

C.E.D.T LE G15

ALTERNATEUR TRIPHASE



M. Oumar DIOR

Ingénieur Electromécanicien

TABLE DES MATIERES

1. Définition.....	1
2. Constitution de l'alternateur	1
a) Le stator	1
b) Le rotor.....	1
3. Domaine d'utilisation	2
4. Fonctionnement général.....	2
5. Les essais sur l'alternateur.....	5
5.1. Essai à vide.....	5
a) Schéma de montage	5
b) Procédure	6
c) La caractéristique à vide	6
5.2. Essai en court-circuit.....	7
a) Schéma de montage	7
b) Procédure de l'essai en court-cuit	8
c) Caractéristique de court-circuit.....	9
d) Détermination de la réactance synchrone	10
5.3. Essai en charge.....	11
a) Schéma de montage	11
b) Procédure	11
c) Calculs à effectuer	12
d) Les caractéristiques de charge.....	14
e) Détermination graphique de E_v	15
6. Couplage de l'alternateur au réseau de distribution électrique.....	17
6.1. Objectif du couplage.....	17
6.2. Conditions du couplage	18
Exercices d'application.....	21

1. Définition

L'alternateur est une machine dynamique à courant alternatif synchrone qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Le mot synchrone veut dire, que la vitesse du rotor est égale à la vitesse du champ magnétique ; Dans ce cas il n'existe pas de glissement, donc la fréquence des courants rotoriques est égale à celle du champ tournant

2. Constitution de l'alternateur

L'alternateur est constitué de deux parties

a) Le stator

C'est la partie fixe de l'alternateur. Il est constitué d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier de qualité spéciale munies d'encoches.

Il comporte trois enroulements identiques constitués de spires avec des fils de section appropriées repartis de manière équilibrée dans les encoches. Ces enroulements y sont disposés de sorte que leurs axes principales soient déphasés l'un par rapport à l'autre d'un angle régulier de 120° . Ainsi les f.é.m. qui y sont induites forment un système symétrique et équilibré. Les enroulements aboutissent au niveau de plaque à bornes où ils sont couplés soit en étoile, soit en triangle pour faire adopter la tension de l'alternateur à celle du récepteur qu'il alimente ; comme c'est à leurs seins que sont induites les f.é.m., ils sont alors appelés induits de l'alternateur.

b) Le rotor

C'est la partie mobile de l'alternateur. Il comporte l'inducteur, son arbre est relié au mécanisme qui l'entraîne créant ainsi la variation du flux. Selon la forme du rotor (aimant permanent ou électro-aimant), l'alternateur est subdivisé en deux types :

▪ L'alternateur à aimant permanent

Son rotor n'a pas d'enroulement. Il est formé de pôles en aimant permanent dont le champ magnétique est constant. L'entraînement de son arbre par son mécanisme d'entraînement permet de faire varier le champ magnétique (le flux). Cette variation du flux entraîne l'induction de la f.é.m. dans l'induit qui est entièrement embrassé par le champ magnétique tournant à la vitesse du rotor.

▪ L'alternateur à électro-aimant

Son rotor comporte des encoches dans lesquels loge un enroulement, qui est connecté à une source de tension continue autonome appelée excitatrice. Cet enroulement est donc parcouru

par un courant continu, appelé courant d'excitation, dont le rôle est de créer le champ magnétique constant. Pour varier ce champ magnétique constant, il faut entraîner l'arbre du rotor par un mécanisme d'entraînement. On peut varier ce courant d'excitation donc le champ (quantité de champ) en insérant un rhéostat dans le circuit inducteur.

Ce type d'alternateur est symbolisé par les schémas de la [figure 1](#)

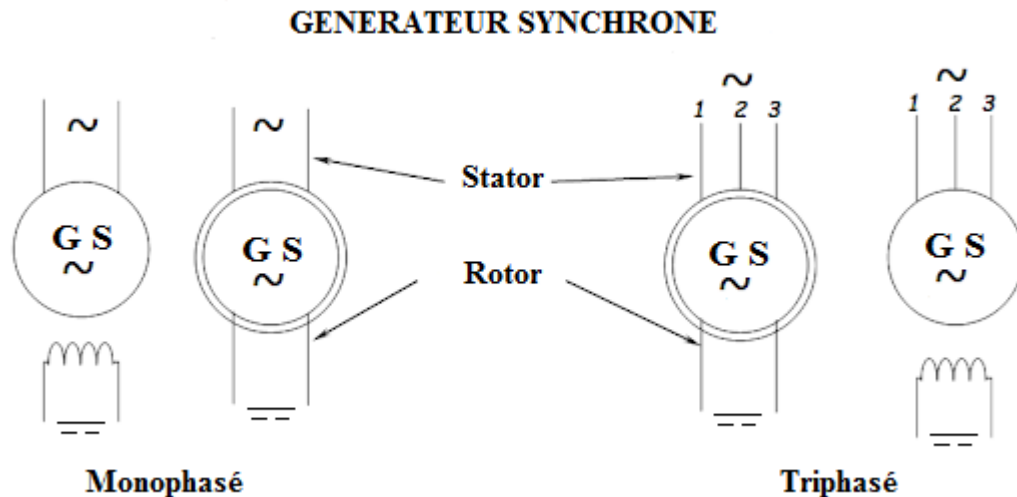


Figure 1: Générateur synchrone

3. Domaine d'utilisation

Selon sa puissance l'alternateur a 2 domaines d'utilisation

- ❖ Pour les puissances faibles et moyennes, l'alternateur est utilisé dans le système embarqués (Voiture, avion, bateau groupe électrogènes secours...)
- ❖ Pour les grandes puissances, l'alternateur est utilisé dans les centrales de production de l'énergie électrique.

4. Fonctionnement général

La présence du champ magnétique est indispensable pour le fonctionnement de l'alternateur. L'alternateur à aimant permanent possède constamment un champ magnétique constant. Par contre, pour l'alternateur à électroaimant, il faut nécessairement lui fournir un champ magnétique par l'alimentation de son enroulement inducteur à partir d'une source de tension constante et autonome appelée excitatrice.

L'enroulement inducteur traversé par le courant continu fourni par l'excitatrice, est le siège d'un champ magnétique constant.

Quel que soit le type de l'alternateur magnétisé, il est couplé à un mécanisme qui l'entraîne.

L'entraînement de l'arbre du rotor de l'alternateur provoque la variation du champ magnétique qui embrasse les enroulements de l'induit. Le champ magnétique tournant à la vitesse $n(tr/mn) = \frac{60f}{p}$

f – la fréquence du champ (Hz)

p – le nombre de paires de pôles de l'alternateur

Le champ en tournant coupe dans un 1^{er} temps le premier enroulement de l'induit. La première f.é.m. $e_1 = E_{1max} \sin(\omega t)$ est induite. Un tiers de période plus tard, c'est le 2^{ème} enroulement qui est coupé par le champ magnétique. La deuxième f.é.m.

$$e_2 = E_{2max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \text{ y est induite.}$$

Et en fin, un tiers de période plus tard après que le 2^{ème} enroulement soit coupé par le champ, c'est au tour du 3^{ème} enroulement d'être coupé par ce dernier. La 3^{ème} f.é.m.

$$e_3 = E_{3max} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \text{ est induite alors dans ce troisième enroulement.}$$

$E_{1max} = E_{2max} = E_{3max} = E_{max}$ sont les amplitudes maximales des f.e.m. respectives e_1, e_2 et e_3 .

Comme les enroulements de l'induit sont identiques $E_{1max} = E_{2max} = E_{3max} = E_{max}$; d'où la valeur efficace $E = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = 4,44Nf\Phi_{max}$

$$E = 4,44Nf\Phi_{max}$$

N – nombre de conducteur d'un enroulement

f – fréquence du champ magnétique

Φ_{max} – l'amplitude maximale du flux magnétique

En tenant compte qu'une spire est formée de deux conducteurs, alors on exprime E en fonction du nombre de spires N' d'un enroulement de l'induit

$$E = 2,22N'f\Phi_{max}$$

A cause des impuretés du signal de la f.é.m., sa correction est indispensable. C'est ainsi que la f.é.m. est corrigé en distribution et en forme par l'introduction de coefficients de correction k_D pour la distribution et k_F pour la forme.

$$E = 2,22 k_D \cdot k_F N' f \Phi_{max}$$

En posant le coefficient de kapp $K = 2,22 \cdot k_D \cdot k_F$

E s'exprime alors par la relation $E = K N' f \Phi_{max}$

NB : souvent le produit de $k_D \cdot k_F$ est supposé égal à un ($k_D \cdot k_F = 1$) ; dans ce cas le coefficient de kapp et évalué à 2,22 environ ($K \cong 2,22$).

Cette valeur efficace de la f.é.m. induite dans chaque enroulement de l'alternateur, représente la tension simple où tension de phase d'un alternateur ; elle est égal à la tension à vide E_v aux bornes de chaque enroulement de l'alternateur on note alors $E_v = K N' f \Phi_{max}$

Chaque enroulement ayant une résistance interne R et une inductance L , on peut représenter le schéma équivalent de chaque enroulement de l'alternateur par la figure2

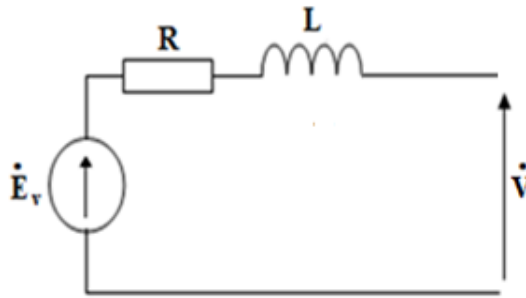


Figure 2: Schéma équivalent de l'alternateur à vide

Lorsque l'alternateur fonctionne à vide, le courant (i) qu'il fournit est nul. Dans ce cas il n'existe aucune chute de tension ; $\dot{E}_v = \dot{V}$ tension à vide aux bornes d'un enroulement de l'alternateur.

Lorsque l'alternateur fonctionne en charge, il fournit un courant à son récepteur. Il apparaît alors une chute de tension $\Delta \dot{V} = R\dot{I} + jX\dot{I}$ où $X = L\omega = L2\pi f$

X – la réactance synchrone

I – le vecteur courant

j – le vecteur unitaire de l'axe des imaginaires du plan complexe

f – la fréquence

ω – la pulsation du champ

Le schéma de la figure précédente est représenté en fonction du courant \dot{I}

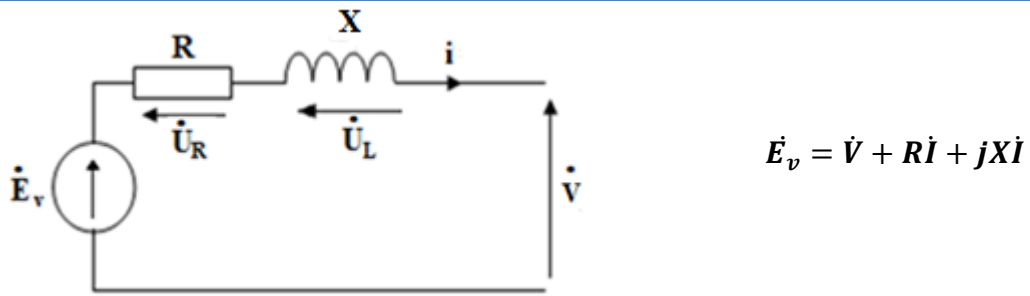


Figure 3: Schéma équivalent de l'alternateur en charge

NB : en fonction du caractère de la charge on peut avoir

- Charge résistive \dot{V} et \dot{I} en phase
- Charge inductive \dot{V} en avance de φ par rapport à \dot{I}
- Charge capacitive \dot{V} en retard de φ par rapport à \dot{I}

5. Les essais sur l'alternateur

5.1. Essai à vide

a) Schéma de montage

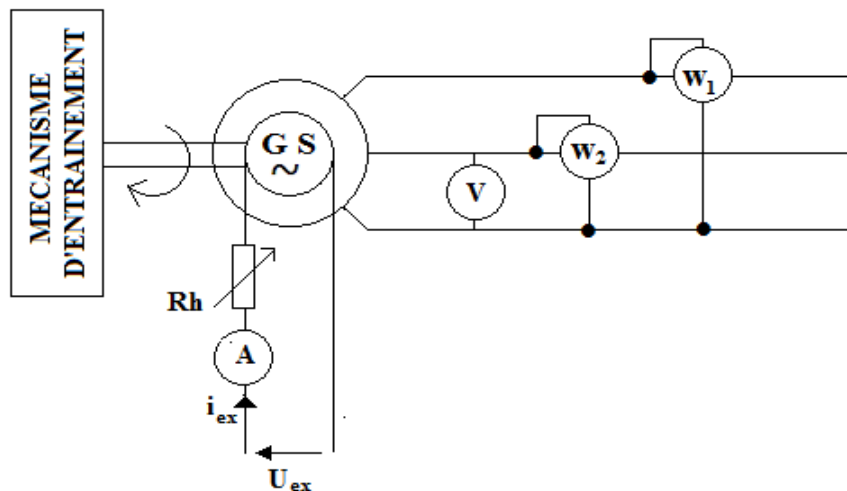


Figure 4: Schéma de montage de l'essai à vide de l'alternateur

A → Ampèremètre indiquant le courant inducteur I_{ex}

W_1 → Wattmètre 1 donnant l'indication L_{10} (lecture)

W_2 → Wattmètre 2 donnant l'indication L_{20} (lecture)

V → Voltmètre indiquant la tension de ligne à vide U_v

Rh → Rhéostat de champ permettant de varier I_{ex}

b) Procédure

L'arbre du rotor de l'alternateur couplé à son mécanisme d'entraînement et son inducteur alimenté on choisit une grande valeur de Rh permettant de donner un faible courant I_{ex} . Après l'entraînement de l'arbre de l'alternateur par le démarrage de son mécanisme d'entraînement, on diminue progressivement la valeur de Rh . A chaque valeur de Rh fixée, on relève les indications des appareils de mesure. Les valeurs relevées sont reportées sur le tableau 1 de mesure

Tableau 1: mesure de l'essai à vide de l'alternateur

Rh	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3
i_{ex}				
U_{LV}				
L_{1V}				
L_{2V}				
$P = L_{1V} + L_{2V}$				
$E_V = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$				

NB : On choisit le maximum de valeurs de Rh jusqu'à ce qu'on constate que la tension n'évolue plus.

c) La caractéristique à vide

Cette caractéristique détermine la variation de la tension de phase à vide E_v de l'alternateur en fonction de la variation du courant inducteur ou excitation i_{ex}

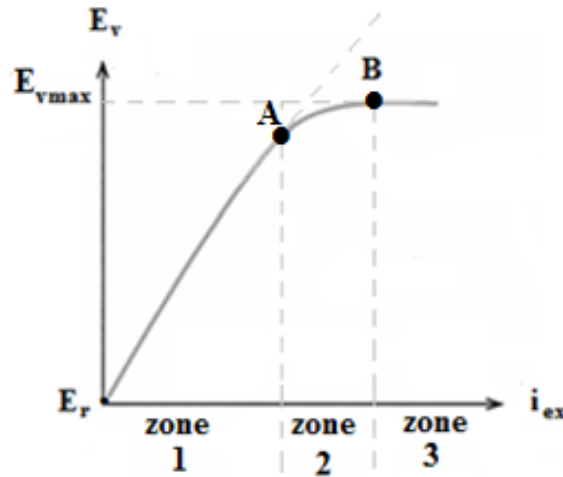


Figure 5 : Caractéristique à vide de l'alternateur

NB: La caractéristique est répartie en trois zones

La zone 1 : c'est le début de la magnétisation. Nous constatons que la caractéristique est linéaire. La tension aux bornes de l'alternateur est proportionnelle au courant inducteur.

La zone 2 : Cette zone correspond à l'évolution (croissance) exponentielle de la caractéristique ; c'est la période de la forte magnétisation.

La zone 3 : La caractéristique devient constante. Cette zone correspond à la saturation. La tension devient maximale et constante. Il ne faut plus continuer l'excitation, si non on va aboutir à la démagnétisation

5.2. Essai en court-circuit

a) Schéma de montage

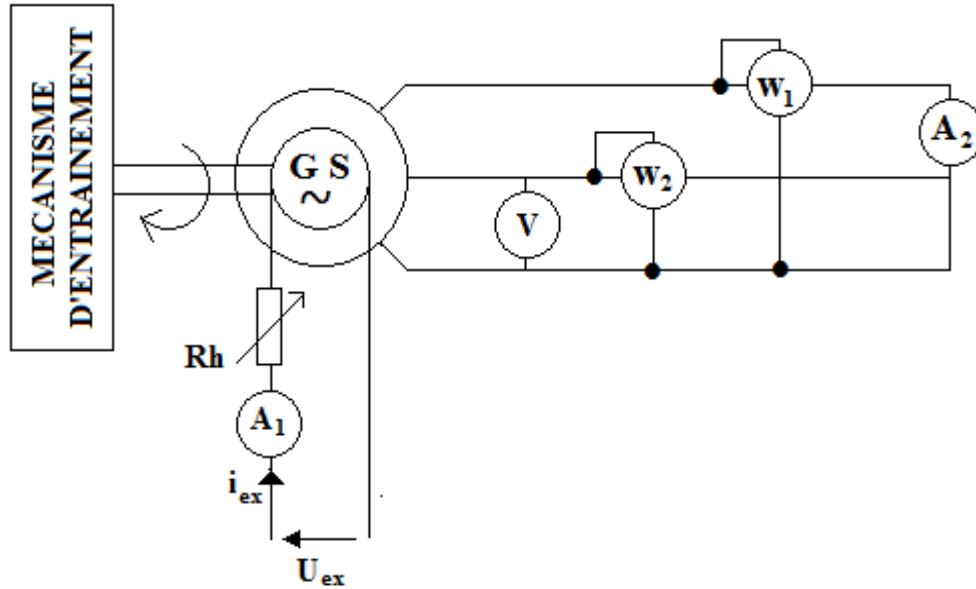


Figure 6 : Schéma de montage de l'essai en court-circuit de l'alternateur

- $A_1 \rightarrow$ Ampèremètre indiquant le courant inducteur I_{ex}
 $A_2 \rightarrow$ Ampèremètre indiquant le courant de court-circuit I_{cc}
 $W_1 \rightarrow$ Wattmètre 1 donnant une lecture L_{1cc}
 $W_2 \rightarrow$ Wattmètre 2 donnant une lecture L_{2cc}
 $V \rightarrow$ Voltmètre indiquant la tension de ligne en court-circuit U_{cc}
 $Rh \rightarrow$ Rhéostat de champ permettant de varier I_{ex}

b) Procédure de l'essai en court-cuit

Au début de la mesure R_h est maintenue à sa valeur maximale de sorte I_{ex} soit nul.

Après le démarrage du mécanisme d'entraînement de l'alternateur, on diminue la valeur de R_h pour obtenir un courant inducteur.

Au fur et à mesure on augmente progressivement le courant inducteur i_{ex} par la diminution de la valeur de R_h . Pour chaque valeur de R_h fixée, on relève les indications des appareils de mesure, que l'on place sur le tableau 2 de mesure

Après on débranche les appareils de mesure et mesurer à chaud avec un ohmmètre la résistance R' entre deux phases du stator

NB : Durant toute la mesure, veiller surtout sur l'indication de l'ampèremètre A_2 pour que le courant de court-circuit ne dépasse pas la valeur tolérée indiquée sur la plaque de l'alternateur.

Tableau 2 : mesure de l'essai en court-circuit

Rh	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3
i_{ex}				
I_{cc}				
U_{Lcc}				
L_{1cc}				
L_{2cc}				
$P_{cc} = L_{1cc} + L_{2cc}$				
$E_v = \frac{U_{cc}}{\sqrt{3}}$				

On calcule

$$P_{cc} = L_{1cc} + L_{2cc}$$

$$Q_{cc} = \sqrt{3}(L_{1cc} - L_{2cc})$$

$$Z_{cc} = \frac{E_v}{I_{cc}}$$

c) Caractéristique de court-circuit

Cette caractéristique représente la variation du courant de court-circuit I_{cc} en fonction du courant inducteur ou excitation i_{ex} . Cette caractéristique donne l'allure de la figure 7

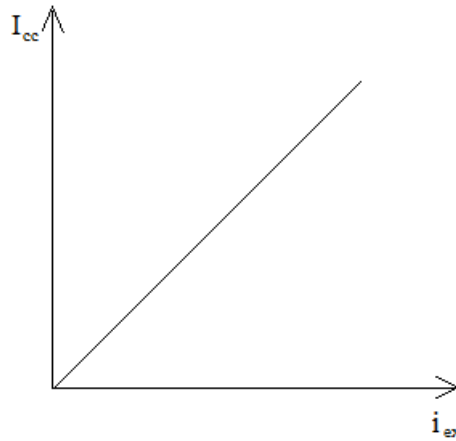


Figure 7 : caractéristique de court-circuit de l'alternateur

On constate que le courant de court-circuit est proportionnel à la magnétisation (i_{ex}). C'est pour cette raison qu'il ne faut jamais continuer la magnétisation de l'alternateur après sa saturation.

d) Détermination de la réactance synchrone

L'objectif principal de l'essai en court-circuit est de nous permettre de déterminer la réactance synchrone $X = L\omega$ (Ω) de l'alternateur.

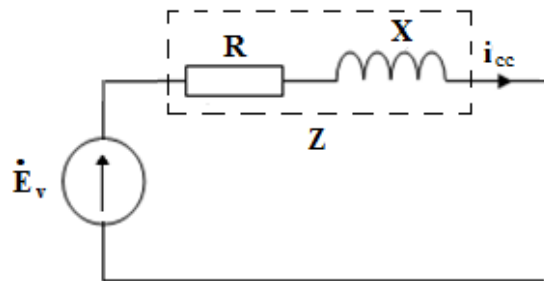


Figure 8 : Schéma équivalent permettant de calculer la réactance synchrone

$P_{cc} = 3R(I_{cc})^2$ Où I_{cc} courant de court-circuit mesuré, P_{cc} la puissance en court-circuit déterminée à partir des lectures de L_{1cc} et L_{2cc} des wattmètres W_1 et W_2 , R la résistance d'un enroulement déterminé de la manière suivante $R = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2}$

On détermine ensuite l'impédance d'un enroulement Z_{cc} par la relation suivante :

$$Z_{cc} = \frac{E_v}{I_{cc}} \quad \text{avec} \quad E_v = \frac{U_{Lcc}}{\sqrt{3}}$$

U_{Lcc} Mesurée lors de l'essai en court-circuit on en déduit ensuite la réactance synchrone X par

la relation $X = L\omega = \sqrt{Z_{cc}^2 - R^2}$

5.3. Essai en charge

a) Schéma de montage

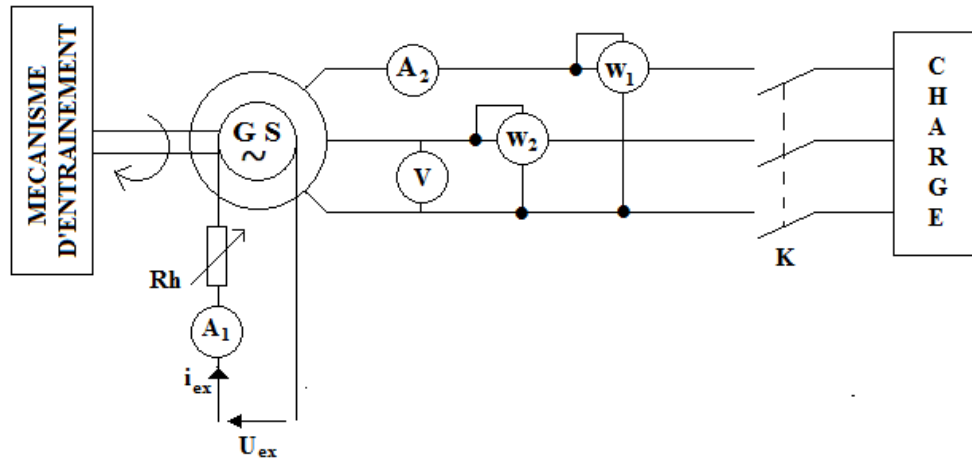


Figure 9 : Schéma de montage de l'essai en charge

$A_1 \rightarrow$ Ampèremètre indiquant le courant inducteur I_{ex}

$A_2 \rightarrow$ Ampèremètre indiquant le courant de charge I

$W_1 \rightarrow$ Wattmètre 1 donnant une lecture L_1

$W_2 \rightarrow$ Wattmètre 2 donnant une lecture L_2

$V \rightarrow$ Voltmètre indiquant la tension de ligne en charge U

$Rh \rightarrow$ Rhéostat de champ permettant de varier I_{ex}

b) Procédure

On fait fonctionner l'alternateur à vide jusqu'à l'obtention de E_v et on maintient i_{ex} constant. Ensuite on ferme K pour brancher la charge, on relève les indications des appareils de mesure. On ouvre pour remplacer la charge. Cette opération est répétée autant de fois qu'il existe de charge de caractères différents. Après, on débranche les appareils de mesure et ensuite on mesure à chaud avec un ohmmètre la résistance R' entre deux phases du stator.

Pour chaque nature de charge on dresse un tableau de mesure comme indiqué sur le [tableau 3](#) suivant :

Tableau 3: mesure de l'essai en charge

Charge (rest, cap, ind)	1 ^{er} niveau de la charge	2 ^{ème} niveau de la charge	3 ^{ème} niveau de la charge
i_{ex}			
I			
L_1			
L_2			
U_L			

c) Calculs à effectuer

❖ Relation entre les grandeurs de ligne et de phase

$U_L \rightarrow$ Tension de ligne

$V \rightarrow$ Tension de phase

$I_L \rightarrow$ Courant de ligne

$I_{ph} \rightarrow$ Courant de phase

▪ Pour le couplage étoile on a :

$$U_L = \sqrt{3}V \quad ; \quad I_L = I_{ph} = I$$

▪ Pour le couplage triangle on a :

$$U_L = V \quad ; \quad I_L = \sqrt{3}I_{ph}$$

❖ Calcul des puissances

▪ Puissance active utile

$$P_u = L_1 + L_2 \quad \text{en watt (W)}$$

▪ Puissance réactive

$$Q = \sqrt{3} (L_1 - L_2) \quad \text{en volt ampère réactif (VAR)}$$

▪ Puissance apparente

$$S = \sqrt{P_u^2 + Q^2} \quad \text{en volt ampère (VA)}$$

❖ **Le facteur de puissance**

$P_u = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi = L_1 + L_2$ on en déduit le facteur de puissance $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{P_u}{\sqrt{3} U_L I_L}$$

❖ **Les pertes électriques dans l'induit $\Delta P_{el\ ind}$**

$\Delta P_{el\ ind} = 3R(I_{ph})^2$ où $R = \frac{R'}{2}$ la résistance d'un enroulement du stator

$$D'autrepart \Delta P_{el\ ind} = \frac{3}{2} R' (I_{ph})^2$$

On rappelle que R' est la résistance à chaud mesurée entre deux enroulements du stator.

❖ **La somme des pertes magnétique et mécanique ΔP_{mm}**

On rappelle que la puissance à vide P_0 sert à couvrir ces pertes ΔP_{mm} donc $\Delta P_{mm} = P_0$

❖ **Les pertes électriques dans l'inducteur $\Delta P_{el\ ex}$**

$$\Delta P_{el\ ex} = U_{ex} I_{ex} = R_{ex} (I_{ex})^2$$

$U_{ex} \rightarrow$ la tension d'excitation de la source autonome

$I_{ex} \rightarrow$ le courant d'excitation ou inducteur au régime permanent

$R_{ex} \rightarrow$ la résistance de l'enroulement inducteur mesurée à chaud par un ohmètre

❖ **Le rendement**

▪ **Pour un alternateur à électro-aimant**

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \Delta P_{el\ in} + \Delta P_{el\ ex} + \Delta P_{mm}}$$

▪ **Pour un alternateur à aimant permanent**

L'alternateur à aimant permanent n'ayant pas d'enroulement inducteur, ne possède pas de pertes électriques inducteurs $\Delta P_{el\ ex} = 0$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \Delta P_{el\ in} + \Delta P_{mm}}$$

d) Les caractéristiques de charge

Ces caractéristiques définissent la variation de la tension aux bornes de l'alternateur par phase en fonction de la variation de la charge (courant de charge I). $V = f(I)$

$$V = E_V - \Delta V \quad \text{Or} \quad \Delta V = RI \cos \varphi \pm XI \sin \varphi$$

$E_V \rightarrow$ La tension de phase à vide

$V \rightarrow$ la tension de phase en charge

$\Delta V \rightarrow$ la chute de tension

Le signe $+$ est appliqué lorsque la charge est inductive dans ce cas $\varphi > 0$

Le signe $-$ est appliqué lorsque la charge est capacitive dans ce cas $\varphi < 0$

Selon le caractère de la charge ces caractéristiques diffèrent par la chute de tension obtenue.

Ainsi :

■ Pour une charge résistive

Si la charge est résistive, le facteur de puissance $\cos \varphi = 1$ car le déphasage φ entre la tension V et le courant I est nul, et $\sin \varphi = 0$

$$\Delta U = RI \Rightarrow V = E_V - RI$$

■ Pour une charge inductive

Le déphasage φ entre la tension \vec{V} et le courant \vec{I} est positive ($\varphi > 0$) et $\sin \varphi > 0$

$$\Delta V = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi \Rightarrow V = E_V - \Delta V$$

■ Pour une charge capacitive

Le déphasage φ entre la tension \vec{V} et le courant \vec{I} est négative ($\varphi < 0$) et $\sin \varphi < 0$

$$\Delta V = RI \cos \varphi - XI \sin \varphi \Rightarrow V = E_V - \Delta V$$

En fonction du caractère de la charge, les caractéristiques de la charge de l'alternateur sont représentées sur la [figure 10](#):

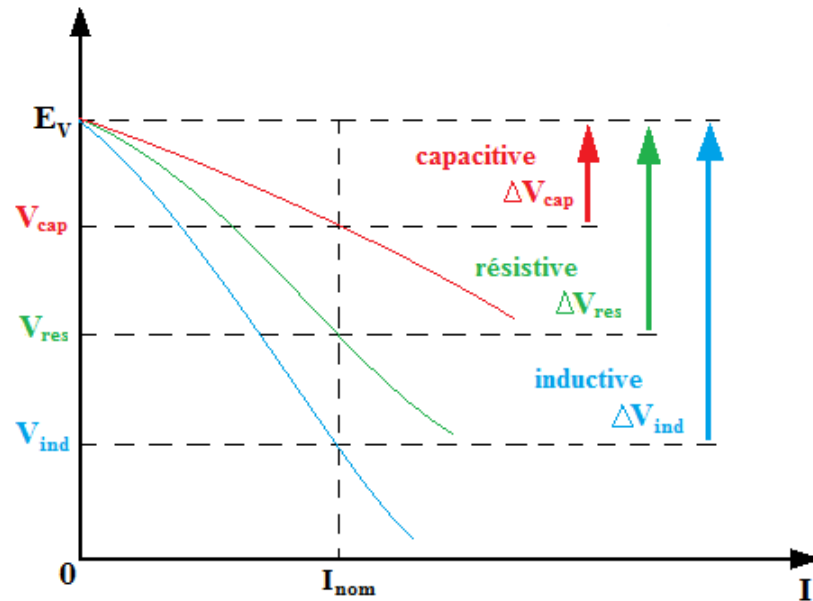


Figure 10 : les caractéristiques de charge de l'alternateur

NB : Avec ces caractéristiques nous constatons, que la charge inductive à la plus grande chute de tension et de la charge capacitive en présente moins.

C'est pour cette raison qu'on utilise des batteries condensateurs dans les installations électriques pour améliorer le facteur de puissance, c.à.d. diminué le déphasage entre le vecteur courant et le vecteur tension de l'installation.

Un facteur de puissance amélioré a des avantages comme : un meilleur rendement et une facturation moins élevée.

Pour une charge inductive, la chute de tension est beaucoup plus importante donc la tension en charge V est plus faible, entraînant un faible rendement.

e) Détermination graphique de E_v

La représentation vectorielle autrement dit le diagramme de Behn-Eschenburg ou diagramme synchrone est le diagramme de Fresnel relatif au modèle équivalent de l'enroulement du stator de la figure 3.

$$\vec{E}_v = \vec{V} + \vec{U}_R + \vec{U}_L = \vec{V} + R\vec{I} + jX\vec{I}$$

$$\vec{E}_v = \vec{V} + R\vec{I} + jX\vec{I}$$

En fonction du caractère de charge, il existe trois cas possible.

▪ 1^{er} cas : Charge résistive

Il n'existe aucun déphasage φ entre le vecteur tension \vec{V} et celui du courant \vec{I} : dans ce cas $\varphi = 0$

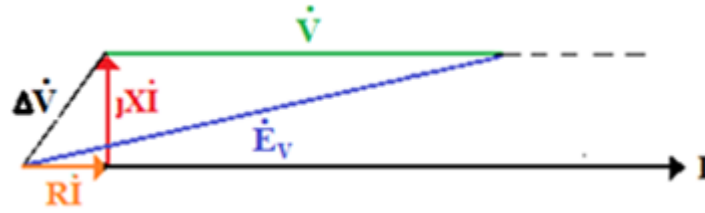


Figure 11 : le diagramme vectoriel d'une charge résistive

$$E_v e^{j0} = V e^{j\varphi} + R I e^{j0} + e^{j\frac{\pi}{2}} X I e^{j0}$$

$$E_v = V \left(\underbrace{\cos 0}_1 + j \underbrace{\sin 0}_0 \right) + R I + X I \left(\underbrace{\cos \left(\frac{\pi}{2} + 0 \right)}_0 + j \underbrace{\sin \left(\frac{\pi}{2} + 0 \right)}_1 \right)$$

$$E_v = R I + V + j(X I)$$

$$E_v = \sqrt{(R I + V)^2 + (X I)^2}$$

▪ 2^{ème} cas Charge inductive

Le déphasage φ entre le vecteur tension \vec{V} et celui du courant \vec{I} est $\varphi > 0$

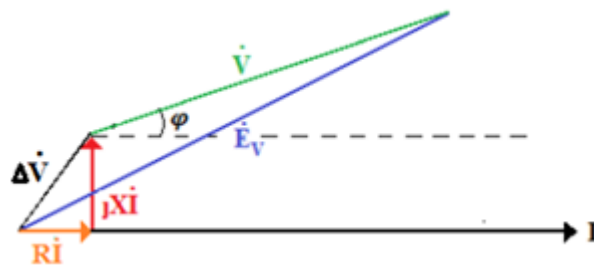


Figure 12 : le diagramme vectoriel d'une charge inductive

$$E_v e^{j0} = V e^{j\varphi} + R I e^{j0} + e^{j\frac{\pi}{2}} X I e^{j0}$$

$$E_v = V (\cos \varphi + j \sin \varphi) + R I + X I \left(\underbrace{\cos \left(\frac{\pi}{2} + 0 \right)}_0 + j \underbrace{\sin \left(\frac{\pi}{2} + 0 \right)}_1 \right)$$

$$E_v = R I + V \cos \varphi + j(X I + V \sin \varphi)$$

$$E_v = \sqrt{(R I + V \cos \varphi)^2 + (X I + V \sin \varphi)^2}$$

3^{ème} cas Charge capacitive

Le déphasage φ entre le vecteur tension \dot{V} et celui du courant \dot{I} est $\varphi < 0$

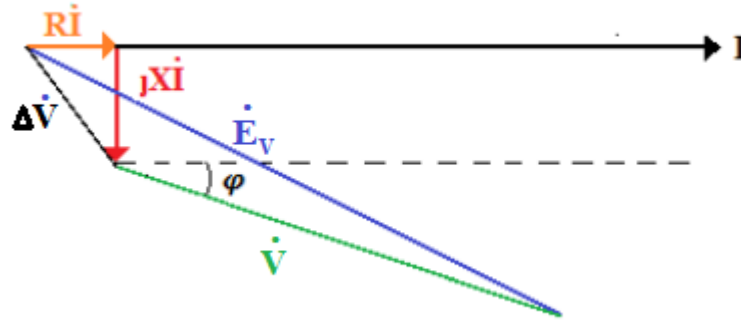


Figure 13 : le diagramme vectoriel d'une charge capacitive

$$E_v e^{j0} = V e^{-j\varphi} + R I e^{j0} + e^{-j\frac{\pi}{2}} X I e^{j0}$$

$$E_v = V(\cos\varphi - j\sin\varphi) + RI + XI \left(\underbrace{\cos\left(\frac{\pi}{2} + 0\right)}_0 - j \underbrace{\sin\left(\frac{\pi}{2} + 0\right)}_1 \right)$$

$$E_v = RI + V\cos\varphi - j(XI + V\sin\varphi)$$

$$E_v = \sqrt{(RI + V\cos\varphi)^2 - (XI + V\sin\varphi)^2}$$

6. Couplage de l'alternateur au réseau de distribution électrique

6.1. Objectif du couplage

Le couplage de l'alternateur au réseau est nécessaire que lorsque la puissance fournie par les autres alternateurs connectés au réseau n'est pas suffisante pour l'alimentation de tous les récepteurs. Ce manque de puissance est surtout observé aux heures de pointes. Comme par ailleurs il n'est pas rentable de faire fonctionner tous les alternateurs à tout moment et à tout instant, aux heures où la consommation exigée par les récepteurs n'est pas très élevée, on fait un délestage de certains alternateurs. Seulement aux heures où la consommation est très élevée, il faut remettre en fonction les alternateurs mis à l'arrêt aux heures de faible consommation, sans pour autant perturber l'approvisionnement de l'énergie électrique.

C'est cette action qui permet de faire fonctionner des alternateurs mise hors service, qu'on appelle couplage de l'alternateur au réseau.

Ainsi plusieurs alternateurs débitent à la foi au réseau. Cela est encore appelé fonctionnement en parallèle de plusieurs alternateurs.

La mise en fonctionnement parallèle doit être sécurisée, sinon on va assister à des incidents pouvant aboutir à la destruction de toutes les installations électriques.

Les mesures de sécurité prises lors du couplage d'un alternateur au réseau sont appelés les conditions de couplage, qu'il faut impérativement respecter.

6.2. Conditions du couplage

Le réseau fonctionne avec certains paramètres normalisés à savoir :

- La tension (ligne et phase)
- La fréquence
- Les phases
- Le neutre

L'alternateur qui doit être couplé, doit avoir les mêmes paramètres. Autrement dit cet alternateur doit avoir la même fréquence de réseau, la même tension (ligne et phase) et au moment du couplage on doit respecter l'ordre des phases du réseau et de l'alternateur. Pour une interprétation physique on peut dire :

- L'amplitude de la tension du réseau doit être égale à celle que l'alternateur qui doit être couplé fournit
- La pulsation de la tension du réseau doit être égale à celle de la tension fournie par l'alternateur à coupler
- La phase à l'origine de la tension du réseau doit être égale à celle de la tension fournie par l'alternateur à coupler.

Les conditions de couplage sont représentées par le schéma de la figure 14

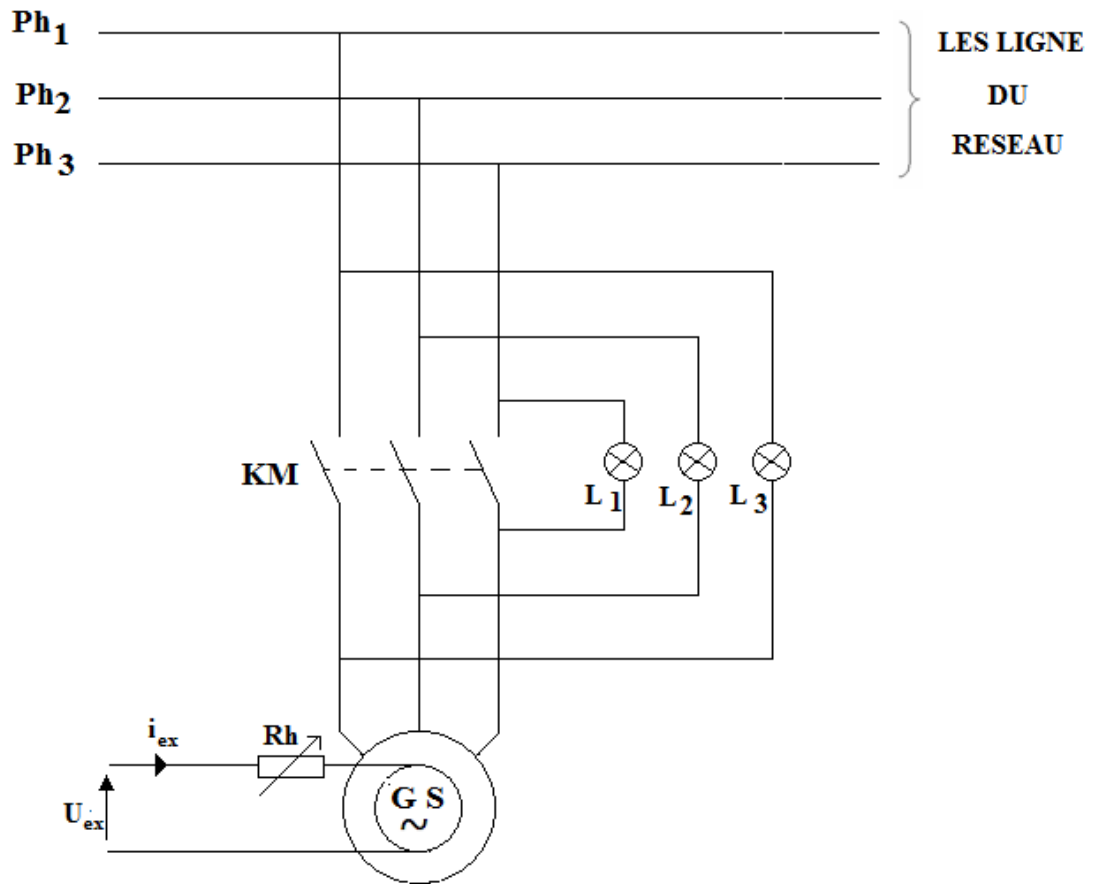


Figure 14: Schéma de couplage de l'alternateur au réseau

Dans un 1^{er} temps la fréquence du réseau doit être égale à celle de l'alternateur.

Dans un 2^{ème} temps l'amplitude de la tension de l'alternateur doit égaler celle du réseau par le moins de la régulation du courant inducteur.

Et en fin dans un 3^{ème} temps, on doit respecter l'ordre des phases de l'alternateur à celui du réseau ; dans ce cas la phase à l'origine de la tension de l'alternateur doit être égale à celle de la tension du réseau.

Les lampes de la figure 14 appelée lampes de synchronisation sont utilisées pour veiller à la synchronisation de l'alternateur au réseau. Ce principe est utilisé en laboratoire pour les alternateurs de faibles puissances. Aux bornes de chaque lampe est appliquée une tension $\Delta U = U_{res} - U_{alt}$, qui si $f_{res} \neq f_{alt}$ à une fréquence $\Delta f = f_{res} - f_{alt}$; dans ce cas les lampes s'allument. Si $f_{res} = f_{alt}$ la tension ΔU s'annule et les lampes s'éteignent. La synchronisation est alors parfaite et le couplage de l'alternateur au réseau peut être effectué, car les vecteurs des tensions du réseau et de l'alternateur sont en phase et leurs fréquences égales.

La synchronisation des alternateurs de grandes puissances est faite en utilisant des synchrosopes fonctionnant sur la base de la rotation magnétique.

Les aiguilles de ces synchrosopes dévient proportionnellement à la différence des fréquences du réseau et de l'alternateur à coupler. Tant que cette différence

$\Delta f = f_{res} - f_{alt}$, existe l'aiguille du synchroscope dévie.

Lorsque $f_{res} = f_{alt}$ c.à.d. $\Delta f = 0$, l'aiguille du synchroscope se stabilise à zéro. En ce moment précis, il faut coupler l'alternateur au réseau.

NB : Dans les centrales électriques on utilise des synchronisateurs automatiques en présence d'un personnel spécialisé

M. DIOR

Exercices d'applications

Exercice 1:

Une machine synchrone triphasée, à 6 pôles par phase, est prévue pour fonctionner sur un réseau : 220 / 380V ; 50Hz

Un essai à vide à 50Hz de cette machine a donné les valeurs suivantes :

j(A)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
E composée(V)	0	136	262	349	411	465	504	534	563	588	611	650

La résistance du stator a été mesurée entre deux bornes du stator et a donné $R_m = 1,4\Omega$.

Un essai en débit réactif a donné : $J = 35\text{ A}$, $I = 20\text{ A}$, $U = 291\text{ V}$.

- 1- A quelle vitesse, doit-on entraîner cette machine pour que la fréquence soit de 50 Hz.
- 2- Déterminer la résistance R et la réactance synchrone X_s
- 3- La machine est utilisée en alternateur débitant sur le réseau. Elle débite son courant nominal 20 A avec le meilleur facteur de puissance possible. Déterminer le courant d'excitation correspondant à ce point de fonctionnement.
- 4- On utilise maintenant la machine synchrone en compensatrice synchrone. Une installation absorbe une puissance $P_2 = 10\text{ kW}$ avec un $\cos\phi = 0,7$ et on souhaite relever le facteur de puissance à 1. Déterminer alors le courant d'excitation.

Exercice 2:

Sur la plaque signalétique d'une machine synchrone triphasée, on lit :

Tension d'un enroulement statorique : 380V, fréquence 50 Hz, $I = 20\text{ A}$, $n_s = 1000\text{tr/mn}$.

On a effectué les essais de cette machine couplée en triangle.

- Essai à vide

$I_e(\text{A})$	0.5	1	2	3.5	4.5	7	8	10	15
$E_0(\text{V})$	82	165	305	408	445	495	508	529	554

- Essai en débit réactif :

En faisant débiter le stator sur une inductance pure on a relevé : $I_e = 7\text{ A}$; $I = 30\text{ A}$ et $U = 250\text{ V}$

- Mesure de la résistance statorique entre deux bornes : $R_m = 0,8\Omega$

1- Questions préliminaires.

- a) Déterminer le nombre de pôles par phase de cette machine.
- b) Calculer la puissance apparente de cette machine.

c) Calculer la résistance R du schéma équivalent par phase.

d) Déterminer l'impédance de Behn-Eschenburg $L\omega$ de cette machine.

2-Cette machine est accrochée sur le réseau $3 \times 380V$ et est entraînée par une éolienne. On veut faire débiter à cette machine sa puissance nominale avec le meilleur facteur de puissance possible. Déterminer le courant d'excitation nécessaire.

3- Cette machine toujours accrochée sur le réseau $3 \times 380V$ et toujours entraînée par son éolienne, fournit au réseau une puissance active de $18 kW$ et débite des courants statoriques d'intensité $30 A$.

a- Déterminer la puissance réactive absorbée par la machine synchrone si son comportement est inductif.

b- En déduire la valeur de la f.é.m. de la machine et de son courant d'excitation.

c- En considérant que les pertes constantes de la machine synchrone sont de $800W$, calculer les pertes joules, la puissance sur l'arbre de la machine et le couple fournit par l'éolienne.

Exercice 3:

Un alternateur triphasé dont les enroulements de stator sont couplés en étoile, fournit en charge nominale, un courant $I = 200 A$ sous une tension entre phases $U = 5KV$ lorsque la charge est inductive et de facteur de puissance est égal à 0.87 . La résistance d'un enroulement statorique vaut $0,20\Omega$. La vitesse de rotation de la roue polaire est $n_s = 750tr/min$.

Les tensions produites ont pour fréquence $f = 50 Hz$. L'ensemble des pertes constantes et par effet Joule dans le rotor atteint $55 kW$. Un essai à vide, à la fréquence de rotation nominale, a donné les résultats suivants pour lesquels I_e est l'intensité du courant d'excitation et E_0 la valeur efficace de la tension entre phases.

$j(A)$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$E_0 (V)$	0	1050	2100	3150	4200	5200	5950	6550	7000	7300	7500

Un essai en court-circuit a donné, pour un courant d'excitation d'intensité $I_e = 40A$, un courant dans les enroulements du stator $I_{cc} = 2,5kA$.

1-Quel est le nombre de pôles du rotor

2- Calculer la réactance synchrone X_s de l'alternateur lorsqu'il n'est pas saturé

On supposera X constante pour la suite.

3- En déduire la f.e.m. synchrone E au point de fonctionnement nominal.

4-Calculer la puissance nominale fournie par l'alternateur et le rendement au point de fonctionnement nominal.

Exercice 4 :

La caractéristique à vide $E = f(I_e)$ d'un alternateur triphasé tournant 1500 tr/min. peut être assimilée à une droite passant par l'origine et par le point de coordonnées $I_e = 2,0 \text{ A}$ et $E = 100 \text{ V}$. Cet alternateur est couplé en étoile et on maintient la tension entre deux bornes du stator à 400 V par action sur l'intensité I_e . La fréquence des grandeurs statoriques est 50 Hz . Le bobinage statorique comporte 1200 conducteurs au total. La résistance d'un enroulement statorique est $0,30\Omega$ et la réactance synchrone, supposée constante est égale à $5,0\Omega$. Le coefficient de Kapp de cet alternateur vaut 2,13.

- 1- Quel est le nombre de pôles de cet alternateur.
- 2- Quelle est l'intensité I_e du courant d'excitation lorsque l'alternateur est à vide.
- 3- Calculer le flux maximal à travers une spire du stator.
- 4- A vide, l'alternateur reçoit une puissance mécanique $P_0 = 200 \text{ W}$. Sachant qu'il est excité de manière indépendante, En quel type de puissance va se transformer P_0 à quel(s) type(s) de perte(s) va-t-il correspondre.
- 5- L'alternateur débite maintenant un courant d'intensité 15 A dans une charge inductive de facteur de puissance 0,85.
 - a) Calculer quelle doit être la nouvelle valeur de E , puis celle de I_e .
 - b) Calculer le rendement sachant que la roue polaire a une résistance $R = 2,4\Omega$