Machine Synchrone

I - Introduction :

1) Définition :

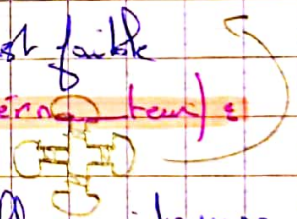
Une machine synchrone est une machine à CA dont laquelle la fréquence de la tension induite et la vitesse sont dans un rapport constant

2) constitution :

- Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone
- Le rotor est muni d'un enroulement monophasé excité en c.c (courant -)
  - deux type de rotors :
    - Les machines à rotor lisse 

un nombre de pôles faibles (2 ou 4)
La vitesse relativement élevé
Ces machine sont accouplées à des turbines à vapeur ou à gaz (turboalternateurs) ou des turbomoteurs.

- Les machines à pôles saillants :

Le nombre de pôles est grand (> 4) donc La vitesse est faible 

II - Fonctionnement en mode générateur (alternateur) :

1) Principe de fonctionnement

un électroaimant tourne en regard d'une spire, le flux qui traverse celle-ci est alternatif.

donc ⇒ f.e.m ; $e = -\frac{d\phi}{dt}$ est induite

⇒ $f = p\,n$ ($p = 1$) (une spire)

- Si le rotor est multipolaire ⇒ $f = p \cdot n$ ← (tr/s)

⇔ $2\pi f = p \times 2\pi \cdot n$ ⇒ $\omega = p \cdot \Omega$

ω : rad/s

2) f.e.m théorique

- On suppose que tout les f.e.m dans les conducteurs sont en phase donc ils s'ajoutant arithmétiquement

Scanné avec CamScanner

+ On suppose que les f.e.m sont sinusoïdale
+ On note par :

N : nombre de conducteurs
ϕ : flux sous un pôle
T : période ; f : fréquence

Pour une demi période $T/2$; les $\frac{N}{2}$ spires embrassent un flux qui varie entre $+\phi$ et $-\phi$ soit $(\Delta\phi = 2\phi)$

donc $E_{moy} = \frac{N/2 \; 2\phi}{T/2} \leftarrow \Delta\phi \; = \frac{2N\phi}{T}$

(N/2 : Nbre spire ; T/2 ← Δt)

$E_{moy} = 2Nf\phi$

+ La valeur efficace : $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$

$E_{moy} = \frac{2}{\pi} E_m$

$E = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} E_{moy}$

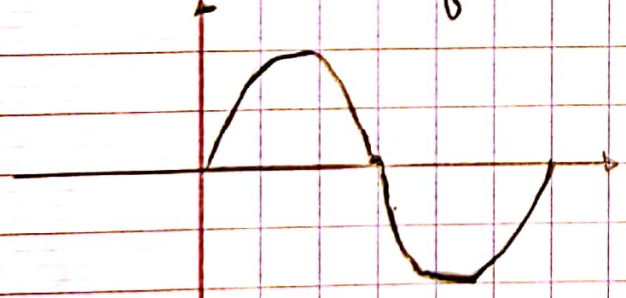
$E = 1,11 \; E_{moy}$

$$E = 2,22 \cdot N \cdot f \cdot \phi$$

(E : V ; f : Hz ; φ : wb)

3) f.e.m réelle :

+ Facteur de forme :



L'allure n'est pas parfaitement sinusoïdale
Donc le rapport $\frac{E}{E_{moy}} \neq 1,11$ mais toujours supérieur à 1

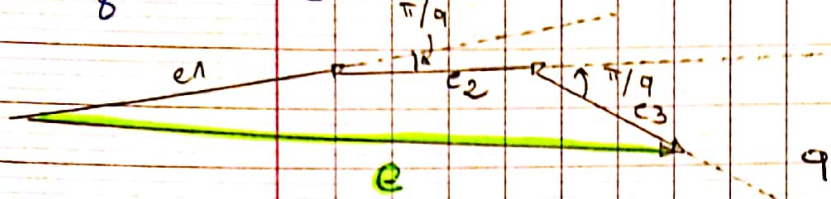
$K_f = \frac{E}{E_{moy}} > 1$: facteur de forme

$\Rightarrow E = 2K_f \cdot N \cdot f \cdot \phi$

Scanné avec CamScanner

+ Facteur d'enroulement (distribution) :

La f.e.m résultant est la somme vectorielle de tous les f.e.m



q : nb d'encoches par pôles

Le facteur de distribution : $K_D < 1$

$$E = \underbrace{2 K_F \times K_D}_{K} \times N \times f \times \phi$$

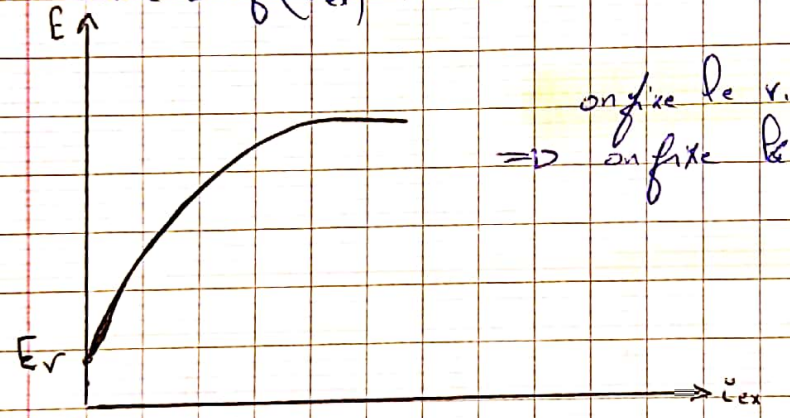
$K = 2 K_F K_D$ = coefficient de Kapp

$$E = K \times N \times f \times \phi$$

$1,9 < K < 2,6$

4) caractéristique interne (ou à vide)

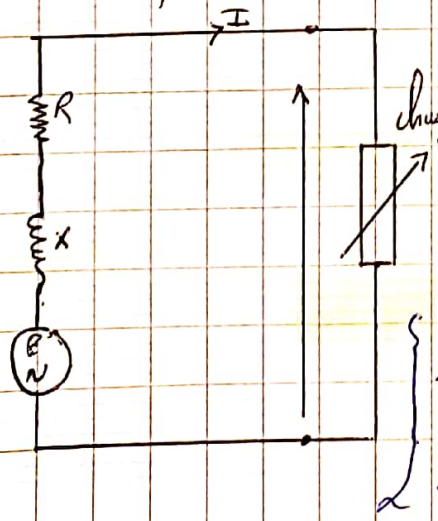
c'est la courbe $E = f(i_{ex})$ tracée à n = ct et courant débité nul ($I = 0$)



on fixe la vitesse
⇒ on fixe la fréquence

5) caractéristique en charge :

* schéma équivalent :



R : résistance de l'enroulement
X : réatance synchrone

$X = X_f + X_a$

X_a : réactance due à la réaction magnétique de l'induit
X_f : réactance due à la réaction de fuite

Scanné avec CamScanner

$$\underline{E} = \underline{V} + R\underline{I} + jX_f\underline{I} + jX_a\underline{I} = \underline{V} + R\underline{I} + jX\underline{I}$$

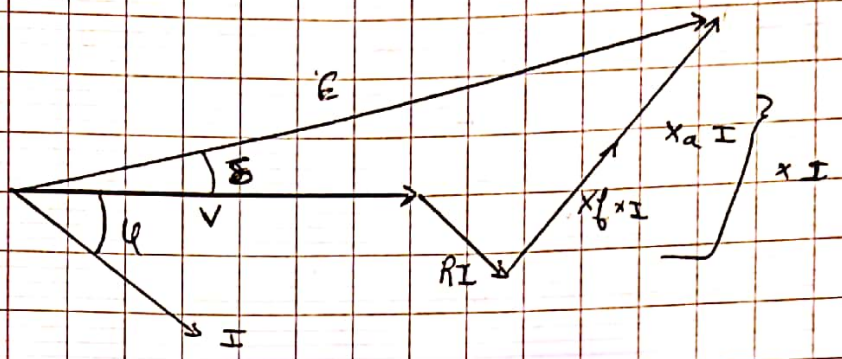
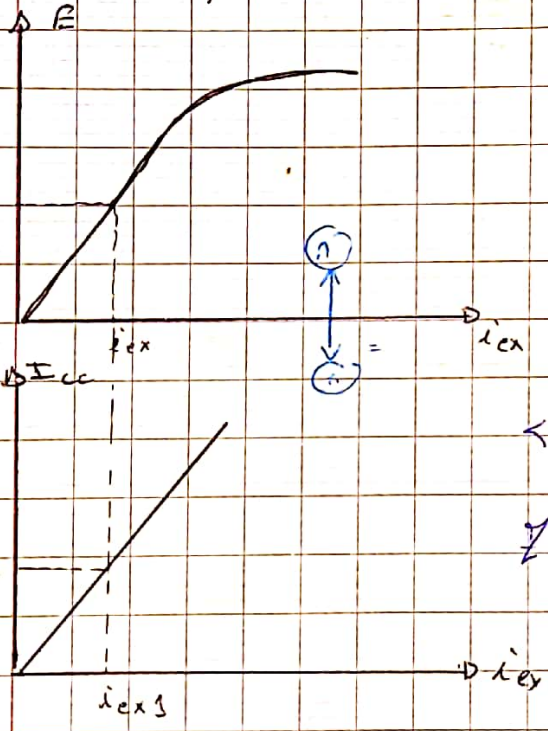


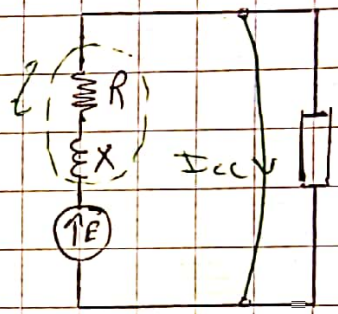
Diagramme de Behn-Eschenburg

δ : angle interne (angle de puissance)

Si :

* Détermination pratique de la réactance synchrone :





↳ = caractéristique de cc.

$I_{cc} = f(i_{ex})$ à n = cte

$Z = \frac{E_1}{I_{cc1}} = \sqrt{R^2 + X^2}$

$\Rightarrow X = \sqrt{E^2 - R^2}$

on mesure R à l'aide d'un ohmètre

* Expression de la puissance électrique :

$\underline{S}_{ch} = P_{ch} + j Q_{ch} = 3 V I (\cos\varphi + j \sin\varphi) = 3 \underline{V}\, \underline{I}^*$

$\underline{S}_{ch} = 3 \underline{V} \left(\frac{\underline{E} - \underline{V}}{\underline{Z}} \right)^* = \frac{(\underline{E} - \underline{V})^* \cdot \underline{Z}}{Z^2}$

$\underline{Z} = X e^{j\alpha}$ $\left(tg\alpha = \frac{X}{R} \right)$; $\underline{E} = E e^{j\delta}$

$\underline{S}_{ch} = \frac{3V}{Z} \left(E e^{j\delta} - V \right) e^{j\alpha} = \frac{3V}{Z} \left[E e^{j(\alpha - \delta)} - V e^{j\alpha} \right]$

$\begin{cases} P_{ch} = \frac{3V}{Z} \left[E \cos(\alpha - \delta) - V \cos\alpha \right] \\ Q_{ch} = \frac{3V}{Z} \left[E \sin(\alpha - \delta) - V \sin\alpha \right] \end{cases}$

$\underline{S}_g = 3 \underline{E}\, \underline{I}^* = 3 \underline{E} \left(\frac{\underline{E} - \underline{V}}{\underline{Z}} \right)^*$

$\underline{S}_g = \frac{3 E e^{j\delta}}{Z} \cdot \left(E e^{-j\delta} - V \right) e^{j\alpha}$

$= \frac{3E}{Z} \left[E e^{j\alpha} - V e^{j(\alpha + \delta)} \right] = P_g + j Q_j$

$\begin{cases} P_g = 3E/X \left[E \cos\alpha - V \cos(\alpha + \delta) \right] \\ Q_g = \frac{3E}{Z} \left[E \sin\alpha - V \sin(\alpha + \delta) \right] \end{cases}$

$\begin{cases} P_g - P_{Cu} = 3 R I^2 = \text{pertes joules induit} \\ Q_g - Q_{fs} = 3 X I^2 = \text{pertes réactives induit} \end{cases}$

* si $R \ll X$; $\alpha = \pi/2 \rightarrow Z = X$

$\begin{cases} P_g = \frac{3E}{X} \left[0 + V \sin(\delta) \right] = \frac{3E}{X} V \sin(\delta) = P_{ch} \\ Q_g = \frac{3E}{X} \left[E - V \cos\delta \right] \\ Q_{ch} = \frac{3V}{X} \left[E \cos\delta - V \right] \end{cases}$

Scanné avec CamScanner

* Chute de tensions :

$(E \sin\delta)^2 + (E\cos\delta)^2 = (xI\cos\varphi)^2 + (V + xI\sin\varphi)^2$.

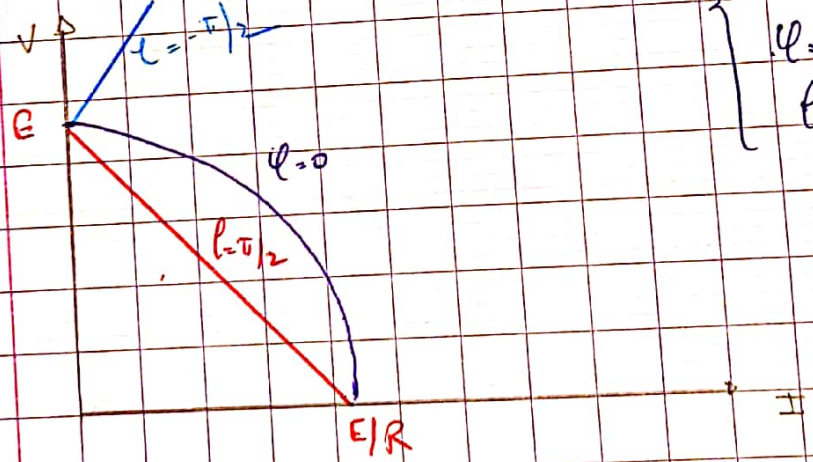
$E^2 = (xI\cos\varphi)^2 + V^2 + (xI\sin\varphi)^2 + 2VI\sin\varphi$.

$E^2 = (xI)^2 + V^2 + 2VxI\sin\varphi$

$V^2 + 2xI\sin\varphi V + (xI)^2 - E^2 = 0$

$\Delta^2 = (xI\sin\varphi)^2 - ((xI)^2 - E^2) = E^2 - (xI\cos\varphi)^2 > 0$

$V = -xI\sin\varphi + \sqrt{E^2 - (xI\cos\varphi)^2}$



$$\begin{cases} \varphi = 0 \Rightarrow V = \sqrt{E^2 - (xI)^2} \\ \varphi = \pi/2 \Rightarrow V = E - xI \\ \varphi = -\pi/2 \Rightarrow V = E + xI \end{cases}$$

6) couplage d'un alternateur sur le réseau

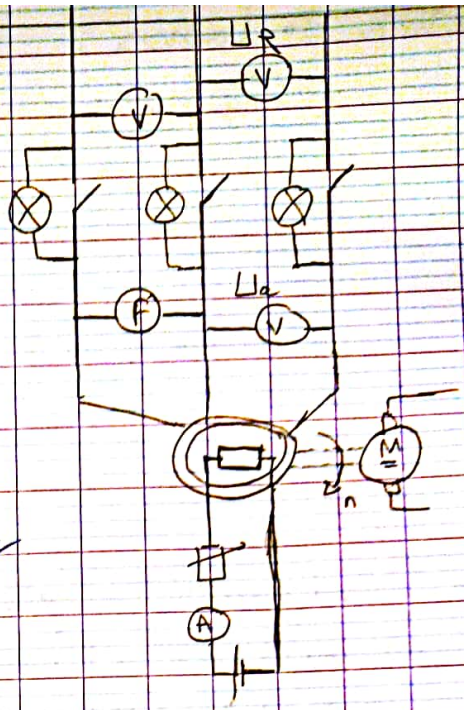
- Le réseau, on pose sa fréquence et la tension → l'alternateur

conditions

+ même tension en vide
+ même fréquence
+ même ordre de succession des phases

Scanné avec CamScanner

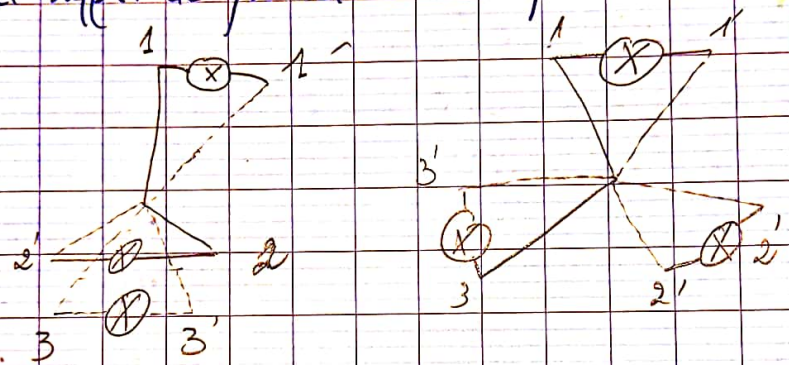
Etapes : on règle le courant d'excitation jusqu'à avoir $U_R = U_A$



. si l'ordre des phases bon
⇒ les lampes s'allument et s'éteignent

↳ on agit sur la vitesse de l'alternateur jusqu'à ce que la lampe soit éteinte ⇒ on ferme K

. si l'ordre de succession des phases n'est pas bon
→ les lampes s'allument et s'éteignent à tour de rôle (flux tournant)
Pour corriger il suffit de permuter deux phases



caractéristique $I = f(i_{ex})$ à puissance active constante :

$P = V I \cos\varphi$. ck → $I \cos\varphi$ = cte

cte cte cte

(régime à courant actif constant)

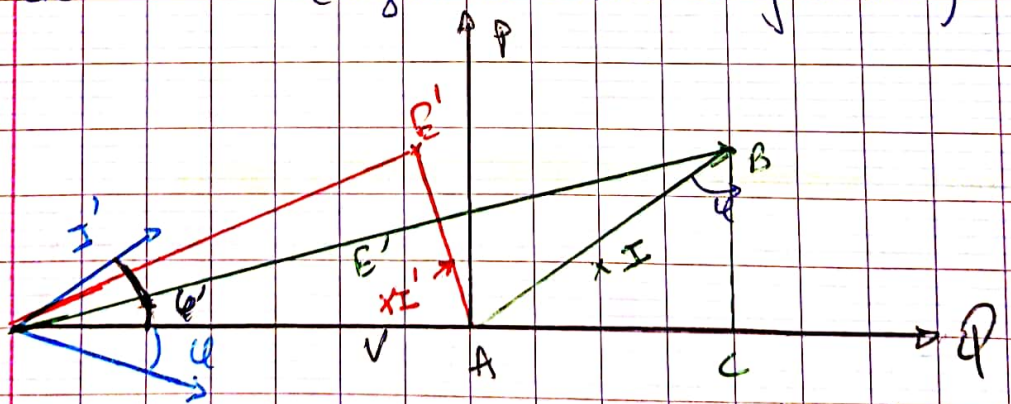
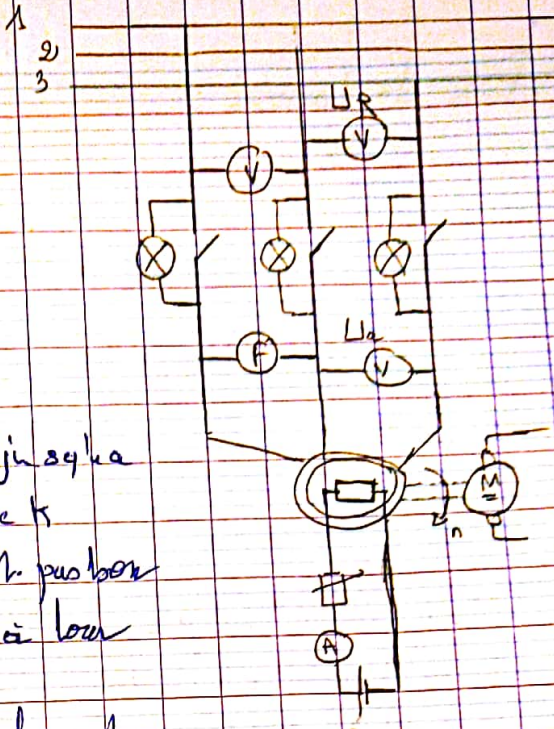


Diagramme de Blondel

Scanné avec CamScanner



Etape : on règle le courant d'excitation jusqu'à avoir $U_R = U_A$

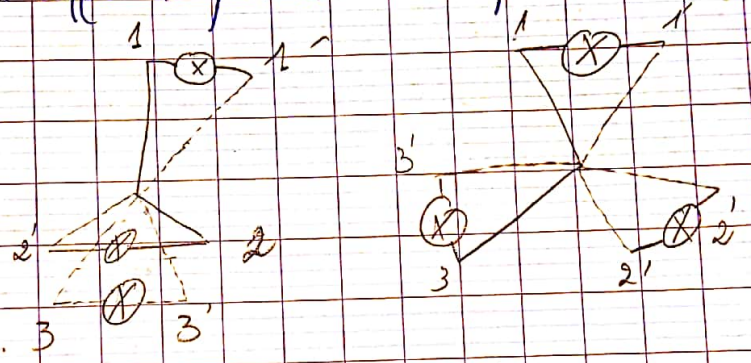
- si l'ordre des phases bon

⇒ les lampes s'allument et s'éteignent

- on agit sur la vitesse de l'alternateur jusqu'à ce que la lampe soit éteinte ⇒ on ferme K
- si l'ordre de succession des phases n'est pas bon

⇒ les lampes s'allument et s'éteignent à tour de rôle (feu tournant)

Pour corriger il suffit de permuter deux phases



caractéristique $I = f(I_{ex})$ à puissance active constante :

$P = V I \cos\varphi = cte \Rightarrow I \cos\varphi = cte$

(régime à courant actif constant)

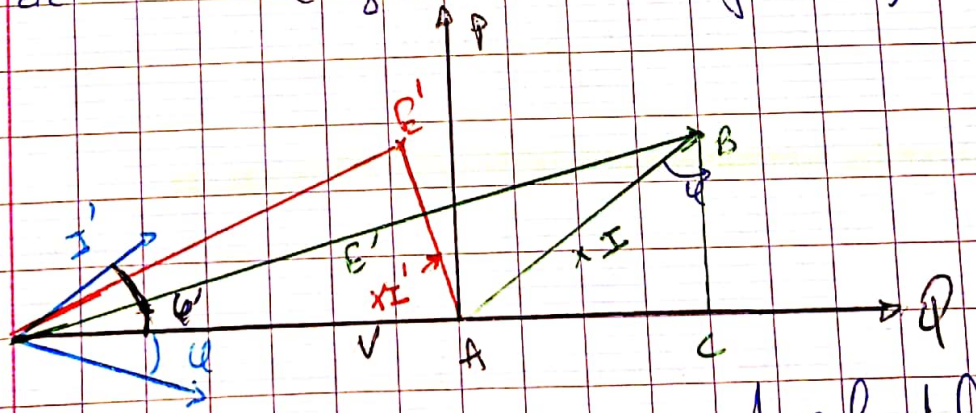
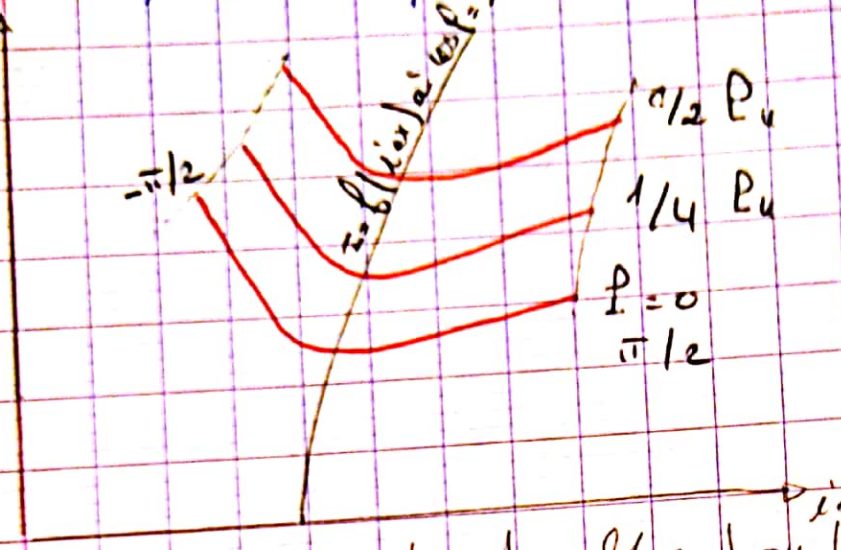


Diagramme de Blondel

Scanné avec CamScanner

- $BC = XI\cos\varphi = \left(\frac{X}{V}\right) V I \cos\varphi = \left(\frac{X}{V}\right) P$
- BC : représente la puissance active
- $AC = XI\sin\varphi = \left(\frac{X}{V}\right) V I \sin\varphi = \left(\frac{X}{V}\right) Q$
- AC : représente la puissance réactive



- courbe de Mordey (cm)

- (I = f(ie) à cos φ = 1 et V = cte
  et la caractéristique de réglage)

7) Rendement

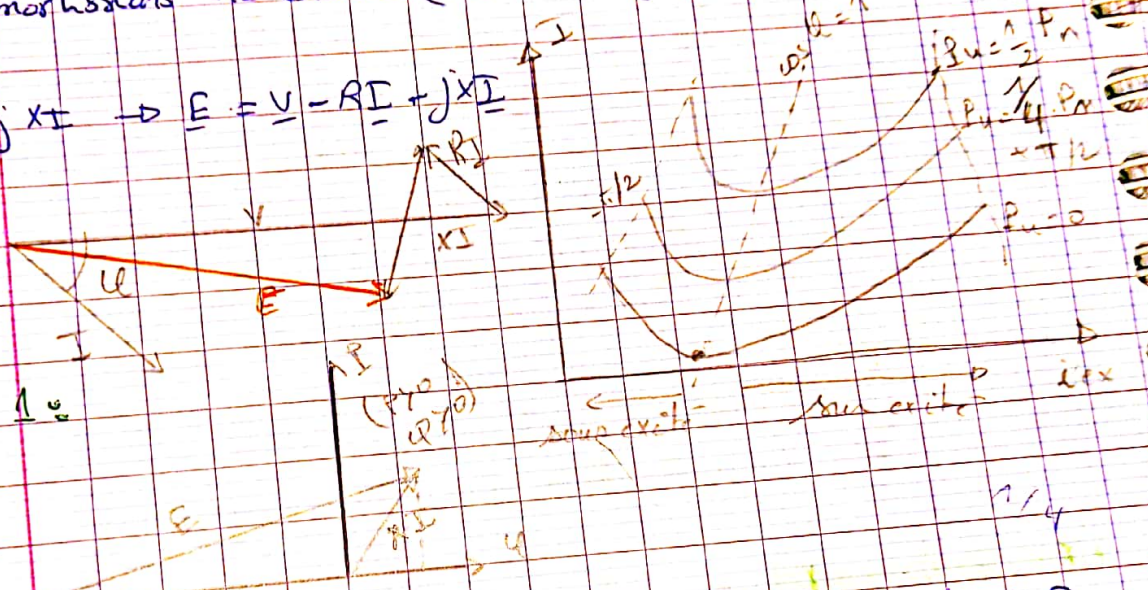
$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{3 V I \cos\varphi}{3 V I \cos\varphi + \sum \text{pertes}}$$

Pertes {
- P_{jc} = pertes joules excitation
- P_{ja} = pertes joules alternateur
- P_m = pertes mécaniques
- P_f = pertes fer

III - Fonctionnement en mode moteur :

- Le moteur synchrone ne démarre pas tout seul
- On utilise un moteur auxiliaire (moteur à C.C) puis on fait L'opération de l'accrochage sur le réseau. Il suffit d'ouvrir L'alimentation sur le M.C.C, pour que la machine synchrone passe à l'état moteur.
- Le démarrage en asynchrone : Il faut que la machine comporte les amortisseurs de blanc (rotor à cage)

$$\underline{V} = \underline{E} + R\underline{I} + jX\underline{I} \rightarrow \underline{E} = \underline{V} - R\underline{I} + jX\underline{I}$$



cas 1 :

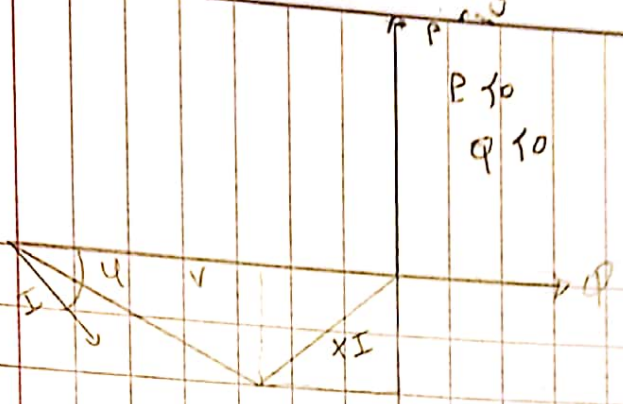
Alternateur sur excité : fournissant P et Q

cas 2 :

Alternateur sous excité fournissant P et absorbant Q

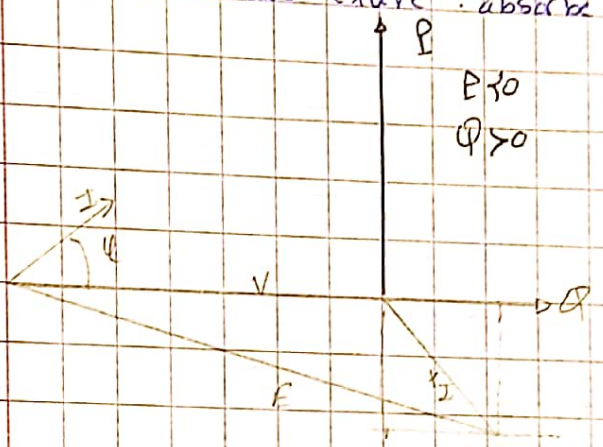
Scanné avec CamScanner

cas3



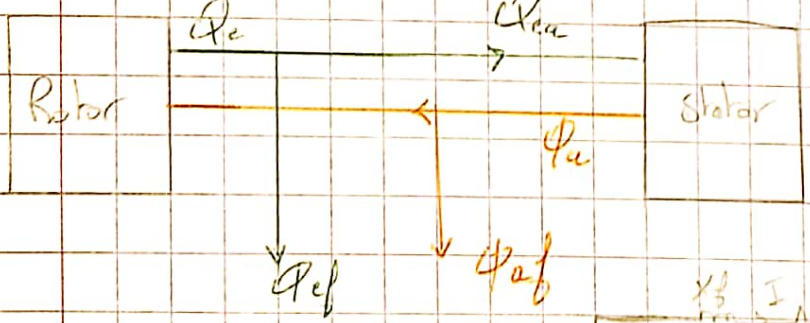
* Moteur sous-excité : absorbe P et Q

cas4 :



* Moteur sur-excité : absorbe P et fournit Q.
(compensateur synchrone)

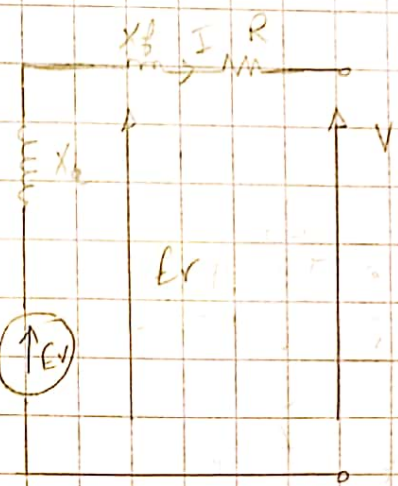
IV - Diagramme de Potier :



$$\underline{\Phi}_r = \underline{\Phi}_{eu} + \underline{\Phi}_a$$

$$\underline{E}_r = \underline{E}_f + \underline{E}_a$$

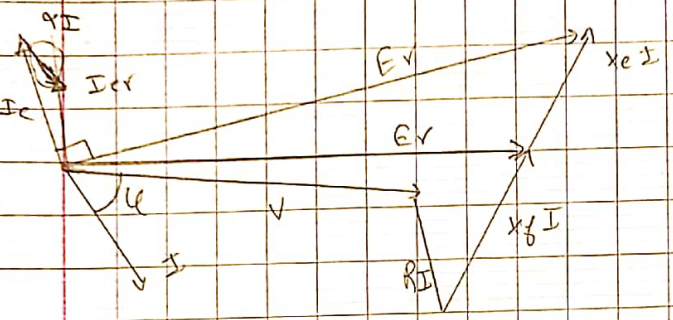
$$-j X_e \underline{I}_{er} = -jX_e \underline{I}_e - jX_a \underline{I} \quad (1)$$



Scanné avec CamScanner

$(1) \Rightarrow \underline{I}_{er} = \underline{I}_e + \left(\frac{x_a}{x_e}\right)\underline{I} = \underline{I}_e + \alpha \underline{I}$

avec $\alpha = \frac{x_a}{x_e}$: coefficient d'équivalence



* Détermination de α et x_f

cette méthode fait appel à une charge purement inductive appelée "self de watté"

méthode en.

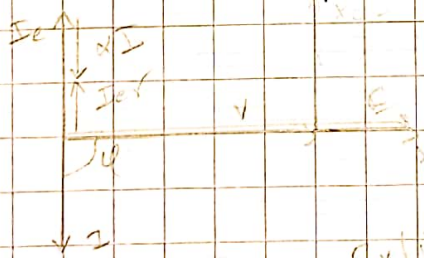
Cette méthode n'est valable que si on arrive à la saturation

$I = cte$, $f = cte$

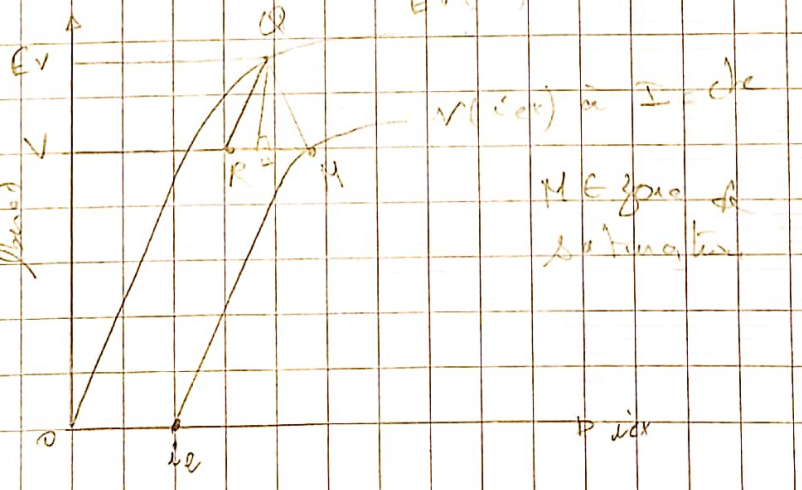
on trace la caractéristique $V = f(i_{ex})$ à $I = cte$

I une valeur imposée

$R \ll x$



$i_{ex} = i'_{er} + \alpha I$



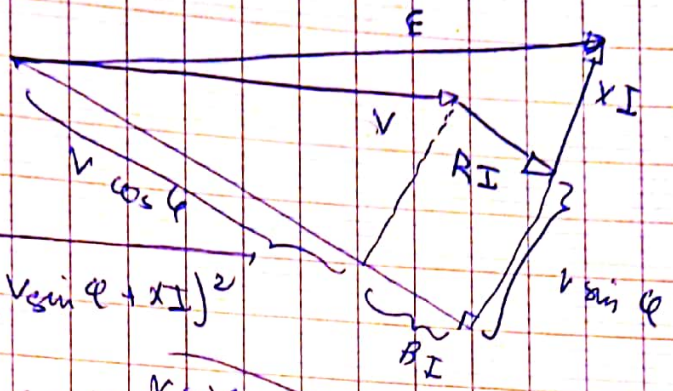
$QH = x_f I$

$HM = \alpha I$

$RM = i_e$ (courant d'excitation en C.C)

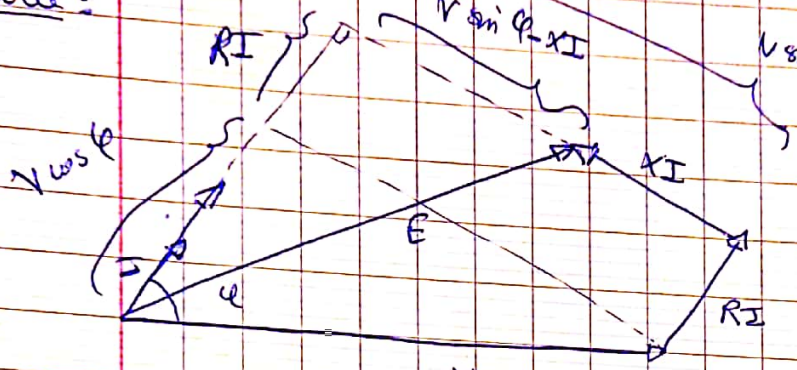
Scanné avec CamScanner

Inductive :



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

Capacitive :



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

Résistive :

$\varphi = 0 \rightsquigarrow E = \sqrt{(V + RI)^2 + (XI)^2}$

$$E = \sqrt{(1385 \times 0{,}8 + 0{,}108 \times 10^3)^2 + (1385 \times 0{,}6 + 0{,}136 \times 10^3)^2} = 1531{,}8\ V$$

b)

$E = 1532 \rightsquigarrow$ dans la courbe $i = 4{,}2\ A$

d'après la caractéristique de la vide.

c) $P_{js} = 3RI^2 = 3 \times 0{,}108 \times (1000)^2 = 2{,}10 \times 10^3\ W$

d)

$$P_a = P_{js} + P_f + P_{ext} + P_m = 100\ kW$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}\,UI\cos\varphi}{\sqrt{3}\,UI\cos\varphi + \underbrace{P_f + P_{ext} + P_m}_{100} + \underbrace{P_{js}}_{\geq 240}} = \frac{\sqrt{3} \times 2400 \times 10^3 \times 0{,}8}{\sqrt{3} \times 2400 \times 10^3 \times 0{,}8 + 340}$$

$\leq 0{,}9$.

Scanné avec CamScanner

Exercice 2

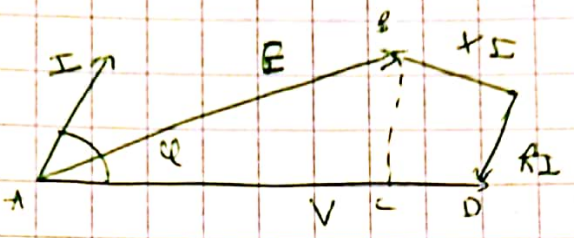
1) $Z = \frac{E}{I_{cc}} = \frac{156}{49} = 3,25\ \Omega$

$X = L\omega = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{3,25^2 - 0,8^2} = 3,15\ \Omega$

2) $E = \sqrt{(V\cos\varphi + RI)^2 + (V\sin\varphi + XI)^2} = 302,16\ V$

$\Rightarrow I_c \simeq 3\ A$

3)



$V = AC + CD$

$CD = XI\sin\varphi - RI\cos\varphi$

$BC = RI\sin\varphi + XI\cos\varphi$.

$AC = \sqrt{E^2 - BC^2}$

$V = AC + CD$.

ou

$E^2 = (V\cos\varphi)^2 + (RI)^2 + 2V\cos\varphi RI + (V\sin\varphi)^2 + (XI)^2 + 2XIV\sin\varphi$

Méthode 1 :

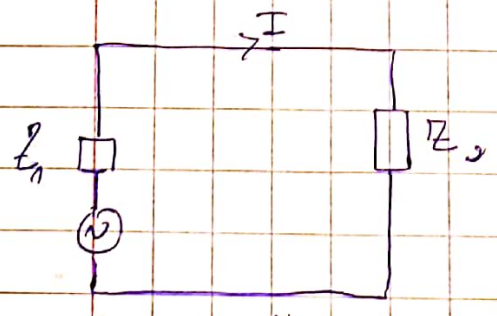
$CD = XI\sin\varphi - RI\cos\varphi = 36,1\ V$

$BC = 205,56\ V$

$AC = \sqrt{213^2 - 205,56^2} = 207,26\ V$

$V = 244,26\ V$

4)



$\underline{I} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z_1} + \underline{Z_2}}$ $\quad \underline{Z_{-2}} = \underline{Z_1}$

$I = \frac{E}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$

$P_2 = R_2 I^2 = \frac{R_2 E^2}{(R_1 + R_2)^2 (X_1 + X_2)^2}$

Scanné avec CamScanner

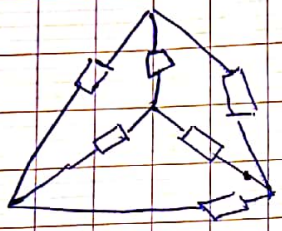
P_2 est maximale si $x_1 = x_2 \Rightarrow P = \dfrac{R_2 E^2}{(R_1+R_2)^2}$

$\dfrac{dP}{dR_2} = ?\ 0 \;;\; \dfrac{dP}{dR_2} = \dfrac{E^2(R_1+R_2)^2 - 2(R_1+R_2)R_2 E^2}{(R_1+R_2)^4} = 0$

$\Rightarrow (R_1+R_2) = 2(R_1+R_2)R_2$

$R_1 + R_2 = 2R_2 \Rightarrow R_2 = R_1$

Remarque



$R_Y = \dfrac{R\Delta}{3}$

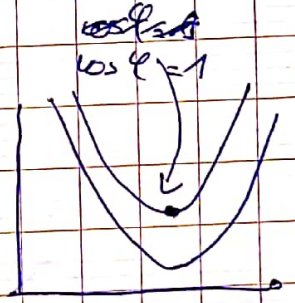
en fait

$R = 3 \times 0{,}8 = 2{,}4\ \Omega$

Exercice 3 :

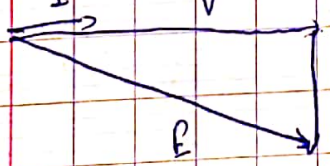
1) $n = \dfrac{60 \times 6}{P} = \dfrac{60 \times 50}{3} = 1000\ tr/min$

2) $I = \dfrac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos\varphi} = \dfrac{1{,}5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200 \times 1} = 14{,}43\ A$



3) $C = \dfrac{P_u}{\Omega} = \dfrac{1{,}5 \times 10^3}{2 \times \pi \times 1000/60} = 47{,}74\ N.m$

4) f. cem ?



$E = \sqrt{V^2 + (XI)^2}$

$= \sqrt{\left(\dfrac{200}{\sqrt{3}}\right)^2 + (2 \times 14{,}43)^2}$

$= 193{,}64\ V \approx 163{,}27\ V$

$V = 200/\sqrt{3}$

Scanné avec CamScanner

5)

5.1 -

$\varphi = \arccos 0,8 = 36,86 \approx 37°$

I en avance par rapport à V (capacitif)

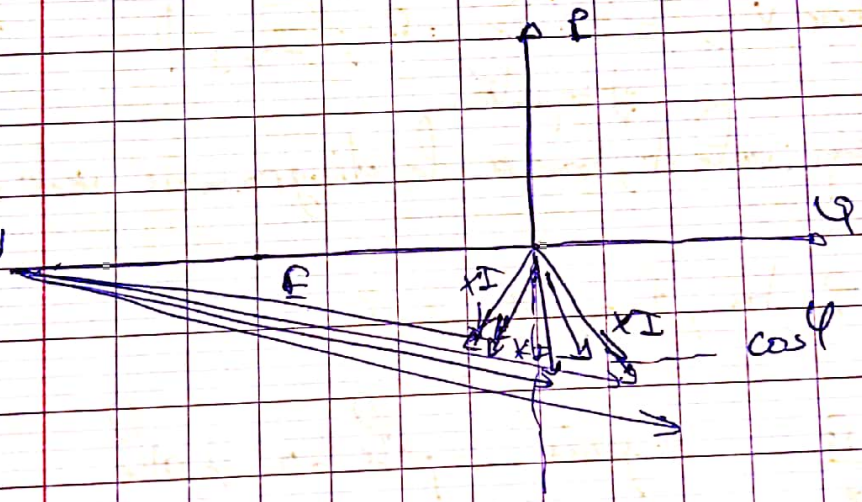
5.2) $I = \frac{P}{\sqrt{3} U \times \cos\varphi} = \frac{5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 200 \times 0,8} = 18,04\ A$

5.3)



$E = \sqrt{V^2 + (xI)^2 - 2 \times V \times I \times \cos(90 + 37)} = 232,85\ V$

6 -



on mesure : xI → I

E →

Scanné avec CamScanner

Alternateur 217 VA ; 2885/5000 V, Y, 50 Hz, 1500 tr/min
N = 500 conducteurs
R_s négligeable ; la résistance de k = 2,25 ; rotor = 10 Ω
$(P_f + P_m) = 65$ kW

* Essai à vide : n = 1500 tr/min ; $E = 100 I_e$ si $[0 < I_e < 50A]$
* Essai en charge : charge inductive $\cos\varphi = 0,8$; $U_1 = 5000$ V
$I_n = 200$ A ; $I_e = 32$ A

1) Déterminer le nombre de pôles
2) calculer les courants nominaux qui doivent figurer sur la plaque
3) A vide, pour U = 5000 V, calculer : E ; I_e ; Φ
4) En charge :
a) Donner le schéma équivalent, tracer le diagramme vectoriel et équation
En déduire X_s ?
b) calculer ; P_u, $\sum P_{pertes}$, P_a, η, C ?

correction

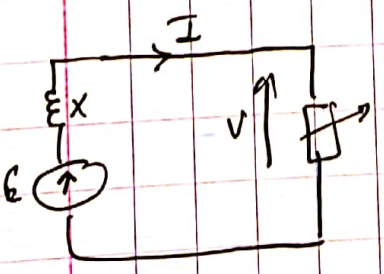
1) $p = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2$ paire de pôle $\Rightarrow$ 4 pôle

2) $I_{nY} = \frac{S}{3 V_n} = \frac{2 \times 10^5}{3 \times 2885} = 231$ A
$I_{n\Delta} = 231 \times \sqrt{3} = 400$ A
} 400/231 A

3) $E = \frac{5000}{\sqrt{3}} = 2886,7$ V $\Rightarrow I_e = 28,86$ A

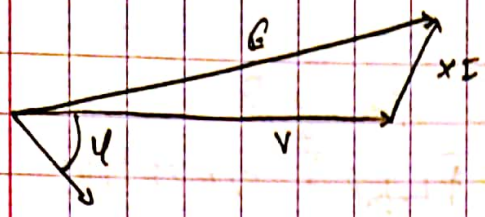
$E = K \times N \times f \times \Phi \Rightarrow \Phi = \frac{E}{500 \times 2,25 \times 50} = 0,05$ wb

4 a)



$\underline{V} = \underline{E} - x\underline{I}$

Scanné avec CamScanner



$G^2 = (V\cos\varphi)^2 + (V\sin\varphi + xI)^2$

$= (V\cos\varphi)^2 + (V\sin\varphi)^2 + (xI)^2 + 2V\sin\varphi\, xI$ ($2^{ème}$ degrée

$x = 2{,}41\ \Omega$

b) $P_u = \sqrt{3}\, U\, I \cos\varphi = 5000\sqrt{3} \times 0{,}8 \times 200 = 1{,}385 \times 10^6\ W$

$\Sigma P_{abs} = RI^2 + P_{fer} + P_{méc} = 10 \times (32)^2 + 65 \times 10^3 = 75240\ W$

$P_e = P_u + \Sigma P_{abs} = 1{,}385 \times 10^6 + 75240 = 1{,}46 \times 10^6\ W$

$\eta = \frac{P_u}{P_e} = 0{,}94$

$C = \frac{P_a}{\Omega} = \frac{1{,}46 \times 10^6}{\frac{2\pi \times n}{60}} = 9300\ Nm.$

Ex 2 :

Alternateur qui accède au réseau

$U_n = 6{,}6\ kV$; $f = 50\ Hz$; $S_n = 3000\ VA$; $n_n = 1000\ tr/min$, Y

$R_s \approx 0$

+ Essai à vide : $n = 1000\ tr/min$; $E = 300 \times I_n$

+ Essai en c.c. : $n = 1000\ tr/min$; $I_{cc} = 170\ I_e$

1) calculer E

2) " I_n

3) " x

4) L'alternateur doit pouvoir Φ_s tel que $tg\,\varphi = 0{,}69$, pour

$P = 2{,}25\ MW$

a) calculer $\cos\varphi$

b) " I

c) représenter le diagramme vectoriel

d) La machine est elle surexcité ou sous excité

Scanné avec CamScanner

e) calculer $\mathcal{E}$ et I_c

f) Donner la valeur d'l'angle interne β

g) calculer η sachant que $P_{total} = 0,025\ MW$

h) Préciser le régime de ce système

*Correction

1) $P = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50}{1000} = 3$

2)

Scanné avec CamScanner