères-tours donne un courant d'excitation $\underline{I}_s$ convenable qui sera redressé par un pont de diode pour donner un courant continu $I-f$.

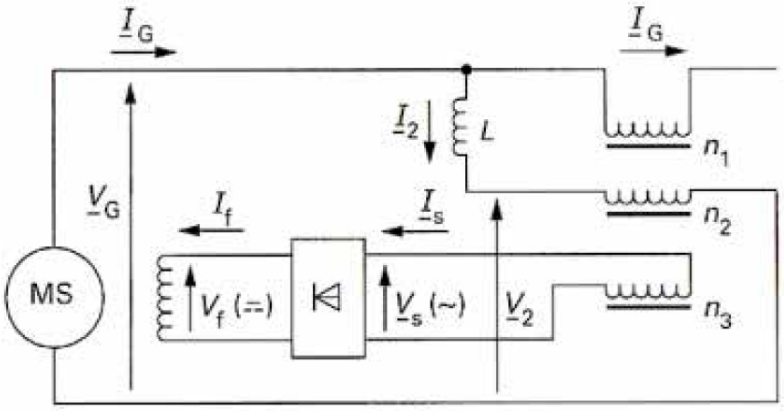


FIGURE 5.9 – Schéma monophasé équivalent de l'autoalimentation avec composition parallèle.

Un troisième primaire, non représenté sur la figure 5.9 permet le réglage de la tension lorsque le point de fonctionnement du circuit magnétique de l'alternateur sort de la zone de linéarité.

5.5 Exemples d'excitation

Le figure 5.10 montre le schéma d'une excitation statique composée parallèle.

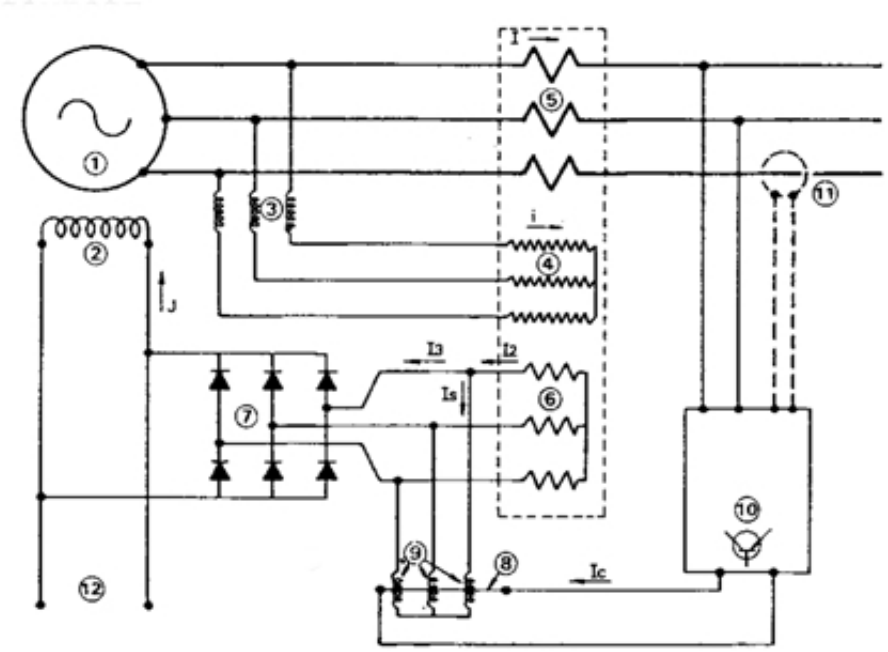


FIGURE 5.10 – Schéma d'une excitation statique avec composition parallèle.

La partie notée 1 correspond au stator tandis que celle notée 2 correspond au rotor. Les inductances de réglage de la tension à vide sont notées 3.

Le primaire du transformateur de composition comprend un primaire, noté 4, pour les ampères-tours correspondant à la tension et un deuxième primaire, noté 5, pour les ampères-tours correspondant au courant débité par l'alternateur.

L'élément noté 6 correspond au secondaire du transformateur de composition ; L'élément noté 7 est le pont redresseur à diodes.

Les éléments 8 et 9 permettent d'ajouter une tension lorsque le point de fonctionnement du circuit magnétique de l'alternateur sort de la zone de linéarité. Le courant d'excitation I_e n'est plus assez important et il faut que le régulateur 10 agisse. Ce régulateur a pour information la tension entre phase et éventuellement le courant débité par l'intermédiaire du transformateur d'intensité 11.

Enfin, si le champ rémanent porté par le circuit magnétique de l'alternateur n'est pas assez important lors du démarrage, une source de tension auxiliaire (batterie) peut être connectée en 12 pour amorcer la machine.

La figure 5.11 page suivante représente une excitation sans bague ni balais.

Les éléments la composant sont les suivant :

1. stator ;
2. rotor ;
3. pont redresseur tournant ;
4. induit ;
5. inducteur ;
6. régulateur qui entre en action lorsque le courant débité fait que l'on sort de la zone de linéarité du circuit magnétique ;
7. transformateur d'intensité ;
8. pont redresseur fixe par rapport au stator ;
9. réglage de la tension ;
10. deuxième inducteur de l'excitatrice alimenté par le régulateur ;
11. transformateur de courant pour le régulateur ;
12. circuit d'amorçage au cas où le rémanent serait trop faible au démarrage de l'alternateur.

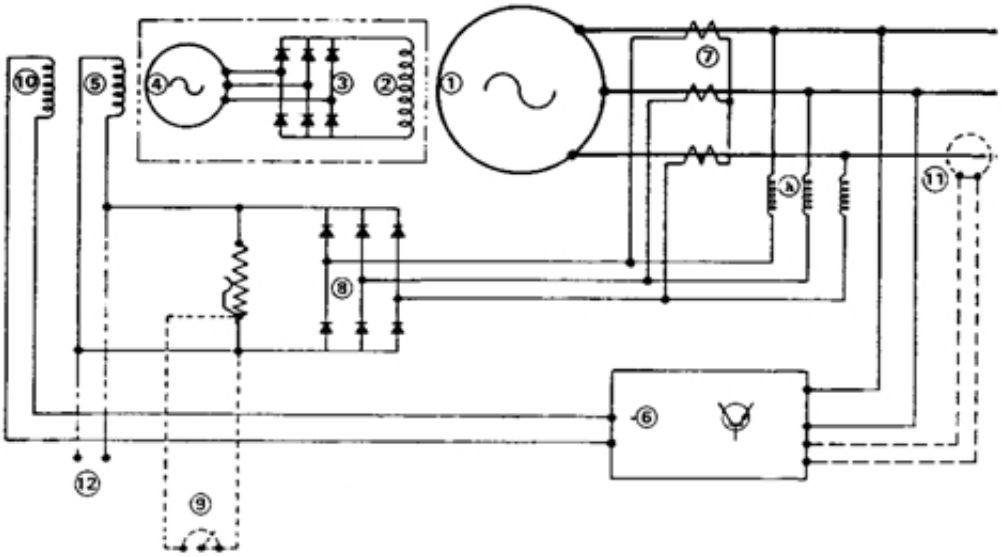


FIGURE 5.11 – Schéma d'une excitation statique avec composition parallèle.

Chapitre 6

Exercices et problèmes

6.1 Exercices et problèmes sur la machine synchrone

6.1.1 Alternateur monophasé

Un alternateur monophasé tétrapolaire comporte 100 conducteurs. Le flux par pôle vaut 25 mWb et la fréquence est de 50 Hz. On mesure aux bornes de l'induit une tension de valeur efficace $E = 267\,\text{V}$.

1. Calculer la vitesse de rotation du rotor de l'alternateur.
2. Calculer le coefficient de Kapp de l'enroulement.

Voir la correction page 76.

6.1.2 Alternateur triphasé

Le rotor d'un alternateur triphasé, 50 Hz, tourne à la vitesse de 750 tr/min . Son stator comporte 120 encoches régulièrement réparties, chacune d'elles contient 4 conducteurs. Toutes les encoches sont utilisées, les trois enroulements sont couplés en étoile et leur résistance est négligée ; le coefficient de Kapp est 2,14. On donne le flux par pôle en fonction de l'excitation :

I_e (A)	8	10	11,8	15,4	17	20	26	34
ϕ (mWb)	50	61	70	85	90	97	105	108

L'alternateur débite 150 A purement inductifs sous la tension de 962 V entre fils de ligne avec une excitation de 15,4 A.

1. Calculer le nombre de pôles de l'alternateur.
2. Calculer la tension à vide pour $I_e = 15,4\,\text{A}$.
3. Calculer la réactance synchrone par phase pour cette excitation.

Voir la correction page 76.

6.1.3 Alternateur triphasé

Un alternateur triphasé possède un stator monté en étoile. Son rotor tourne à la vitesse de 1500 tr/min. La fréquence est de 50 Hz. La résistance d'une phase est $R = 0,8\,\Omega$. On a relevé la caractéristique à vide :

I_e (A)	0	0,25	0,4	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	3
E (V)	10	86	131	156	192	213	226	240	252	262	305

Un essai en court-circuit a permis de relever $I_{CC} = 48\,\text{A}$ pour un courant d'excitation de $I_e = 0,5\,\text{A}$.

1. Calculer la réactance synchrone d'induit $L\omega$.
2. L'alternateur débite dans un récepteur inductif dont le facteur de puissance est 0,8, un courant de 30 A en ligne sous une tension de 380 V entre phases. Calculer l'intensité du courant d'excitation.
3. Calculer la valeur de la tension simple à la sortie de l'alternateur dans le fonctionnement suivant : $I = 18\,\text{A}$, $\cos\varphi = 0,6$ capacitif, $I_e = 1\,\text{A}$.
4. On monte une charge résistive en triangle à la sortie de l'alternateur. On ne modifie pas le courant d'excitation. Calculer la valeur R_{max} d'une des trois résistances pour que la puissance active fournie par l'alternateur soit maximale.

Voir la correction page 77.

6.1.4 Moteur synchrone

Une machine synchrone triphasée à 6 pôles, fonctionne en moteur synchrone. La résistance de l'induit est négligeable et la réactance constante est égale à 8 Ω. On applique aux bornes du moteur une tension composée de 200 V, fréquence 50 Hz.

1. On règle l'excitation du moteur pour que son facteur de puissance soit égal à 1. Le moteur développe alors une puissance de 5 kW.

1.1. Calculer la vitesse du moteur en tour par minute.
1.2. Calculer le courant fourni par le réseau.
1.3. Calculer le couple moteur.
1.4. Calculer la f.c.é.m. E du moteur .

2. On augmente l'excitation du moteur jusqu'à ce que le facteur de puissance devienne égal à 0,8 la puissance développée par le moteur reste de5 kW.
   2.1. Calculer le déphasage du courant absorbé par la machine par rapport à la tension et le sens de ce déphasage .
   2.2. Calculer le courant absorbé par le moteur.
   2.3. Calculer la f.c.é.m. E du moteur.
3. Déterminer graphiquement quelques points du graphe $I = f(E)$ qui donne le courant fourni par le réseau en fonction de la force contre-électromotrice du moteur quand celui-ci développe une puissance de 4 kW. Ces points seront choisis de façon à donner une idée générale de l'allure du graphe. Échelle conseillée : 1 mm pour 2 V. On admettra que la puissance fournie par le réseau est intégralement transmise à la roue polaire.

Voir la correction page 77.

6.1.5 Compensateur synchrone

Les compteurs d'énergie active et réactive installés sur le tableau d'alimentation d'une usine s'incrémente en moyenne de respectivement 13 750 kWh et 16500 kVARh pour une journée.

1. Calculer le facteur de puissance moyen de cette usine.
2. On veut relever le facteur de puissance moyen jusqu'à 0,85 par l'emploi d'une machine synchrone surexcitée (compensateur synchrone) fonctionnant à vide. Calculer la puissance apparente de cette machine, si, en première approximation, on néglige la puissance active qu'elle absorbe.
3. En supposant que la machine considérée absorbe une puissance active égale à 6,5 % de sa puissance réactive, calculer exactement la puissance apparente du compensateur synchrone à installer.
4. Par la suite, on veut utiliser la machine synchrone en moteur. Calculer la puissance active qu'elle devra absorber si on veut relever au maximum le facteur de puissance .

Voir la correction page 80.

6.1.6 Groupe convertisseur tournant

On étudie un groupe convertisseur tournant 50 Hz - 400 Hz. Un alternateur 400 Hz est entraîné par un moteur synchrone 50 Hz alimenté par un réseau triphasé 380 V entre phase. Les notations sont indiquées sur la figure 6.1.

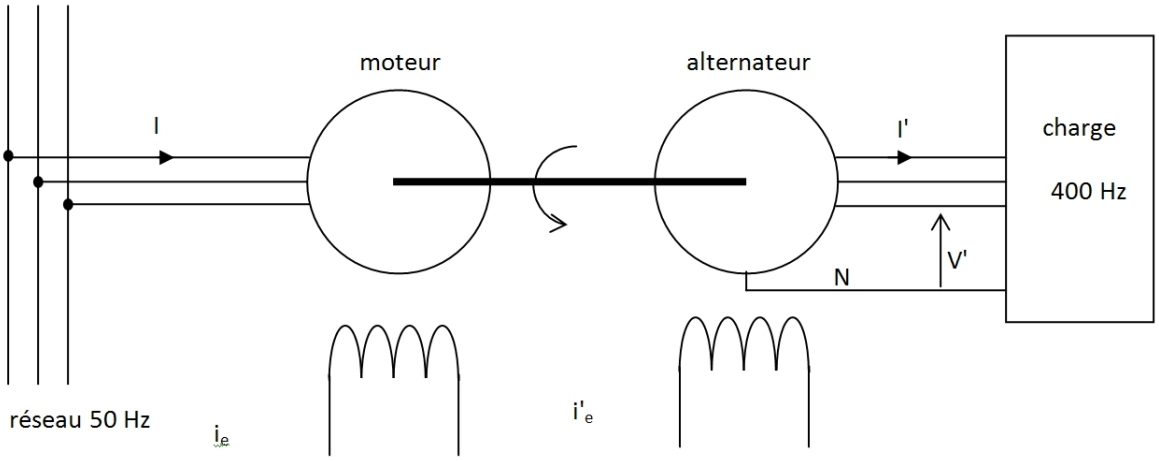


FIGURE 6.1 – Groupe convertisseur tournant.

Les deux machines sont montées en étoile et elles ont pour caractéristiques par phase :

— moteur : f.é.m. notée E ; réactance synchrone : $X = 2\,\Omega$;

— alternateur : f.é.m. notée E' ; réactance synchrone : $X' = 0,75\,\Omega$.

On néglige les pertes des deux machines ainsi que les résistances des phases. La charge triphasée 400 Hz absorbe $I' = 30\,\text{A}$ avec un cos = 0,6 inductif sous une tension simple $V' = 115\,\text{V}$.

1. Le moteur comporte une paire de pôles par phase.
   1.1. Calculer la vitesse de rotation du groupe.
   1.2. Calculer le nombre de pôles de l'alternateur.
2. Calculer valeur de la f.é.m. E' pour que la charge soit alimentée sous $V' = 115\,\text{V}$.
3. Calculer la puissance et le couple fournis par le moteur d'entraînement.
4. La f.é.m. du moteur est réglée pour que son facteur de puissance soit égal à 1 lorsque la charge 400 Hz est alimentée.
   4.1. Calculer la valeur du courant absorbé.
   4.2. Calculer la valeur de E .
5. On débranche la charge ($I' = 0$) sans modifier E. Calculer le courant absorbé par le moteur et son déphasage par rapport à V (en grandeur et en signe).

6. Pourquoi a-t-on choisi un moteur synchrone pour entraîner le groupe convertisseur ?

Voir la correction page 82.

6.1.7 Couplage d'un alternateur sur le réseau : faute de couplage

A bord d'un navire, on couple un alternateur, entraîné par un moteur diesel, de puissance apparente 10 MVA sur le réseau 6600 V - 60 Hz (tension composée). La résistance et la réactance synchrone par phase de l'alternateur valent respectivement $R = 0,5\,\Omega$ et $L\omega = 1,5\,\Omega$. L'alternateur possède 5 paires de pôles.

A l'instant du couplage, la tension mesurée sur le réseau vaut 6580 V, la tension aux bornes de l'alternateur est décalée de30° en arrière sur celle du réseau et elle vaut 6615 V.

1. Calculer l'appel de courant.
2. Calculer l'appel de puissance dus à cette faute de couplage.
3. Calculer le couple de torsion qui apparaît au niveau de l'accouplement diesel - alternateur.

Voir la correction page 85.

6.1.8 Questions sur le statisme

1. Lorsqu'on augmente la consigne de vitesse d'un générateur en fonctionnement isolé :

question	vrai	faux
sa fréquence augmente		
sa puissance active augmente		
son facteur de puissance augmente		

2. Lorsqu'on augmente la consigne de vitesse d'un générateur en fonctionnement parallèle :

question	vrai	faux
sa fréquence augmente		
sa puissance active augmente		
son facteur de puissance augmente		

3. Lorsqu'on augmente la consigne de tension d'un générateur en fonctionnement isolé :

question	vrai	faux
sa fréquence augmente		
sa puissance active augmente		
sa puissance réactive augmente		

4. Lorsqu'on augmente la consigne de tension d'un générateur en fonctionnement parallèle :

question	vrai	faux
sa puissance active augmente		
son facteur de puissance baisse		
sa puissance réactive augmente		

5. Lorsqu'on augmente le statisme en fréquence d'un générateur en fonctionnement parallèle :

question	vrai	faux
sa puissance active augmente		
son facteur de puissance baisse		
sa puissance réactive augmente		

6. Lorsqu'on augmente le statisme en tension d'un générateur en fonctionnement parallèle :

question	vrai	faux
sa puissance active augmente		
son facteur de puissance baisse		
sa puissance réactive augmente		

Voir correction **??** page ??

6.1.9 Exercice sur le statisme

On considère un groupe électrogène constitué d'un diesel semi rapide de 1,2 MW entrainant un alternateur dont la plaque signalétique spécifie :

— 440 V – 60 Hz ;

— 1 MVA ;

— $\cos\varphi = 0.85$;

Ce diesel alternateur (DA_1) est dimensionné pour alimenter une charge électrique nominale de 800 kW avec un facteur de puissance de 0,8.

On a effectué deux essais en fonctionnement isolé avec les mêmes consignes de régulation de fréquence et de tension. Les relevés effectués sont les suivants :

Essai n° 1 :

— $P_1 = 200\,\text{kW}$;
— $U_1 = 435\,\text{V}$;
— $f_1 = 60\,\text{Hz}$;
— $I_1 = 332\,\text{A}$.

Essai n° 2 :

— $P_2 = 700\,\text{kW}$;
— $U_1 = 432\,\text{V}$;
— $f_1 = 59{,}2\,\text{Hz}$;
— $I_1 = 1169\,\text{A}$.

1. Calculer P et Q nominaux de ce groupe électrogène.
2. Calculer Q, S et $\cos\varphi$ pour chacun des essais.
3. Calculer le statisme en fréquence du régulateur de vitesse du diesel.
4. Calculer le statisme en tension du régulateur de tension de l'alternateur.

Le DA_1 étant dans les mêmes conditions de charge que lors de l'essai n° 2, on couple un second DA (DA_2) identique au premier. Les consignes de vitesse des diesels sont réglées à 60 Hz et les consignes de tension à 440 V.

5. Calculer P, Q, $\cos\varphi$, f, V et I pour les deux groupes électrogènes.

Étant toujours dans les conditions de l'essai n° 2 avec les deux DA en service, consigne de vitesse du DA_2 toujours réglée à 60 Hz et consignes de tension des deux alternateurs toujours réglée à 440 V, on règle la consigne du DA_1 à 60,2 Hz.

6. Calculer P, Q, $\cos\varphi$, f, V et I pour les deux groupes électrogènes.

Étant toujours dans les conditions de l'essai n° 2 avec les deux DA en service, les consignes de vitesse des diesels sont réglées à 60 Hz, la consigne de tension du DA_2 est laissée à 440 V, celle du DA_1 est réglée à 442 V.

7. Calculer P, Q, $\cos\varphi$, f, V et I pour les deux groupes électrogènes.

Étant toujours dans les conditions de l'essai n° 2 avec les deux DA en service, les consignes de vitesse des diesels sont réglées à 60 Hz, les consignes de tension des alternateurs sont réglées à 440 V. On divise par deux le statisme du régulateur de fréquence.

8. Calculer P, Q, $\cos\varphi$, f, V et I pour les deux groupes électrogènes.

Étant toujours dans les conditions de l'essai n° 2 avec les deux DA en service, les consignes de vitesse des diesels sont réglées à 60 Hz, les consignes de tension des alternateurs sont réglées à 440 V. On divise par deux le statisme du régulateur de tension.

9. Calculer P, Q, $\cos\varphi$, f, V et I pour les deux groupes électrogènes.

Suite à une faiblesse mécanique du diesel, on limite la puissance du second groupe électrogène à 80% de sa puissance active nominale.

10. Déterminer les valeurs de réglage des statismes en fréquence et en tension pour prendre en compte cette modification.

Voir la correction 6.1.18 page 87

6.1.10 corrigé de l'exercice 6.1.1, page 69

1. $N_S = \frac{50}{2} \times 60 = 1500$ tr/min.
2. $E = \left(\text{coeff de Kapp}\right) \times n_1 \times p \times N_S \times \phi(I_e)$
   $\Rightarrow$ coeff de Kapp $= \frac{E}{n_1 \times p \times N_S \times \phi(I_e)} = \frac{267}{100 \times 2 \times \frac{50}{2} \times 25 \cdot 10^{-3}} \simeq 2,14$

6.1.11 corrigé de l'exercice 6.1.2, page 69

1. Le nombre de paires de pôles de l'alternateur est donné par la formule de Ferraris :
   $N_S = \frac{f}{p} \Rightarrow p = \frac{50}{750/60} = 4$, il y a donc 8 pôles.
2. La caractéristique à vide tabulée nous permet d'obtenir le flux maximal sous un pôle du rotor : $\widehat{\phi} = 85\,\text{mWb}$.
   On sait que :

   $$E = \left(\text{coeff de Kapp}\right) \times n_1 \times p \times N_S \times \phi(I_e) = 2,14 \times \left(\frac{120 \times 4}{3}\right) \times 4 \times \frac{750}{60} \times 85 \cdot 10^{-3} = 1455\,\text{V}$$

3. Le tracé d'un diagramme de Kapp nous montre que les vecteurs $\vec{V}$, $jL\omega\,\vec{I}$ et $\vec{E}$ sont colinéaires. On a donc : $L\omega = \frac{E-V}{I} = \frac{1455 - \frac{962}{\sqrt{3}}}{150} \simeq 6\,\Omega$

6.1.12 corrigé de l'exercice 6.1.3, page 70

1. La méthode est la même que celle qui nous permettait de calculer l'inductance de fuite ramenée au secondaire d'un transformateur dont on avait fait l'essai en court-circuit : $L\omega = \frac{\sqrt{E^2-(R\cdot I)^2}}{I} = \frac{\sqrt{156^2-(0{,}8\times 48)^2}}{48} = 3{,}15\,\Omega$.
2. Calculons d'abord la norme du vecteur $\vec{E}$. Le diagramme de Kapp esquissé au brouillon nous permet d'écrire : $\vec{E} = \vec{V} + R\cdot\vec{I} + jL\omega\vec{I}$. Le courant est déphasé d'un angle de $\arccos(0{,}8) \simeq 37°$ en retard par rapport à $\vec{V}$.
   Nous avons donc : $\vec{E} = 220+0{,}8\times 30\underline{/-37°}+3{,}15\times 30\underline{/-37°+90°} = 302\underline{/11{,}6°}$V.
   Une résolution graphique nous aurait conduit au même résultat, peut-être un peu moins précis.
   La caractéristique à vide nous permet d'en déduire le courant d'excitation nécessaire : $I_e = 3\,$A.
3. Cette fois-ci, une résolution graphique s'avère beaucoup plus rapide. On place l'extrêmité du vecteur $\vec{V}$ puis, à partir de là, on trace les vecteurs $R\cdot\vec{I}$ et $jL\omega\vec{I}$. De l'extrêmité de $jL\omega\vec{I}$, on trace au compas un arc de cercle de longueur la norme de $\vec{E}$, l'intersection de cet arc de cercle avec l'horizontale, support du vecteur $\vec{V}$, nous donne l'origine de ce vecteur. il ne reste plus qu'à mesurer sa longueur.
   Une résolution trigonométrique est montrée à la figure 6.2. V sera calculé en deux temps : la longueur AC et la longueur CD.
   $CD = L\omega I\sin\varphi - RI\cos\varphi = 3{,}15\times 18\times\sin 53° - 0{,}8\times 18\times\cos 53° = 36{,}6\,$V.
   $CB = RI\sin\varphi + L\omega I\cos\varphi = 0{,}8\times 18\times\sin 53° + 3{,}15\times 18\times\cos 53° = 45{,}6\,$V.
   $AC = \sqrt{\left(AB^2 - BC^2\right)} = \sqrt{213^2 - 45{,}6^2} = 208\,$V.
   Soit : $V = AC + CD = 208 + 36{,}6 \simeq 244{,}7\,$V
4. La clé de cette question est le théorème d'adaptation d'impédance qui stipule que le dégagement d'énergie par effet Joule dans une impédance est maximum lorsque cette impédance est égale au conjugué de l'impédance interne du générateur. Le théorème de Kennelly permet de transformer le triangle de résistances R_{max} en une étoile équivalente composée de trois résistance de valeur $\frac{R_{max}}{3}$. Chacune de ces résistances devant être égale à la résistance interne d'une phase de l'alternateur : $0{,}8\,\Omega$. On a donc : $R_{max} = 3\times 0{,}8 = 2{,}4\,\Omega$.

6.1.13 corrigé de l'exercice 6.1.4, page 70

1. 1.1. La formule de Farraris permet d'obtenir : $N_S = \frac{f}{p} = \frac{50}{3}\times 60 = 1000$ tr/min.

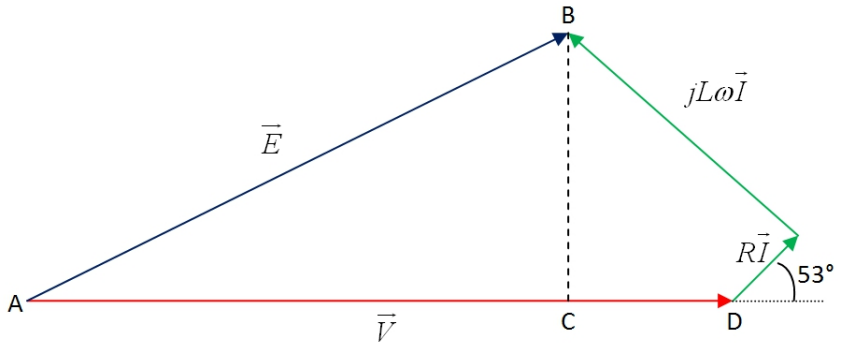


FIGURE 6.2 – Diagramme de Behn-Eschenburg de la question1.4 de l'exercice 6.1.3.

1.2. Si on néglige les différentes pertes de la machine, le réseau fournit un courant égal à $I = \frac{P}{\sqrt{3}\cdot U\cdot\cos\varphi} = \frac{5000}{\sqrt{3}\times 200\times 1} \simeq 14,5\,\text{A}$.

1.3. Le couple moteur est égal à $C = \frac{P_u}{\Omega_S} = \frac{5000}{\frac{1000}{60}\times 2\pi} \simeq 47,7\,\text{Nm}$.

1.4. Pour calculer la f.c.é.m. E du moteur, il faut tracer un diagramme de Behn-Eschenburg comme celui de la figure 6.3.
ATTENTION : la machine fonctionne ici en moteur, la puissance est absorbée sur le réseau et non fournie à celui-ci comme lors d'un fonctionnement en alternateur. Le diagramme se dessine en dessous du vecteur $\vec{V}$ de telle sorte que la projection du vecteur $jL\omega\vec{I}$ sur la verticale passant par l'extrêmité de $\vec{V}$ soit négative. Cette projection est proportionnelle à la puissance active (voir 1.3.2). On peut effectuer une résolution graphique ou bien utiliser le thérorème de Phytagore :

$$E = \sqrt{V^2 + (L\omega I)^2} = \sqrt{\left(\frac{200}{\sqrt{3}}\right)^2 + (8\times 14,5)^2} \simeq 164\,\text{V}$$

2. 2.1. La réponse à ces questions nécessite le tracé du diagramme de Behn-Eschenburg. Le déphasage du courant absorbé par la machine par rapport à la tension est de : $\arccos\varphi = \arccos 0,8 \simeq 37°$. L'orientation du vecteur $jL\omega\vec{I}$ indique que le vecteur $\vec{I}$ est en avance par rapport à $\vec{V}$, le déphasage est donc « avant », la machine est « capacitive », elle fournit de l'énergie réactive au réseau. On aurait pu conclure sur le sens du déphasage en observant que la projection du vecteur $jL\omega\vec{I}$ sur le support de $\vec{V}$ est positive ce qui implique que la machine fournit de la puissance réactive au réseau, qu'elle a donc un comportement capacitif et que donc $\vec{I}$ est en avance sur $\vec{V}$.

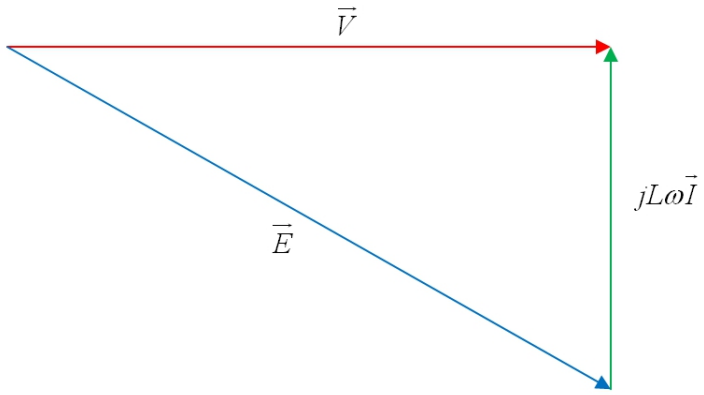


FIGURE 6.3 – Diagramme de Behn-Eschenburg de l'exercice 6.1.4 , question 1.4.

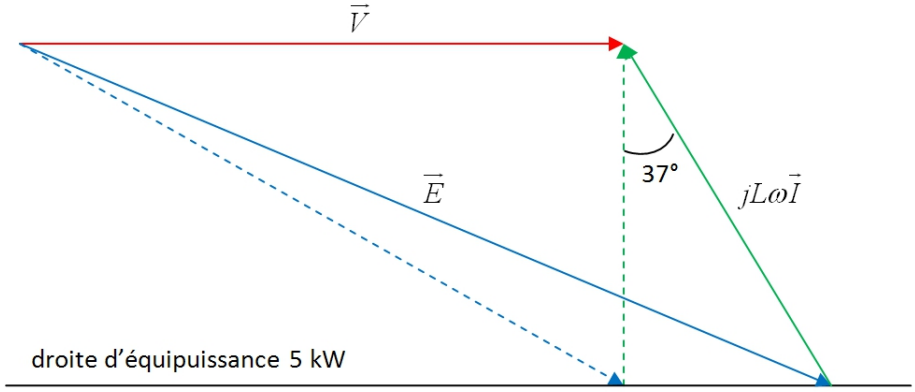


FIGURE 6.4 – Diagramme de Behn-Eschenburg de l'exercice 6.1.4 , question 2.1.

2.2. Le courant absorbé par le moteur se calcule à partir de $jL\omega\vec{I}$. Soit on mesure la longueur de ce vecteur sur la figure 6.4, soit on la calcule : $L\omega I' = \frac{L\omega I}{\cos\varphi} = \frac{I}{\cos\varphi} = \frac{14{,}5}{0{,}8} = 18{,}1\,\text{A}$.

2.3. La f.c.é.m. E du moteur peut se mesurer sur la figure 6.4 ou bien se calculer par le théorème d'Al Kashi :

$$\begin{aligned} E^2 &= V^2 + (L\omega I)^2 - 2\cdot V\cdot(L\omega I)\cdot\cos(90° + 37°) \\ &= \left(\frac{200}{\sqrt{3}}\right)^2 + (8\times 18{,}1)^2 - 2\times\left(\frac{200}{\sqrt{3}}\right)\times(8\times 18{,}1)\times\cos 127 \\ &\Rightarrow E \simeq 233{,}3\,\text{V} \end{aligned}$$

3. Il faut utiliser le diagramme de Behn-Eschenburg. On commence par tracer l'horizontale d'équipuissance correspondant à 4 kW. Une règle de trois permet de déterminer l'ordonnée de son point d'intersection avec l'axe

vertical des puissances actives. Ensuite, il suffit de prendre quelques points de fonctionnement sur cette droite, mettons 3 dans le domaine « machine sous-excitée », un à l'excitation « normale » et trois dans le domaine « machine sur-excitée ». La figure 6.5 montre ces tracés (il en manque deux dans le domaine « machine sur-excitée ».
On mesure ensuite la longueur des différents vecteurs $jL\omega\vec{I}$ et on en déduit I, on mesure $\vec{E}$ et on reporte les couples I, E sur le graphique. L'allure des courbes obtenues est celle des courbes de Mordey, voir la figure 1.3.2.2.

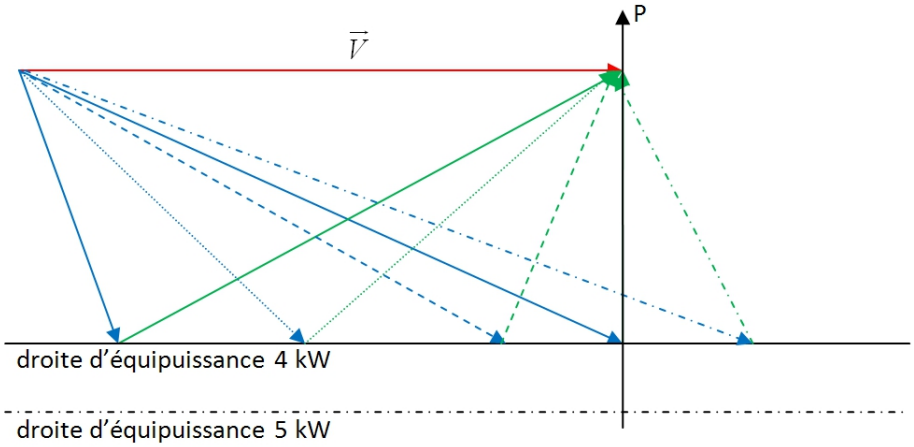


FIGURE 6.5 – Diagramme de Behn-Eschenburg pour la détermination des courbes de Mordey de l'exercice 6.1.4 , question 3.

6.1.14 corrigé de l'exercice 6.1.5, page 71

1. Facteur de puissance moyen :

$$\tan\varphi = \frac{\int \sqrt{3}\cdot U\cdot I\cdot \sin\varphi\cdot dt}{\int \sqrt{3}\cdot U\cdot I\cdot \cos\varphi\cdot dt} = \frac{16500}{13750} = 1,2 \Rightarrow \cos\varphi = 0,64$$

   L'intégrale est étendue à 24 h.
2. Énergie réactive à fournir par la méthode de Boucherot :

	Énergie active (kWh)	Énergie réactive (kvarh)
Avant	13750	16500
Après	13750	$13750 \times \tan(\arccos 0,85) = 8500$

   Il faudra donc que la machine synchrone fournisse une énergie réactive égale à :

$$16500 - 8500 = 8000\,\text{kvarh}$$

La puissance réactive du compensateur synchrone qui fonctionnera toute la journée sera donc :

$$\frac{8000}{24} = 333\,\text{kvar}$$

Puisque la puissance active absorbée est négligée, sa puissance apparente devra être : $S = 333\,\text{kVA}$

3. Appliquons à nouveau la méthode de Boucherot :

	Énergie active (kWh)	Énergie réactive (kvarh)
Avant	13750	16500
Après	$13750 + 24 \times 0,065Q$	$(13750 + 24 \times 0,065Q) \times \tan(\arccos 0,85)$

L'énergie réactive que doit fournir la machine sera : $16500 - 24Q = (13750 + 24 \times 0,065Q) \times \tan(\arccos 0,85)$.
Soit une puissance réactive de $Q = 319,6\,\text{kvar}$.
La puissance apparente de la machine sera : $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(319,6 \times 0,065)^2 + 319,6^2} \simeq 320\,\text{kVA}$.

4. Cette question se résout aisément graphiquement, moins facilement analytiquement. D'ailleurs le problème entier se prête bien à une résolution graphique à l'aide du triangle des puissances.
Sur la figure 6.6, OA représente la puissance active moyenne de l'usine $13750/24 = 573\,\text{kW}$; AC représente la puissance réactive moyenne de l'usine $16500/24 = 687\,\text{kvar}$. CD représente la puissance active absorbée par la machine synchrone, soit 22 kW.
Lorsque nous avons négligé la puissance active absorbée par le compensateur synchrone, la puissance réactive et apparente de cette machine était représentée par CB.
Lorsque nous avons tenu compte de la puissance active, la puissance apparente du compensateur synchrone était représenté par CE = 320 kVA (CE < CB).
La puissance apparente de 320 kVA de la machine est constante. Traçons la circonférence de centre C et de rayon CE = 320 kVA. Puis, du point O, menons la tangente à cette circonférence. Soit E' le point de tangence. La droite OE4 forme avec OA l'angle φ'' correspondant à $\cos\varphi'' = 0,87$ (facteur de puissance maximum). La puissance active absorbée par la machine est, dans ces conditions, mesurée par CD'. Nous mesurons : CD' = 153 kW.

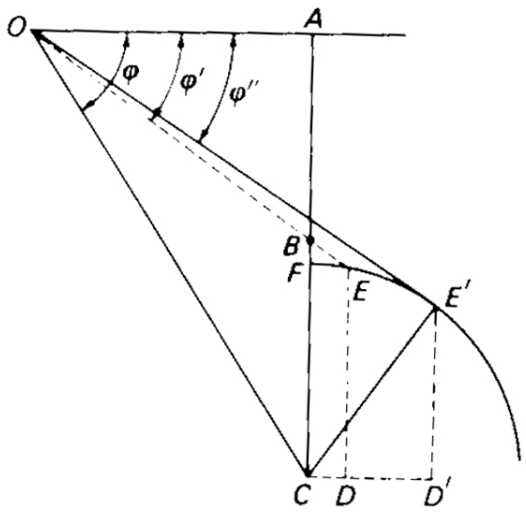


FIGURE 6.6 – Diagramme de Behn-Eschenburg pour l'exercice 6.1.5, question 4.

6.1.15 corrigé de l'exercice 6.1.6, page 72

1. 1.1. La formule de Ferraris nous donne : $N_S = \frac{f}{p} = \frac{50}{1} \times 60 = 3000$ tr/min.
   1.2. La même formule nous permet d'écrire : $p = \frac{f}{N_s} = \frac{400}{50} = 8$. L'alternateur comporte donc 8 paires de pôles, soit 16 pôles.
2. Traçons le diagramme de Behn-Eschenburg de l'alternateur, nous obtenons la figure 6.1. La résolution peut se faire graphiquement, c'est conseillé. Ou bien par les complexes, ce qui donne :

$$\underline{E} = 115\underline{/0°} + 0,75 \times 30\underline{/90° - \arccos(0,6)} \simeq 133,6\underline{/5,8°}\text{V}$$

   Ou encore par Al-Kashi :

$$E^2 = 115^2 + (0,75 \times 30)^2 - 2 \times 115 \times (0,75 \times 30) \times \cos(180° - (90° - \arccos 0,6)) \Rightarrow E \simeq 133,7\text{V}$$

3. $P = 3V'I'\cos\varphi = 6210$W.
   $P = C \times \Omega \Rightarrow C = \frac{6210}{2\pi \times 50} \simeq 19,8$Nm.
4. 4.1. $\cos\varphi = 1 \Rightarrow P = 3VI \Rightarrow I = \frac{P}{3V} = \frac{6210}{3 \times 220} \simeq 9,4$A.
   4.2. Le diagramme de Behn-Eschenburg du moteur est celui de la figure 6.8.

$$E^2 = 220^2 + (2 \times 9,44)^2 \Rightarrow E = 220,8\text{V}$$

5. $I' = 0$ et $E = 220,8$V. $P = 3VI\cos\varphi = 0 \Rightarrow \cos\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = \pm 90°$. De plus, $I \neq 0$ car $jL\omega\vec{I} = \vec{E} - \vec{V} \neq 0$.

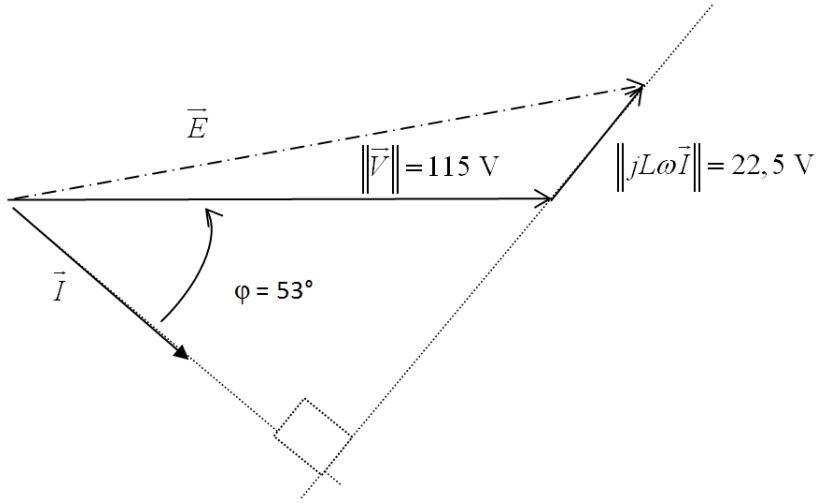


FIGURE 6.7 – Diagramme de Behn-Eschenburg pour l'exercice 6.1.6, question 2.

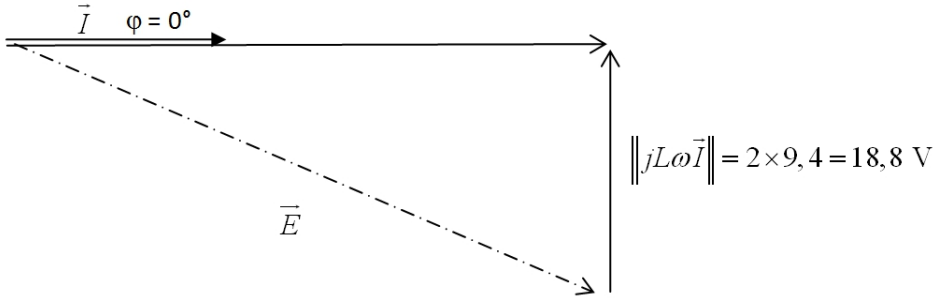


FIGURE 6.8 – Diagramme de Behn-Eschenburg pour l'exercice 6.1.6, question 4.2.

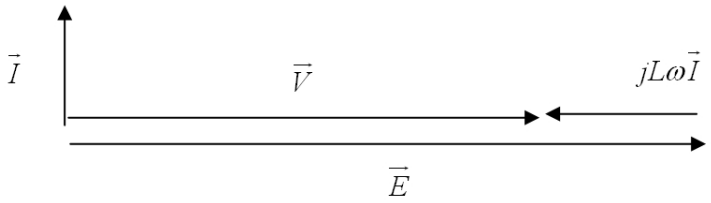


FIGURE 6.9 – Diagramme de Behn-Eschenburg pour l'exercice 6.1.6, question 5.

Le diagramme de Behn-Eschenburg est celui de la figure 6.9.
On en déduit : $L\omega I = E - V = 220,8 - 220 = 0,8 \Rightarrow I = \frac{0,8}{2} = 0,4$A. Le moteur fonctionne en compensateur synchrone et fournit donc un peu d'énergie

réactive au réseau.

6. On a choisi un moteur synchrone pour la constance de sa vitesse qui entraîne une constance de la fréquence ce que le glissement d'un moteur asynchrone ne permettrait pas.

6.1.16 corrigé de l'exercice 6.1.7, page 73

1. Le schéma équivalent de la figure 6.10 permet de dessiner le diagramme de Behn-Eschenburg de la figure 6.11.

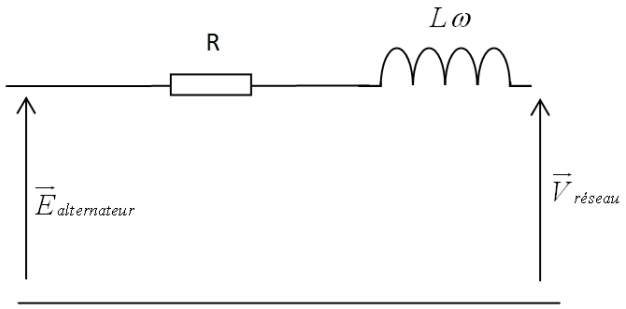


FIGURE 6.10 – Schéma équivalent pour l'exercice 6.1.7.

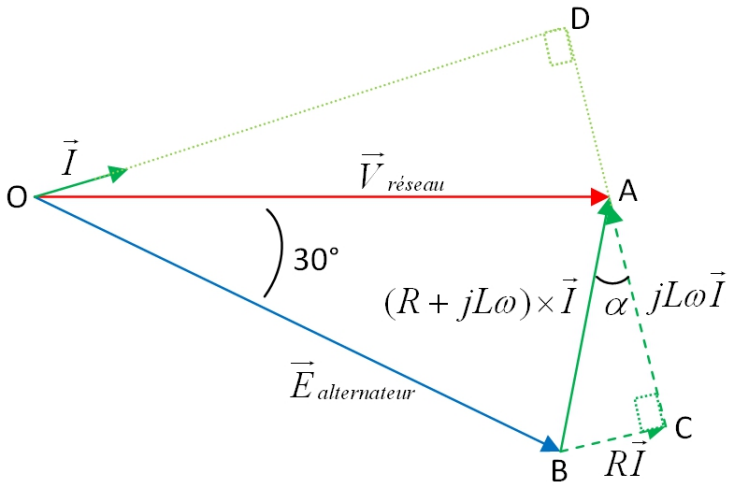


FIGURE 6.11 – Diagramme de Behn-Eschenburg pour l'exercice 6.1.7.

La figure 6.11 permet d'écrire : $\overrightarrow{E_{alternateur}} - \overrightarrow{V_{réseau}} = \left(R + jL\omega\right) \cdot \vec{I}$.
Avec : $E_{alternateur} = \frac{6615}{\sqrt{3}} \simeq 3820\,\text{V}$ et $V_{réseau} = \frac{6580}{\sqrt{3}} \simeq 3799\,\text{V}$
$\arctan \frac{R}{L\omega} = \alpha = \arctan \frac{0,5}{1,5} = 18,4\,°$
La solution peut être obtenue graphiquement ou par résolution des triangles OAB et ABC.
$AB^2 = OA^2 + OB^2 - 2 \cdot OA \cdot OB \cdot \cos 30° = \left(R^2 + (L\omega)^2\right) \cdot I^2$
Soit : $3,88897 \cdot 10^6 = 2,5 \times I^2 \Rightarrow I \simeq 1250\,\text{A}$

2. Calculons le déphasage de φ de $\vec{I}$ sur $\overrightarrow{V_{réseau}}$:
Dans le triangle OAB, on a : $\widehat{OAB} + 30° + \widehat{OBA} = 180°$

Angle plat en A : $\widehat{OAD} + \widehat{OAB} + \alpha = 180°$
On a donc : $\widehat{OAD} + \widehat{OAB} + \alpha = \widehat{OAB} + 30° + \widehat{OBA} \Rightarrow \widehat{OAD} = 30° + \widehat{OBA} - \alpha$
Dans le triangle OAD, on a :

$$\varphi + 90° + \widehat{OAD} = 180° \Rightarrow \varphi = 90° - \widehat{OAD}$$
$$\Rightarrow \varphi = (90° - 30°) - \widehat{OBA} + \alpha$$

Or : $\frac{AB}{\sin 30°} = \frac{OA}{\sin \widehat{OBA}}$ soit : $\sin \widehat{OBA} = \frac{3799}{\sqrt{3,88897 \cdot 10^6}} \times 0,5 = 0,96$
$\widehat{OBA} = 74,1°$
D'où $\varphi = 4,3°$ et $\cos\varphi \simeq 1$
L'appel de puissance est alors de : $P = 3VI\cos\varphi = \sqrt{3} \times 6580 \times 1250 \times 1 \simeq 14,3\,\text{MW}$

3. La puissance calculée ci-dessus est responsable du couple de torsion qui apparaît au niveau de l'accouplement diesel - alternateur. Le moteur diesel entraîne l'accouplement à vitesse constante N_S tandis que l'alternateur fonctionnera quelques très bref instant en moteur, essayant de faire tourner l'arbre moteur - alternateur et donc l'accouplement du nombre de degré nécessaire pour annuler le déphasage.
Le couple de torsion sera égal à :

$$C = \frac{P}{2\pi N_S} = \frac{14,3 \cdot 10^6}{2\pi \cdot \frac{60}{5}} \simeq 190\,\text{kNm}$$

Ce couple est appliqué très brutalement au niveau de l'accouplement. Au mieux, le gougeons de l'accouplement cassent au pire ce sont les arbres de l'alternateur et/ou du moteur diesel qui risquent la rupture.

6.1.17 Corrigé des questions sur le statisme

1. Lorsqu'on augmente la consigne de vitesse d'un générateur en fonctionnement isolé :

question	vrai	faux
sa fréquence augmente	×	
sa puissance active augmente		×
son facteur de puissance augmente		×

2. Lorsqu'on augmente la consigne de vitesse d'un générateur en fonctionnement parallèle :

question	vrai	faux
sa fréquence augmente		×
sa puissance active augmente	×	
son facteur de puissance augmente	×	

3. Lorsqu'on augmente la consigne de tension d'un générateur en fonctionnement isolé :

question	vrai	faux
sa fréquence augmente		×
sa puissance active augmente		×
sa puissance réactive augmente		×

4. Lorsqu'on augmente la consigne de tension d'un générateur en fonctionnement parallèle :

question	vrai	faux
sa puissance active augmente		×
son facteur de puissance baisse		×
sa puissance réactive augmente		×

5. Lorsqu'on augmente le statisme en fréquence d'un générateur en fonctionnement parallèle :

question	vrai	faux
sa puissance active augmente	×	
son facteur de puissance baisse		×
sa puissance réactive augmente		×

6. Lorsqu'on augmente le statisme en tension d'un générateur en fonctionnement parallèle :

question	vrai	faux
sa puissance active augmente		×
son facteur de puissance baisse	×	
sa puissance réactive augmente	×	

6.1.18 Corrigé de l'exercice sur le statisme 6.1.9 page 74

Hypothèses simplificatrices : on considérera dans la suite que les caractéristiques mécaniques des diesels sont des droites.

1. La plaque signalétique spécifiant un $\cos\varphi = 0,85$, l'alternateur pourra délivrer en permanence P et Q comprises dans les limites suivantes :

$$S \times 0,85 < P < S \Rightarrow 0,85\,\text{MW} < P < 1\,\text{MW}$$

$$-S \times \sin(\arccos 0,85) < Q < S \times \sin(\arccos 0,85) \Rightarrow -526,78\,\text{kVAR} < Q < 526,78\,\text{kVAR}$$

   Si le $\cos\varphi$ du réseau descendait en dessous de 0,85, le courant d'excitation dépasserait sa valeur maximale ce qui entrainerait la surcharge du rotor de l'alternateur.

2. Essai n° 1 :

   $S = \sqrt{3} \times U \times I = \sqrt{3} \times 435 \times 332 = 250,14\,\text{kVA}$
   $\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{200 \cdot 10^3}{250,14 \cdot 10^3} = 0,799$
   $Q = P \times \tan\varphi = 200 \cdot 10^3 \times \tan(\arccos 0,799) = 150,23\,\text{kVAR}$

   Essai n° 2 :

   $S = \sqrt{3} \times U \times I = \sqrt{3} \times 432 \times 1169 = 874,7\,\text{kVA}$
   $\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{700 \cdot 10^3}{250,14 \cdot 10^3} = 0,800$
   $Q = P \times \tan\varphi = 700 \cdot 10^3 \times \tan(\arccos 0,800) = 524,5\,\text{kVAR}$

3. Le statisme en fréquence correspond à la pente de la caractéristique mécanique du diesel que nous assimilerons à une droite. Avec une caractéristique mécanique ayant pour abscisse la puissance en Watt et pour ordonnée la vitesse en Hertz, la pente est donnée par :

$$\frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{59,2 - 60}{700 \cdot 10^3 - 200 \cdot 10^3} = -1,6 \times 10^{-6}\,\text{Hz W}^{-1}$$

4. Le statisme en tension correspond à la pente de la caractéristique d'excitation de l'alternateur que nous assimilerons à une droite. Avec une caractéristique d'excitation ayant pour abscisse soit le courant débité en Ampère soit la puissance réactive en VAR et pour ordonnée la tension en Volt, la pente est donnée par :

$$\frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{432 - 435}{1169 - 332} = -3,584 \times 10^{-3}\,\text{VA}^{-1}$$

   ou
   $\frac{\Delta U}{\Delta Q} = \frac{432-435}{524,5 \cdot 10^3 - 150,23 \cdot 10^3} = -8,01564 \cdot 10^{-6}\,\text{V VAR}^{-1}$

Le DA_1 étant dans les mêmes conditions de charge que lors de l'essai n° 2, on couple un second DA (DA_2) identique au premier. Les consignes de vitesse des diesels sont réglées à 60 Hz et les consignes de tension à 440 V.

5. Calculer P, Q, $\cos\varphi$, f, V et I pour les deux groupes électrogènes.
   Les DA étant identiques et le réglage de leurs statismes en fréquence et en tension étant le même, les deux alternateurs vont se répartir équitablement la fourniture de puissance active et réactive. Chacun d'eux fournira donc :
   $P_1 = P_2 = \frac{700 \cdot 10^3}{2} = 350\,\text{kW}$
   $Q_1 = Q_2 = \frac{524{,}5 \cdot 10^3}{2} = 262{,}25\,\text{kVAR}$.
   La charge étant identique, le $\cos\varphi$ demeurera le même, soit $\cos\varphi = 0{,}800$.
   À cause du statisme, la fréquence sera intermédiaire entre celle correspondant à l'essai n° 1 (200 kW) et celle correspondant à l'essai n° 2 (700 kW) :

$$\Delta f = \frac{(350-200) \times (60-59{,}2)}{(700-200)} = 0{,}24$$

   La fréquence sera donc de : $60 - 0{,}24 = 59{,}76\,\text{Hz}$.
   En toute rigueur, il faudrait calculer le courant débité par la méthodes des approximations successives. Si la tension était de 440 V, le courant débité par chaque alternateur serait de :

$$I_1 = I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos\varphi} = \frac{350 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 440 \times 0{,}8} = 574\,\text{A}$$

   Compte tenu du statisme en tension, la tension délivrée sera plus faible que 435 V de :

$$\Delta U = \frac{(332-574) \times (435-432)}{(332-1169)} = 0{,}867\,\text{V}$$

   La tension délivrée sera donc de $435 - 0{,}867 = 434{,}1\,\text{V}$. En toute rigueur, il faudrait refaire un calcul du courant débité en tenant compte de cette nouvelle valeur de la tension :

$$I_1 = I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos\varphi} = \frac{350 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 434{,}1 \times 0{,}8} = 581{,}87\,\text{A}$$

   Ce qui permet d'effectuer une nouvelle itération pour le calcul de la tension :

$$\Delta U = \frac{(332-581{,}87) \times (435-432)}{(332-1169)} = 0{,}895\,\text{V}$$

La tension délivrée sera donc de $435 - 0,895 = 434,1$ V. On aboutit à une valeur « stable », ce qui permet d'arrêter les itérations.

Étant toujours dans les conditions de l'essai n° 2 avec les deux DA en service, consigne de vitesse du DA_2 toujours réglée à 60 Hz et consignes de tension des deux alternateurs toujours réglée à 440 V, on règle la consigne du DA_1 à 60,2 Hz.

6. La puissance synchronisante échangée entre les deux alternateurs va maintenir la vitesse des deux machines à une valeur identique pour les deux. La nouvelle consigne de vitesse sur le DA_1 va faire produire plus de puissance active à celui-ci. Le réseau absorbant toujours la même puissance de 700 kW, le DA_2 va fournir un peu moins de puissance active. La caractéristique mécanique du DA_1 va translater parallèlement à elle-même vers le haut. En supposant la vitesse inchangée, écrivons l'équation de droite permettant de calculer la nouvelle puissance fournie par le DA_1 :

$$59,76 = 60,2 - 1,6 \cdot 10^{-6} \times (P_1' - 350 \cdot 10^3) \Rightarrow P_1' = \frac{0,44}{1,6 \cdot 10^{-3}} + 350 \cdot 10^3 = 625\,\text{kW}$$

Le DA_2 fournira donc $700 - 625 = 75$ kW.

Le point de fonctionnement du DA_2 va glisser sur la même caractéristique mécanique et se rapprocher de l'axe des ordonnées. La nouvelle fréquence de fonctionnement sera :

$59,76 + 1,6 \cdot 10^{-6} \times 275 \cdot 10^3 = 60,2\,\text{Hz}$

La puissance synchronisante va maintenir la vitesse des alternateurs, et donc des diesels, rigoureusement identique. On aura $f = 60,2$ Hz.

La consigne de chaque régulateur de tension n'ayant pas été modifiée, chaque DA fournit la moitié de la puissance réactive demandée par la charge, soit toujours 262,25 kVAR.

En admettant que la tension reste égale à 434 V, et que le $\cos\varphi$ reste égal à 0,8, le DA_1 débitera une intensité : $I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times U \times \cos\varphi} = \frac{625 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 434 \times 0,8} \simeq 1039$ A.

Tandis que le DA_2 débitera : $I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \times U \times \cos\varphi} = \frac{75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 440 \times 0,8} \simeq 124,7$ A.

Le déphasage du courant débité par rapport à la tension aux bornes de sortie peut être calculer approximativement en considérant que la tension est toujours de 434 V :

$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{625 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 434 \times 1039} = 0,800.$

$\cos\varphi_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 434 \times 124,7} = 0,800.$

Étant toujours dans les conditions de l'essai n° 2 avec les deux DA en service, les consignes de vitesse des diesels sont réglées à 60 Hz, la consigne de tension du DA_2 est laissée à 440 V, celle du DA_1 est réglée à 442 V.

7. Les consignes de vitesses des deux diesel étant identiques, les puissances actives fournies par les deux alternateurs seront égales à la moitié de ce qu'absorbe la charge soit : 350 kW.
   La vitesse des deux diesels sera identique et correspondant à une fréquence de 59,76 Hz, voir le calcul plus haut, question 5 page 89.
   La puissance réactive absorbée par la charge étant supposée constante, le DA_1 va fournir plus de puissance réactive pendant que le DA_2 en fournira moins. Le raisonnement à effectuer est identique à celui fait pour les puissances actives dans la question précédente.

$$442 + \frac{\Delta U}{\Delta Q} \times Q_1' = 440 + \frac{\Delta U}{\Delta Q} \times Q_1 \Rightarrow$$
$$Q_1' = \frac{(442-440)}{\frac{\Delta U}{\Delta Q}} + Q_1 = \frac{2}{8,01564 \cdot 10^{-6}} + 262,25 \cdot 10^3$$
$$= 511,76\,\text{kVAR}$$

   La charge demandant une puissance réactive constante de 524,5 kVAR, le DA_2 ne fournira plus désormais que : $524,5 - 511,76 = 12,74$ kVAR.
   La nouvelle tension de fonctionnement sera :
   $f + \frac{\Delta U}{\Delta I} \times \Delta Q$
   soit :
   $434,1 + 8,015 \cdot 10^{-6} \times (262,25 \cdot 10^3 - 12,74 \cdot 10^3) = 436,1$ V.
   Calculons les puissances apparentes fournies par chaque DA :

   — pour le DA_1 :
   $S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{(350 \cdot 10^3)^2 + (524,5 \cdot 10^3)^2} = 630\,\text{kVAR}$
   — pour le DA_2 :
   $S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{(350 \cdot 10^3)^2 + (12,74 \cdot 10^3)^2} = 350,23\,\text{kVAR}$

   On peut en déduire les intensités débitées :

   — pour le DA_1 :
   $I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3} \times U} = \frac{630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 436,1} = 834,8\,\text{A}$
   — pour le DA_2 :
   $I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} \times U} = \frac{350,23 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 436,1} = 463,67\,\text{A}$

Étant toujours dans les conditions de l'essai n° 2 avec les deux DA en service, les consignes de vitesse des diesels sont réglées à 60 Hz, les consignes de tension des alternateurs sont réglées à 440 V. On divise par deux le statisme du régulateur de fréquence.

8. La pente $\frac{\Delta f}{\Delta P}$ est divisée par deux.
   Les DA étant identiques et le réglage de leurs statismes en fréquence et en tension étant le même, les deux alternateurs vont se répartir équitablement la fourniture de puissance active et réactive. Chacun d'eux fournira donc :
   $P_1 = P_2 = \frac{700 \cdot 10^3}{2} = 350\,\text{kW}$
   $Q_1 = Q_2 = \frac{524{,}5 \cdot 10^3}{2} = 262{,}25\,\text{kVAR}$.
   La charge étant identique, le $\cos\varphi$ demeurera le même, soit $\cos\varphi = 0{,}800$.
   À cause du statisme divisé par deux, la fréquence diminuera moins que précédemment.
   Le point d'intersection de la caractéristique mécanique avec l'axe des ordonnées Of demeurera inchangé. On peut obtenir la fréquence ordonnée de ce point f_0 grâce à la caractéristique mécanique précédente, donc aux points de fonctionnement correspondant aux essais 1 et 2.

   $f_0 = 60 + 1{,}6 \cdot 10^{-6} \times 200 \cdot 10^3 = 60{,}32\,\text{Hz}$
   À partir de f_0, on peut calculer la fréquence de fonctionnement :

$$60{,}32 - \frac{1{,}6 \cdot 10^{-6}}{2} \times (350 \cdot 10^3 - 0) = 60{,}04\,\text{Hz}$$

   Le statisme en tension étant identique à la valeur précédente, on a toujours $U = 434{,}1\,\text{V}$. Les intensités débitées seront elles aussi identiques à ce qu'elles étaient, soit : $I_1 = I_2 = 581{,}87\,\text{A}$.

Étant toujours dans les conditions de l'essai n° 2 avec les deux DA en service, les consignes de vitesse des diesels sont réglées à 60 Hz, les consignes de tension des alternateurs sont réglées à 440 V. On divise par deux le statisme du régulateur de tension.

9. Le raisonnement est le même qu'à la question précédente. Les alternateurs vont se répartir équitablement P et Q demandées par la charge. Chacun d'eux fournira donc :
   $P_1 = P_2 = \frac{700 \cdot 10^3}{2} = 350\,\text{kW}$
   $Q_1 = Q_2 = \frac{524{,}5 \cdot 10^3}{2} = 262{,}25\,\text{kVAR}$.
   La charge étant identique, le $\cos\varphi$ demeurera le même, soit $\cos\varphi = 0{,}800$.

À cause du statisme divisé par deux, la tension diminuera moins que précédemment.

Le point d'intersection de la caractéristique de tension avec l'axe des ordonnées OU demeurera inchangé. On peut obtenir la tension ordonnée de ce point U_0 grâce à la caractéristique de tension précédente, donc aux points de fonctionnement correspondant aux essais 1 et 2.

$$U_0 = 435 + 8 \cdot 10^{-6} \times 150,23 \cdot 10^3 = 436,2\,\text{V}$$

$$436,2 - \frac{8 \cdot 10^{-6}}{2} \times (262,25 \cdot 10^3) = 435,15\,\text{V}$$

Les intensités débitées seront identiques :

$I_1 = I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} \times U} = \frac{437,35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 435,15} = 580,26\,\text{A}$.

Le statisme en fréquence étant identique à la valeur précédente, on a toujours $f = 59,76\,\text{Hz}$.

Calculer P, Q, $\cos\varphi$, f, V et I pour les deux groupes électrogènes.

Suite à une faiblesse mécanique du diesel, on limite la puissance du second groupe électrogène à 80% de sa puissance active nominale.

10. La caractéristique mécanique va voir sa pente augmenter de sorte qu'on ait la même baisse de fréquence lorsque la puissance active passe de 0 à 80% de la puissance nominale qu'auparavant lorsque la puissance active passait de 0 à P_{nominale}.

    Le point d'intersection de la caractéristique mécanique avec l'axe des ordonnées Of demeurera inchangé. On peut obtenir la fréquence ordonnée de ce point f_0 grâce à la caractéristique mécanique précédente, donc aux points de fonctionnement correspondant aux essais 1 et 2.

    $$f_0 = 60 + 1,6 \cdot 10^{-6} \times 200 \cdot 10^3 = 60,32\,\text{Hz}$$

    Il faut obtenir une fréquence de 59,2 Hz pour une puissance de $0,80 \times 700 \cdot 10^3$. Cela correspond à un nouveau statisme de :

    $\frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{(59,2-60,32}{0,8 \times 700 \cdot 10^3 - 0} = -2 \cdot 10^{-6}\,\text{Hz W}^{-1}$

    Le diesel n'étant responsable que de la fourniture de puissance active, il n'y a pas lieu de modifier le statisme en tension puisque l'alternateur peut continuer à fournir la même puissance réactive nominale.