

Sommaire

<u>TD</u>	<u>Sciences Appliquées Machines synchrones STS</u>	1
<u>Exercice 1:</u>	<u>Machine Synchrone Réversible (Tale C.H.Vigouroux) (Solution 1:)</u>	2
<u>Exercice 2:</u>	<u>Modèle d'une machine, en charge (Solution 2:)</u>	2
<u>Exercice 3:</u>	<u>Coeff forme, distribution (Solution 3:)</u>	3
<u>Exercice 4:</u>	<u>Déwatté, Potier. (Solution 4:)</u>	3
<u>Exercice 5:</u>	<u>Déwatté, Potier, Charge condensateur (Solution 5:)</u>	3
<u>Exercice 6:</u>	<u>BTS 2008 Sujet 0 (Solution 6:)</u>	3
<u>Exercice 7:</u>	<u>BTS 2007 Métro (Solution 7:)</u>	4
<u>Exercice 8:</u>	<u>BTS 2006: Nouméa (Solution 8:)</u>	7
<u>Exercice 9:</u>	<u>BTS 2005 Métro (Solution 9:)</u>	9
<u>Exercice 10:</u>	<u>BTS 2000 Métro (Solution 10:)</u>	10
<u>Exercice 11:</u>	<u>BTS 1999 Métro (Solution 11:)</u>	11
<u>Exercice 12:</u>	<u>BTS 1984: (Solution 12:)</u>	12
<u>Exercice 13:</u>	<u>Utilisation du diagramme de Behn-Eschenburg (Solution 13:)</u>	13
<u>Exercice 14:</u>	<u>utilisation du diagramme de Potier. (Solution 14:)</u>	13
<u>Exercice 15:</u>	<u>Fonctionnement d'un moteur synchrone couplé sur le réseau. (Solution 15:)</u>	13
<u>Exercice 16:</u>	<u>Machine Synchrone (3EI) (Solution 16:)</u>	14
<u>Exercice 17:</u>	<u>Etude d'une machine synchrone triphasée tétrapolaire couplage étoile, $f_n = 50\text{Hz}$ (3EI) (Solution 17:)</u>	14
<u>Exercice 18:</u>	<u>Machine Synchrone Application du diagramme bipolaire simplifié (3EI) (Solution 18:)</u>	15
<u>Exercice 19:</u>	<u>BTS Etk 2011 Métro Compagnie Nationale du Rhone (Solution 19:)</u>	15
<u>Exercice 20:</u>	<u>BTS 2012 Métro Sucrerie (Solution 20:)</u>	19
<u>Solutions Machines synchrones</u>		22
<u>Solution 1:</u>	<u>Exercice 1:Machine Synchrone Réversible (Tale C.H.Vigouroux) (Solution 1:)</u>	22
<u>Solution 2:</u>	<u>Exercice 2:Modèle d'une machine, en charge (Solution 2:)</u>	22
<u>Solution 3:</u>	<u>Exercice 3:Coeff forme, distribution (Solution 3:)</u>	22
<u>Solution 4:</u>	<u>Exercice 4:Déwatté, Potier. (Solution 4:)</u>	22
<u>Solution 5:</u>	<u>Exercice 5:Déwatté, Potier, Charge condensateur (Solution 5:)</u>	22
<u>Solution 6:</u>	<u>Exercice 6:BTS 2008 Sujet 0 (Solution 6:)</u>	22
<u>Solution 7:</u>	<u>Exercice 7:BTS 2007 Métro (Solution 7:)</u>	23
<u>Solution 8:</u>	<u>Exercice 8:BTS 2006: Nouméa (Solution 8:)</u>	26
<u>Solution 9:</u>	<u>Exercice 9:BTS 2005 Métro (Solution 9:)</u>	28
<u>Solution 10:</u>	<u>Exercice 10:BTS 2000 Métro (Solution 10:)</u>	29
<u>Solution 11:</u>	<u>Exercice 11:BTS 1999 Métro (Solution 11:)</u>	30
<u>Solution 12:</u>	<u>Exercice 12:BTS 1984:</u>	32
<u>Solution 13:</u>	<u>Exercice 13:Utilisation du diagramme de Behn-Eschenburg</u>	32
<u>Solution 14:</u>	<u>Exercice 14:utilisation du diagramme de Potier.</u>	32
<u>Solution 15:</u>	<u>Exercice 15:Fonctionnement d'un moteur synchrone couplé sur le réseau.</u>	32
<u>Solution 16:</u>	<u>Exercice 16:Machine Synchrone (3EI)</u>	32
<u>Solution 17:</u>	<u>Exercice 17:Etude d'une machine synchrone triphasée tétrapolaire couplage étoile, $f_n = 50\text{Hz}$ (3EI)</u>	32
<u>Solution 18:</u>	<u>Exercice 18:Machine Synchrone Application du diagramme bipolaire simplifié (3EI)</u>	32
<u>Solution 19:</u>	<u>Exercice 19:BTS Etk 2011 Métro Compagnie Nationale du Rhone ()</u>	32
<u>Solution 20:</u>	<u>Exercice 20:BTS 2012 Métro Sucrerie ()</u>	35

1Exercice 1 : *Machine Synchrone Réversible (Tale C.H.Vigouroux) (Solution 1:)*

Une machine synchrone triphasée possède les caractéristiques suivantes :

stator :	rotor :
enroulements couplés en étoile 48 conducteurs actifs par enroulement résistance par enroulement $R = 0,10 \, \Omega$ fréquence 50 Hz, chute de tension ohmique $\ll$ inductive.	tétrapolaire fréquence de rotation $n_s = 1500 \text{ tr/min}$ résistance du bobinage inducteur $R_{ex} = 4,5 \, \Omega$

Relation $E(I_{ex})$

La valeur efficace de la fém par enroulement du stator et l'intensité du courant continu d'excitation sont liées par l'équation : $E = K \cdot I_{ex}$, avec E en volts, I_{ex} en ampères, $K = 40 \text{ V/A}$.

On supposera que cette relation reste la même à vide et en charge ($\Leftrightarrow$ aucune saturation magnétique).

Caractéristique de court-circuit

Elle est représentée par la droite d'équation : $I_{cc} = 8 \cdot I_{ex}$, avec I_{cc} valeur efficace de l'intensité dans un enroulement du stator en court-circuit.

1°) Calculs préliminaires

a) Montrer que la réactance synchrone d'un enroulement du stator est constante, égale à $5 \, \Omega$.

b) En prenant 2,2 comme valeur du coefficient de Kapp, déterminer le flux d'un pôle du rotor pour un courant d'excitation $I_{ex} = 8,4 \text{ A}$.

2°) Fonctionnement en alternateur autonome

Un moteur thermique de puissance suffisante entraîne le rotor.

Le stator fournit de l'énergie électrique à une charge inductive équilibrée, de facteur de puissance $\cos \phi = 0,85$.

L'intensité du courant continu d'excitation est réglée à $8,4 \text{ A}$.

Dans ces conditions, la valeur efficace du courant en ligne est 32 A .

a) Dessiner le schéma du modèle électrique équivalent à un enroulement du stator, avec fléchage de l'intensité et des tensions.

b) Écrire l'équation de maille.

c) Par construction vectorielle, déterminer la tension entre les bornes d'un enroulement.

d) Calculer la puissance active fournie par l'alternateur à la charge.

e) En supposant que le rendement est égal à 93 %, déterminer la valeur de l'ensemble des pertes autres que par effet Joule (pertes fer et pertes mécaniques).

3°) Fonctionnement en moteur synchrone

Le stator est alimenté par le réseau triphasé 400 V , 50 Hz .

Le rotor entraîne une charge mécanique.

L'excitation est réglée à sa valeur optimale ($\Leftrightarrow$ telle que facteur de puissance stator égale 1).

Dans ces conditions la valeur efficace de l'intensité en ligne est $24,4 \text{ A}$.

a) Dessiner le schéma du modèle électrique équivalent à un enroulement du stator, avec fléchage de l'intensité et des tensions.

b) Écrire l'équation de maille.

c) Par construction vectorielle, déterminer la fém d'un enroulement.

d) En déduire l'intensité du courant continu d'excitation.

e) Calculer la puissance totale absorbée par le moteur (stator triphasé et rotor continu).

f) En supposant que les pertes autres que par effet Joule valent 800 W , déterminer la puissance utile du moteur et le moment du couple avec lequel il entraîne la charge mécanique.

g) Calculer le rendement.

1Exercice 2 : *Modèle d'une machine, en charge (Solution 2:)*

La caractéristique à vide, dans la partie non saturée, d'un alternateur triphasé, $f = 50 \text{ Hz}$, tournant à la fréquence $n_s = 3000 \text{ tr/min}$, est une droite de pente $k = 30 \text{ V/A}$ passant par l'origine.

Un essai en court-circuit des phases statoriques couplées en étoile nécessite un courant d'excitation $I_e = 1,5 \text{ A}$ pour un courant $I_{cc} = 100 \text{ A}$.

1. $R = 0,09 \, \Omega$ pour une phase, calculer X_s (la f.e.m. E étant mesurée entre phase et neutre) .

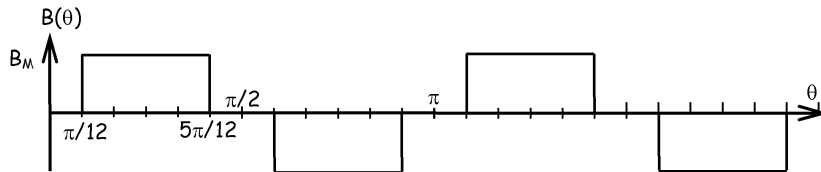
- L'alternateur débite, sous une tension $V=120$ V constante aux bornes d'une phase, une puissance utile constante $P_u=30$ kW. Pour ϕ variant de -60° , -30° , 0° , 30° à 60° , déterminer le courant d'excitation I_E . Mettre les résultats sous forme de tableau.

1Exercice 3: Coeff forme, distribution (Solution 3:)

Un alternateur triphasé, tournant à la vitesse de synchronisme $n_s = 1500$ tr/min, présente à ses bornes une f.e.m. $E=430$ V entre

phase et neutre, de fréquence $f = 50$ Hz. Il est couplé en étoile.

- Quel est le nombre de pôles du rotor.
- Le stator comporte 288 brins actifs répartis dans trois encoches par pôles et par phase.
 - Déterminer K_d coefficient de distribution.
 - La répartition ayant la répartition ci-après: calculer le coefficient de forme K_f .
 - En déduire le coefficient de Kapp K .
 - Quel est alors le flux maximal Φ_M sous un pôle ?



1Exercice 4: Déwatté, Potier. (Solution 4:)

On a relevé à n_s la caractéristique interne par phase d'un alternateur dont on a négligé la résistance par enroulement R .

I_E (A)	0	2	5	7	8.5	11	16
E (V)	0	55	135	175	185	197	210

On a effectué deux essais:

- ☐ l'un en court-circuit : $I_{ECC} = 4.5$ A et $I_{CC} = 39$ A ,
- ☐ l'autre en déwatté: $V_L=160$ V, $I_{EL} = 15$ A et $I_L = 52$ A.

- Déterminer les coefficients de Potier.
- Quelle est la valeur à donner à I_E pour obtenir les mêmes valeurs de I et de V pour une charge capacitive pure ?

1Exercice 5: Déwatté, Potier, Charge condensateur (Solution 5:)

Un alternateur triphasé a les caractéristiques suivantes: 6 pôles, $f=50$ Hz et $S = 297$ kVA. Il fournit un système de tension triphasées 220 V / 380 V. On procède à différents essais, tous réalisés à la vitesse nominale, les mesures étant réalisées pour une phase, les enroulements étant couplés en étoile. La résistance d'une phase est $R=0.06 \Omega$. On a relevé:

I_E (A)	0	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
E (V)	0	135	186	220	241	257	269	279	287	295	302

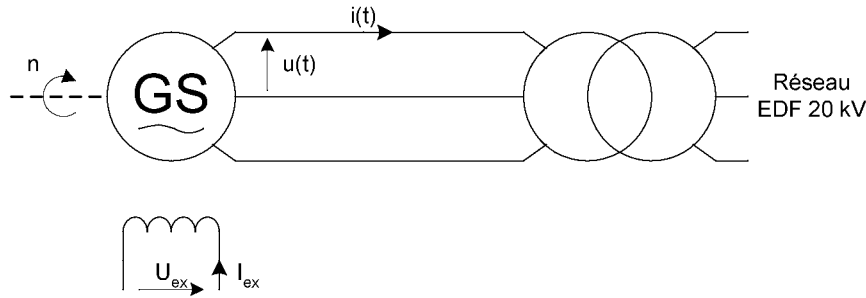
On a effectué deux essais

- ☐ En court-circuit : $I_{ECC}=14$ A pour le courant nominal.
- ☐ En déwatté: $V_L = 220$ V et $I_{EL} = 32$ A pour le courant nominal.

- Déterminer les coefficients de Potier.
- Quel est le courant I_E permettant un débit nominal sous tension nominale, avec une charge capacitive de $\cos\phi=0.8$ (calculs effectués avec les complexes).
- I_E vaut maintenant 3 A. La charge est constituée uniquement par des condensateurs qui consomment le courant nominal. Quelle est la tension aux bornes de la machine, R étant négligée.
- L'excitation est supprimée, R est négligée, la valeur des condensateurs est réglée de telle façon que la tension d'auto-amorçage soit égale à la tension nominale.
- Quel est le courant débité ? Quelle est la capacité par branche, si on choisit le montage pour lequel cette capacité est la plus faible.

1 Exercice 6: BTS 2008 Sujet 0 (Solution 6:)

Chaque turbine est accouplée à un alternateur triphasé raccordé au réseau EDF 20kV-50Hz par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur.



Les alternateurs ont comme caractéristiques :

- Tension nominale entre phases : $U_n = 6,6 \text{ kV}$ - $f = 50\text{Hz}$
- Puissance apparente utile nominale : $S_n = 3 \text{ MVA}$
- Fréquence de rotation nominale : $n_n = 1000 \text{ tr.min}^{-1}$
- Courant d'excitation maximal : $I_{ex_{max}} = 20 \text{ A}$
- Couplage des enroulements statoriques : étoile
- La résistance des enroulements statoriques est négligée

Essai à vide : pour $n = 1000 \text{ tr.min}^{-1}$, on obtient la relation : $E_v = 300 \cdot I_{ex}$

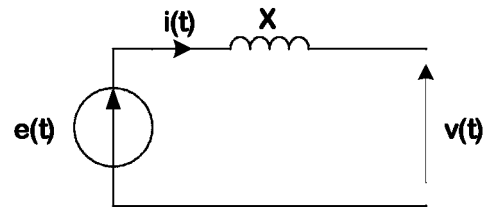
avec : E_v valeur efficace de la tension simple à vide
 I_{ex} intensité du courant d'excitation

Essai en court-circuit: pour $n = 1000 \text{ tr. min}^{-1}$, on obtient la relation $I_{cc} = 170 \cdot I_{ex}$.

B1 : Étude de l'alternateur couplé au réseau

B1-1 : Calculs préliminaires :

- B1-1-1.** Calculer le nombre p de paires de pôles.
- B1-1-2.** Calculer la valeur efficace I_n de l'intensité nominale.
- B1-1-3.** Le schéma équivalent d'une phase de la machine est donné ci-contre. Calculer la valeur X de la réactance synchrone d'une phase de l'alternateur.



B1-2 : Le contrat du producteur précise que chaque alternateur doit pouvoir à tout moment, fournir au réseau une puissance réactive Q_{al} , telle que $\tan \phi = 0,49$.

Pour une puissance électrique fournie de $P_{al} = 2,25 \text{ MW}$:

- B1-2-1.** Calculer le facteur de puissance f_p .
- B1-2-2.** Calculer la valeur efficace I du courant débité $i(t)$.
- B1-2-3.** Représenter le diagramme de Fresnel (ou diagramme bipolaire) des tensions (on pourra prendre une échelle de 250 V par cm).
- B1-2-4.** La machine est-elle sur-excitée ou sous-excitée ? Justifier.
- B1-2-5.** Calculer la fem E et en déduire le courant d'excitation I_{ex}
- B1-2-6.** Donner la valeur de l'angle de décalage interne θ .
- B1-2-7.** Calculer le rendement η_a de l'alternateur, sachant que l'ensemble des pertes vaut $p_t = 0,25 \text{ MW}$.
- B1-2-8.** Préciser l'origine de ces pertes.

1 Exercice 7: BTS 2007 Métro (Solution 7:)

Afin de simplifier l'étude, les pertes mécaniques ainsi que les pertes fer du moteur synchrone seront négligées.

Le moteur synchrone est à aimants permanents et possède 8 pôles (le nombre de paires de pôles est $p = 4$). Les enroulements du stator sont couplés en étoile. L'intensité efficace nominale du courant dans un enroulement est $I_N = 155 \text{ A}$. Pendant un transitoire de durée limitée, elle peut atteindre la valeur $I_M = 185 \text{ A}$.

Identification des paramètres du modèle

La machine est étudiée en convention récepteur. Le modèle équivalent à une phase de l'induit est représenté **Figure 3**. Les tensions et courants sont supposés sinusoïdaux de pulsation $\omega = 2\pi f$

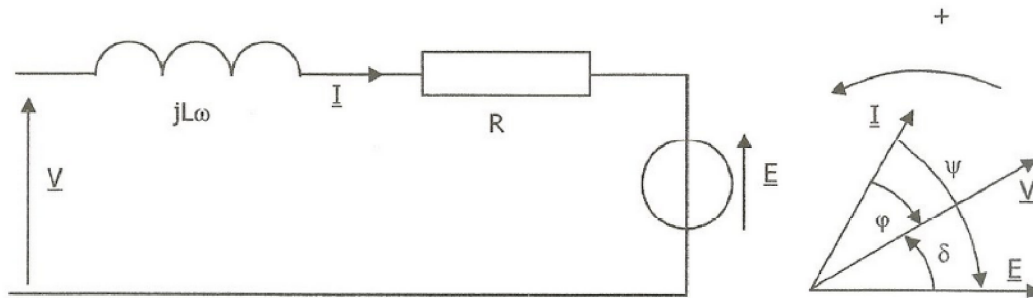


Figure 3

Afin de déterminer les paramètres du modèle, divers essais ont été effectués :

- Essai n°1 : on a mesuré la résistance entre deux phases : $r = 0,06 \Omega$.
 - Essai n°2 : sur un banc d'essais, on a entraîné la machine synchrone à vide par l'intermédiaire d'un moteur auxiliaire à la vitesse $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$. On a mesuré la tension simple aux bornes d'une phase : 37 V .
 - Essai n°3 : avec une alimentation électrique appropriée, on a effectué un essai de la machine en moteur à 1500 tr.min^{-1} pour lequel $\psi = 0$, $I = I_M = 185 \text{ A}$ et $V = 49 \text{ V}$.
1. Déterminer la fréquence des tensions statoriques quand $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$.
 2. Déterminer la valeur de la résistance R d'un enroulement statorique.
 3. On pose $E = A \cdot \Omega$ (avec Ω en rad.s^{-1}) où A est une constante.
 - a. Déterminer la valeur de A .
 - b. En donnant la formule du cours liant E à Ω , justifier que A est une constante.
 4. **La résistance R n'est pas négligée.**
 - a. Ecrire la relation entre $\underline{V}$, $\underline{E}$ et $\underline{I}$.
 - b. Tracer sur la copie un diagramme vectoriel relatif à l'essai n°3 (il n'est pas utile de le faire à l'échelle). On prendra $\underline{E}$ comme origine des phases.
 - c. En déduire, par un calcul simple s'appuyant sur le diagramme vectoriel, la valeur de L .

Dorénavant on négligera R dans le modèle de la machine synchrone. On prendra $L = 0,21 \text{ mH}$ et $A = 0,24 \text{ Wb}$.

B-2. Détermination de l'expression du couple

1. Tracer sur la copie un diagramme vectoriel représentatif d'un point de fonctionnement quelconque, avec $0 < \psi < \pi/2$. On prendra E comme origine des phases, on placera les vecteurs représentatifs des complexes $\underline{E}$, $\underline{V}$, et $jL\omega I$ ainsi que les angles ϕ , ψ et δ .
2. En s'appuyant sur ce diagramme vectoriel, montrer que $V \cos \phi = E \cos \psi$.
3. Déterminer l'expression de la puissance absorbée par la machine P_a en fonction de V , I et ϕ puis en fonction de E , I et ψ .
4. En déduire que l'expression du moment du couple C développé par la machine est donnée par : $C = 3 A I \cos \psi$ (on rappelle que les pertes joule, fer et mécaniques sont négligées).

C. D'AUTOPILOTAGE DE LA MACHINE SYNCHRONE

L'étude menée dans la partie B) permet d'établir que le moment du couple C développé par le moteur dépend uniquement des variables I et ψ , par l'intermédiaire de la formule $C = 3 \cdot A \cdot I \cdot \cos \psi$. Dans cette partie, nous allons étudier la commande en couple de la machine. Le modèle équivalent à une phase de l'induit est représenté Figure 3.

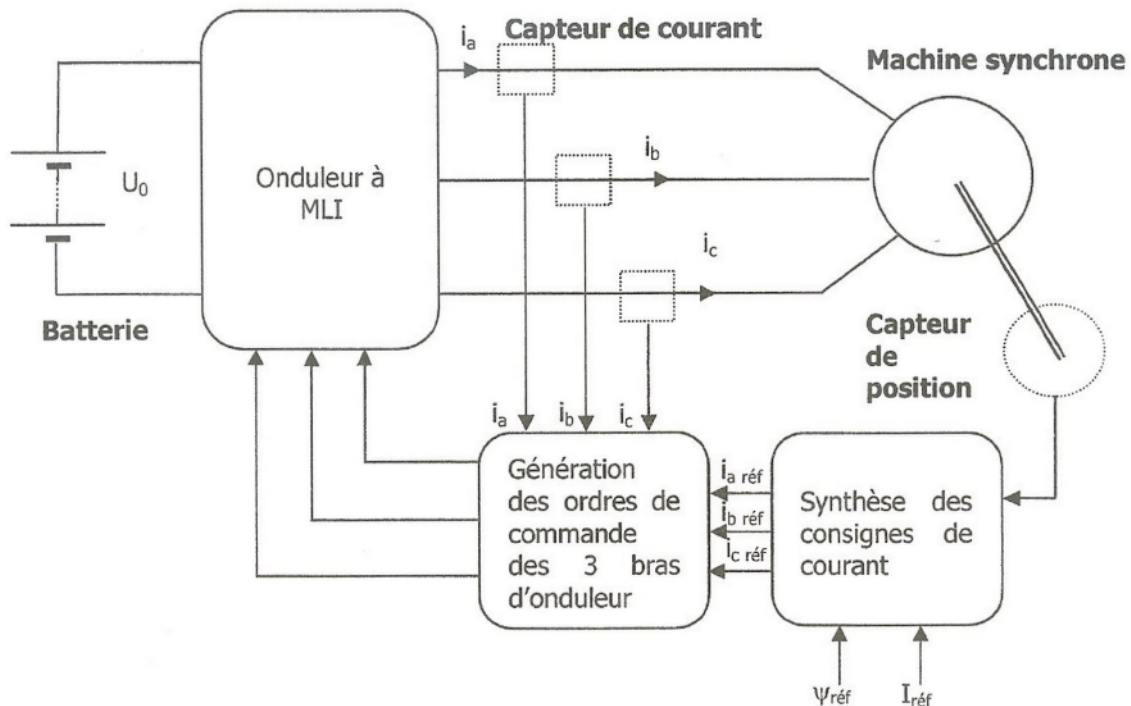
C.1.- Commande à $\psi = 0$

C.1.1- Pour une intensité efficace I donnée, pourquoi choisir cette valeur particulière de ψ , pour maximiser le couple développé par la machine ?

C.1.2- De quelle unique variable le couple C de la machine dépend-il alors ?

L'autopilotage consiste à maintenir l'angle ψ constant quelle que soit la position du rotor. A cet effet on réalise un asservissement des courants des trois phases de la machine de la façon décrite par la Figure 4 :

- à partir de la connaissance de la position du rotor, de l'angle ψ et du courant I désirés (notés respectivement $\psi_{\text{réf}}$ et $I_{\text{réf}}$) on synthétise les trois consignes de courant $i_{a \text{ réf}}$, $i_{b \text{ réf}}$ et $i_{c \text{ réf}}$
- Chaque consigne de courant ($i_{a \text{ réf}}$, $i_{b \text{ réf}}$ ou $i_{c \text{ réf}}$) est comparée à sa mesure (respectivement $i_{a \text{ réf}}$, $i_{b \text{ réf}}$ et $i_{c \text{ réf}}$). Un correcteur par phase traite l'erreur d'asservissement et génère la commande de chaque bras d'onduleur.



On traitera les questions C.1.3- et C.2.1- en supposant que les tensions alimentant le moteur synchrone et les courants absorbés sont sinusoïdaux.

C.1.3- Etude d'un point de fonctionnement à $\psi = 0$.

On choisit d'abord de travailler à $\psi = 0$, $I = I_N = 155 \text{ A}$ et $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$.

- Que vaut le moment du couple C développé par la machine ?
- Tracer sur la copie le diagramme vectoriel représentatif de ce fonctionnement (il ne sera pas utile de le faire à l'échelle). On placera les vecteurs représentatifs des complexes $\underline{E}$, $\underline{V}$, $\underline{I}$ et $jL\omega \underline{I}$ ainsi que l'angle ϕ .
- Déterminer V par le calcul.
- Déterminer ϕ par le calcul.

C.2- Commande à ψ variable

Au-delà de 2000 tr.min^{-1} , afin de ne pas dépasser la tension nominale aux bornes des enroulements, on choisit de travailler à ψ variable.

C.2.1- Etude d'un point de fonctionnement à $\psi \neq 0$. Pour $n = 5000 \text{ tr.min}^{-1}$, $\psi = -59^\circ$ et $I = I_N = 155 \text{ A}$:

- Déterminer la valeur du moment du couple C .
- Sachant que pour $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$ on a $f = 100 \text{ Hz}$, déterminer f puis ω pour $n = 5000 \text{ tr.min}^{-1}$.
- En déduire E et $L\omega I$.
- Tracer sur le Document réponse 1 le diagramme vectoriel représentant ce point de fonctionnement. L'échelle des tensions sera de 1 cm pour 10 V .
- Déterminer graphiquement la valeur de V et celle de ψ .

Sur la Figure 5, on a tracé pour $0 < n < 8000 \text{ tr.min}^{-1}$ la caractéristique du couple disponible en fonction de la vitesse de rotation du moteur n en tours par minute.

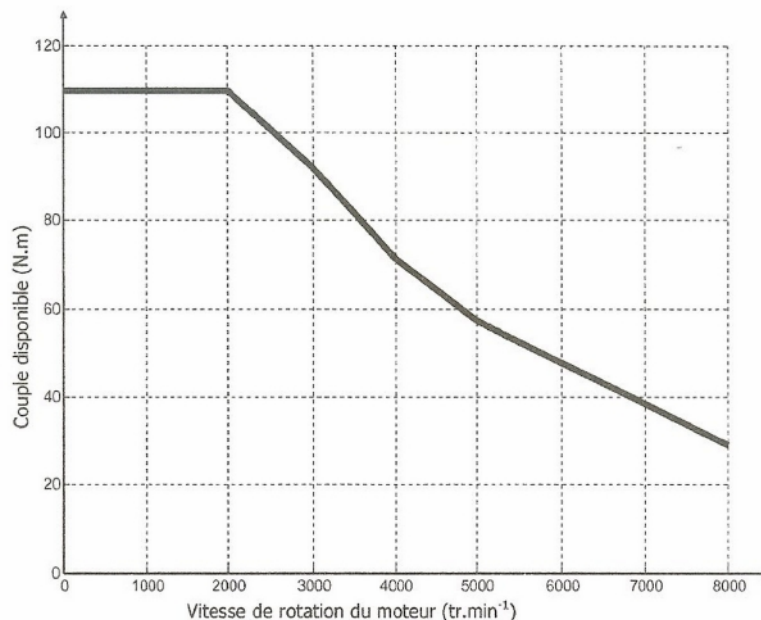


Figure 5

C.2.2- Quels sont les avantages liés à la traction d'un véhicule électrique mis en évidence par cette caractéristique de couple ?

1 Exercice 8: BTS 2006: Nouméa (Solution 8:)

1. Les caractéristiques de la machine synchrone

La propulsion électrique est assurée par une machine synchrone triphasée à aimants permanents, alimentée par un système de tensions triphasées de fréquence variable. Elle est considérée non saturée et sans pertes : en particulier, les résistances statoriques sont supposées négligeables.

Pour une fréquence d'alimentation $f = 50\text{Hz}$ et une tension nominale aux bornes d'une phase $V_n = 140\text{V}$, le constructeur indique une fréquence de rotation $n = 750\text{tr.min}^{-1}$ et une puissance apparente $S_n = 30\text{kVA}$.

On représente (figure 2) le schéma équivalent en régime sinusoïdal d'une phase de l'induit (couplé en étoile) de la machine synchrone où $e(t)$ est la f.é.m, $X_s = L_s \cdot \omega$ la réactance synchrone, $i(t)$ l'intensité du courant d'induit et $v(t)$ la tension aux bornes d'un enroulement.

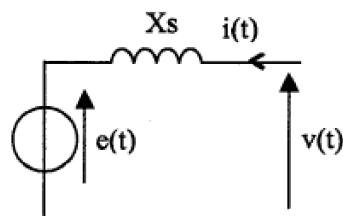


Figure 2

On note ψ le déphasage entre l'intensité $i(t)$ et la f.é.m $e(t)$.

On rappelle que l'angle ψ est mesuré négativement lorsque $i(t)$ est en avance sur $e(t)$.

La valeur efficace E des f.é.m à vide est proportionnelle à la fréquence de rotation n du rotor :

$$E = k_E \cdot n \text{ avec } k_E = 0,28 \text{ V.min.tr}^{-1}$$

- Calculer le nombre de pôles de la machine synchrone.
- Calculer la valeur efficace I_n du courant nominal d'induit.
- Sachant que l'inductance cyclique a pour valeur $L_s = 7,2\text{mH}$, montrer que la réactance synchrone X_s de la machine s'exprime en fonction de la fréquence de rotation n du rotor par la relation :

$$X_s = k_x \cdot n \text{ avec } k_x = 3,0 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{min.tr}^{-1}$$
- Exprimer la puissance P absorbée par la machine synchrone en fonction de E , I et l'angle ψ . Montrer que l'expression du moment du couple électromagnétique T est :

$$T = k_T \cdot I \cdot \cos\psi \text{ avec } k_T = 8,0 \text{ N.m.A}^{-1}$$

2. Fonctionnement en moteur « à couple constant » (de $n = 0$ à $n = 400 \text{ tr. min}^{-1}$)

Dans ce mode de fonctionnement, l'angle ψ est maintenu constant : $\psi = 0$. La tension d'alimentation V peut varier entre 0 et $V_n = 140V$.

On considère le point de fonctionnement correspondant au point A de la caractéristique $T(n)$ (figure 5 du document réponse) pour lequel le couple développé est égal au couple nominal $T_n = 570N.m$, la fréquence de rotation du moteur est imposée par la commande et vaut $n = 400 \text{ tr.min}^{-1}$.

Le schéma électrique équivalent à une phase du moteur synchrone est représenté figure 2. On souhaite déterminer la tension d'alimentation permettant d'obtenir ce point de fonctionnement.

On rappelle pour cela les équations caractéristiques du moteur synchrone :

$$\begin{aligned} E &= k_E \cdot n \text{ avec } k_E = 0,28 \text{ V.min.tr}^{-1} \\ X_s &= k_x \cdot n \text{ avec } k_x = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ f.min.tr}^{-1} \\ T &= k_T \cdot I \cdot \cos\psi \text{ avec } k_T = 8,0 \text{ N.m.A}^{-1} \end{aligned}$$

- Calculer l'intensité efficace I du courant absorbé par une phase du moteur.
- Calculer la f.é.m E et le produit $X_s \cdot I$.
- Représenter sur la figure 6 du document réponse, le diagramme vectoriel faisant apparaître les vecteurs représentatifs de $\underline{E}$ et $jX_s I$ (échelle : 1 cm pour 10V). En déduire le vecteur représentatif de $\underline{V}$ et la valeur efficace V .

3. Fonctionnement en moteur « en mode défluxage » (à partir de $n = 400 \text{ tr.min}^{-1}$)

Dans ce mode, la tension V est constante et égale à $V_n = 140V$. Le fonctionnement en survitesse est obtenu par défluxage. La machine étant à aimants permanents, le défluxage est réalisé en faisant varier la valeur de l'angle ψ réglable entre 0 et -90° . Le schéma électrique équivalent à une phase du moteur synchrone est représenté figure 2.

On souhaite entraîner le moteur à la fréquence de rotation $n = 1000 \text{ tr.min}^{-1}$ l'intensité du courant étant limitée à $I = I_n = 71$

A.

- Calculer la f.é.m. E et le produit $X_s \cdot I$ correspondant à ce point de fonctionnement.
- Représenter sur la figure 7 du document réponse, le diagramme vectoriel faisant apparaître les vecteurs représentatifs de $\underline{E}$, $jX_s I$ et $\underline{V}$ (échelle : 1 cm pour 20V).
- Indiquer le sens et la direction du vecteur représentatif du courant 1 sur le même diagramme. En déduire la valeur de ψ .
- Calculer le couple T disponible à la fréquence de rotation $n = 1000 \text{ tr.min}^{-1}$ et représenter le point B correspondant sur la caractéristique $T(n)$ de la figure 5 du document réponse.

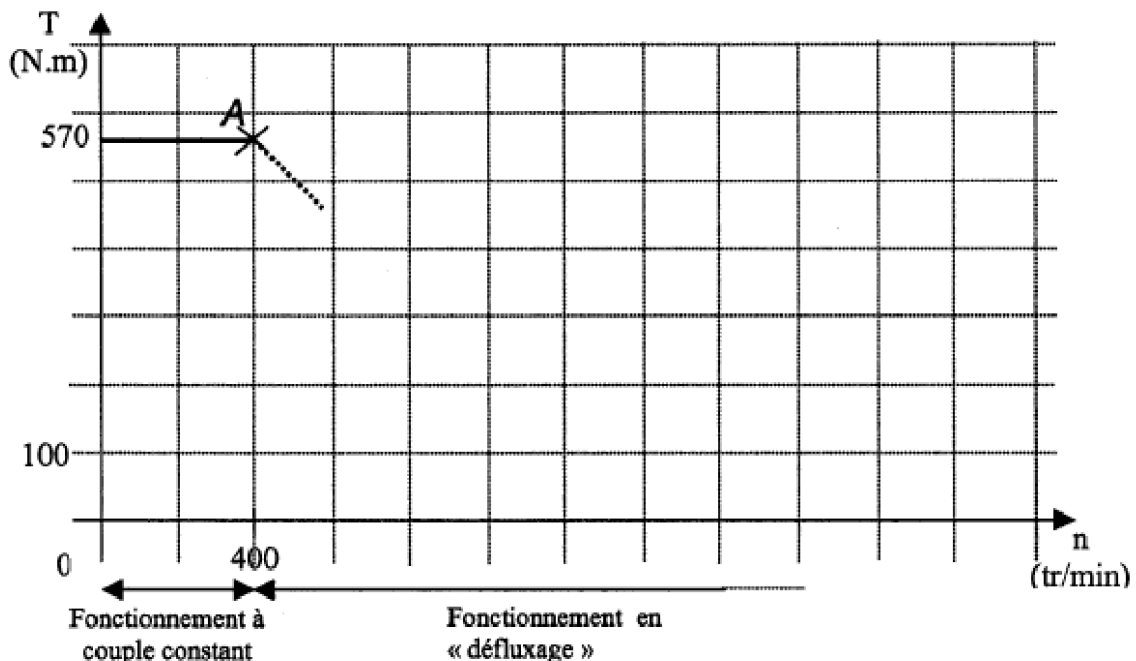


Figure 5:
Caractéristique $T(n)$ du couple de la machine synchrone

1 Exercice 9: *BTS 2005 Métro (Solution 9:)*

Etude de l'alternateur triphasé en régime sinusoïdal au fonctionnement nominal.

La plaque signalétique de l'alternateur triphasé donne les indications nominales suivantes

$$S_n = 40\,000 \text{ kVA}$$

$$N_n = 1500 \text{ tr/min}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$U_n = 11,0 \text{ kV} \quad \text{couplage étoile sans neutre.}$$

La régulation de l'excitation de l'alternateur (figure A1) permet de maintenir constants le facteur de puissance ($k = \cos \phi_a = 0,80$) et la valeur efficace des tensions.

La fréquence de rotation est constante.

La machine est non-saturée.

L'angle ϕ_a est tel que l'alternateur fournit de la puissance réactive au réseau.

La figure A2 représente le modèle équivalent par phase de l'alternateur, V_a désignant la tension simple.

La réactance synchrone X_a par phase est telle que le produit $(X_a \cdot I_{an})$ calculé au fonctionnement nominal a pour valeur 6600 V.

La réactance synchrone est constante, la résistance des enroulements statoriques est négligée.

1. Calculer le nombre $2p$ de pôles de l'alternateur.
2. Calculer la puissance active P_n et la puissance réactive Q_n fournies au régime nominal.
3. Exprimer l'intensité nominale I , du courant en ligne. Calculer sa valeur numérique.
4. Calculer la valeur de X_a ; en déduire celle de L_a .
5. Ecrire en notation complexe la relation liant les grandeurs $\underline{E}_a$, X_a , $\underline{I}_a$ et $\underline{V}_a$.
6. La tension simple $v_a(t)$ est choisie comme référence des phases :
 - a. Pour le fonctionnement nominal, tracer le vecteur $\underline{V}_a$, la direction et le sens du courant $\underline{I}_a$ puis le vecteur $\underline{E}_a$ (on adoptera l'échelle 1000 V/cm).
 - b. Relever sur le diagramme la valeur efficace E_{an} , ainsi que l'angle θ_{an} que font les vecteurs $\underline{E}_a$ et $\underline{V}_a$. Donner le nom de cet angle.

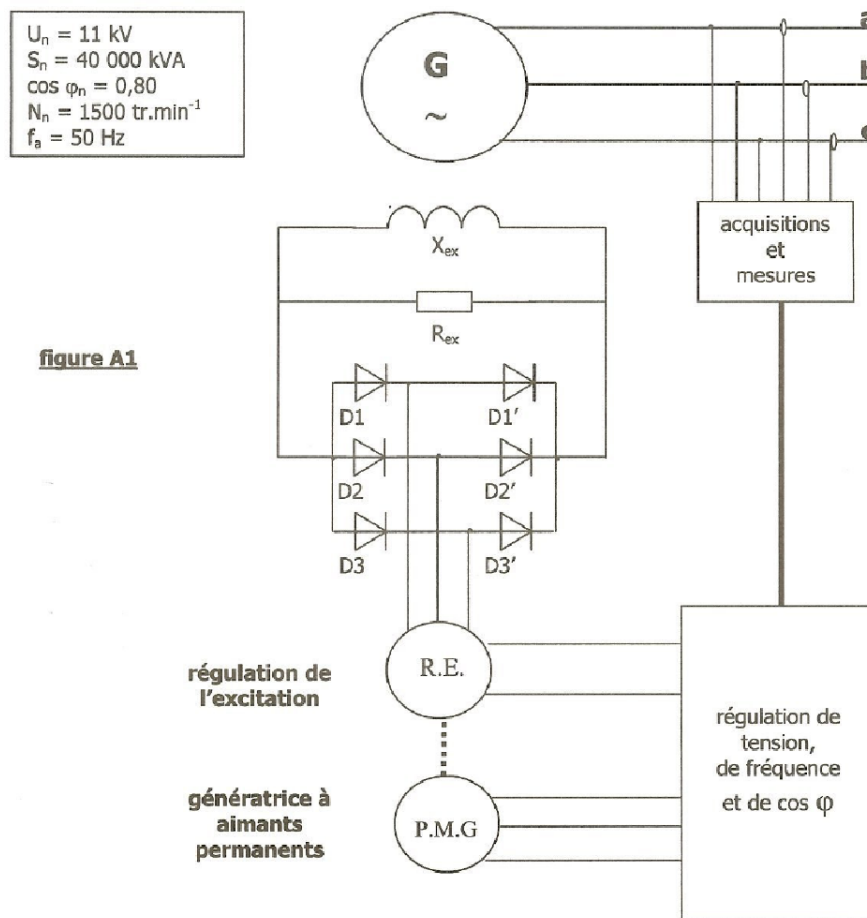
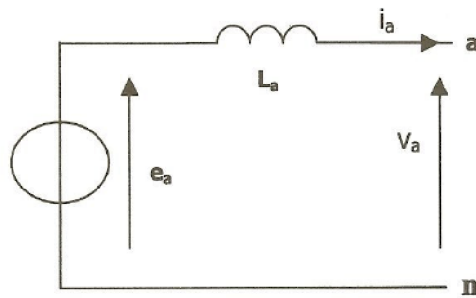


figure A1

figure A2

on pose $X_a = L_a \cdot \omega$ **1 Exercice 10: BTS 2000 Métro (Solution 10:)****Etude de l'alimentation électrique d'un Airbus A320**

En vol, la génération électrique est assurée par deux alternateurs principaux de 90 kVA qui délivrent un système triphasé de tensions 115V/200V, 400Hz. **La fréquence est maintenue constante** grâce à une régulation hydraulique de la vitesse de rotation des alternateurs.

On s'intéressera à l'étude de l'alternateur non saturé

Le réseau de bord d'un avion est alimenté en **400 Hz**.

Pour l'Airbus A320 le constructeur donne :

Tension nominale V_N/U_N	115 V / 200 V
Nombre de phases	3
Puissance apparente nominale S_N	90 kVA
Fréquence nominale f_N	400 Hz
Vitesse de rotation nominale n_N	$12,0 \times 10^3$ tr/min
Facteur de puissance	$0,75 < \cos\phi < 1$
Résistance d'induit (par phase) R_s	10 mΩ

L'induit est couplé en **étoile**.

On a effectué deux essais à vitesse nominale constante : n_N

- essai en génératrice à vide : la caractéristique à vide $E_v(I_e)$ où E_v est la valeur de la f.e.m. induite à vide dans un

enroulement et I_e l'intensité du courant inducteur, la caractéristique tracée est une droite tracée telle que à $I_e=0$ correspond $E_v=0$ et à $I_e=92$ A correspond $E_v=400$ V.

- essai en court circuit : dans le domaine utile, la caractéristique de court circuit est la droite d'équation $I_{cc} = 3,07 I_e$, où I_{cc} est la valeur efficace de l'intensité de court circuit dans un enroulement du stator.

1. On s'intéresse au fonctionnement nominal :

- Calculer la pulsation des tensions de sortie de l'alternateur.
- Déterminer le nombre de paires de pôles de la machine.
- Calculer la valeur efficace du courant d'induit nominal I_N .

2. On suppose l'alternateur non saturé. Pour décrire son fonctionnement on utilise le modèle équivalent par phase représenté ci-dessous (figure 2).

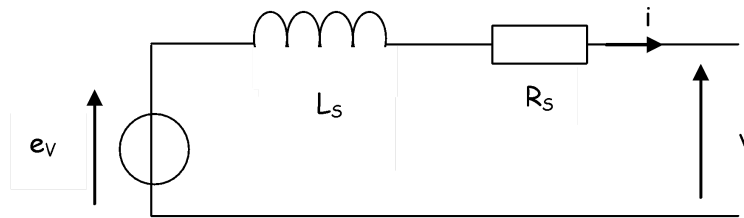


Figure 2

- a. Calculer l'impédance synchrone Z_s de l'alternateur.
 - b. En déduire la réactance synchrone $X_s = L_s \omega$.
3. Dans toute la suite du problème, on néglige l'influence des résistances statoriques R_s .
- a. Déterminer l'intensité I_{e0} du courant inducteur pour un fonctionnement à vide sous tension nominale.
 - b. La charge est triphasée équilibrée, l'alternateur fonctionne dans les conditions nominales, il débite son courant nominal I_N , en retard sur la tension.
Pour $\cos \phi = 0,75$, représenter le diagramme vectoriel des tensions et en déduire la valeur de la f.e.m. induite E_v .
4. On s'intéresse au réglage de l'excitation de l'alternateur lorsqu'il débite son courant nominal I_N . Déterminer la valeur du courant d'excitation qui permet de maintenir $V = 115 \text{ V}$ pour un fonctionnement à $\cos \phi = 0,75$.

1 Exercice 11 : *BTS 1999 Métro (Solution 11:)*

Compensation de puissance réactive à l'aide d'une machine synchrone

Pour fonctionner, de nombreuses charges nécessitent que le courant qui les traverse soit en retard sur la tension à leurs bornes, on dit alors qu'elles consomment de la puissance réactive. L'étude suivante porte sur un moteur synchrone, utilisé pour compenser l'énergie réactive consommée par l'éclairage d'un immeuble de bureaux.

II.1. ETUDE DES PERTURBATIONS

Dans une entreprise, les bureaux sont situés dans un bâtiment, qui se trouve à 850 m du local technique contenant le transformateur d'alimentation générale. La liaison s'effectue en 230 V/400 V triphasé, par l'intermédiaire de 3 câbles de 35 mm² de section pour les phases et de 10 mm² de section pour le neutre. L'éclairage est réalisé par des lampes fluorescentes qui correspondent en régime permanent à une charge triphasée équilibrée de 50 kW avec un facteur de puissance $k = 0,76$ inductif. On rappelle que les courants seront considérés comme sinusoïdaux.

Etude des pertes en ligne

II.1.1. Intensités

On suppose que la chute de tension dans les câbles a été prise en compte et que la tension composée pour le bâtiment de bureaux est bien de 400 V.

- Déterminer l'intensité efficace I dans chaque conducteur de phase.
- Quelle est l'intensité efficace du courant I_N dans le conducteur de neutre ?

II.1.2. Résistance des câbles

Les câbles sont des conducteurs cylindriques en aluminium, de résistivité en conditions normales de fonctionnement : $\rho = 2,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Calculer la résistance totale de chacun des câbles.

Par la suite on prendra les valeurs suivantes, qui prennent en compte les résistances des connexions : phase : 1,0 Ω , neutre : 2,5 Ω .

II.1.3. Pertes par effet Joule

Déterminer les pertes totales pour l'ensemble des câbles qui alimentent le bâtiment pour cette valeur du facteur de puissance.

II.2. CORRECTION DES PERTURBATIONS

Pour améliorer le facteur de puissance du bâtiment on décide d'utiliser un moteur synchrone placé dans le bâtiment. Ce moteur fonctionnera en compensateur synchrone automatique, de manière à ce qu'à chaque instant, le facteur de puissance du bâtiment soit égal à 1.

Les caractéristiques électriques du moteur sont les suivantes : 4 pôles, couplage étoile pour un fonctionnement sur le réseau triphasé 230 V/400 V, $P_{\text{nominale}} = 50 \text{ kW}$. Pour l'étude il

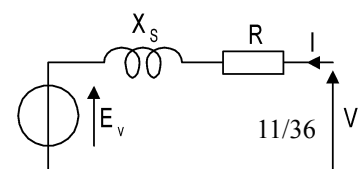


figure 4

sera modélisé suivant la méthode de la réactance synchrone (modèle linéaire dit de "Behn-Eschenburg"), conformément à la figure 4 correspondant à une phase de la machine dont les enroulements sont supposés couplés en étoile ; dans cette hypothèse on peut écrire $E_v = \beta I_e$ avec $\beta = 0,83 \times 10^3 \text{ V.A}^{-1}$.

II.2.1. Paramètres du modèle

Pour déterminer les paramètres du modèle de la machine synchrone, on a réalisé les essais suivants en fonctionnement alternateur.

II.2.1.1. Caractéristique à vide

On a relevé la valeur efficace de la tension à vide E_v entre phase et neutre en fonction du courant dans le circuit d'excitation I_e .

$I_e(\text{A})$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$E_v(\text{V})$	0	41,5	83	124	166	207

A partir de ce tableau de mesures justifier la valeur du coefficient $\beta = 0,83 \times 10^3 \text{ V.A}^{-1}$.

II.2.1.2 Essais en court-circuit

On effectue un court-circuit symétrique sur les trois phases, on obtient les deux essais suivants :

$$I_e = 0 \text{ A}, I_{cc} = 0 \text{ A}, \quad I_e = 0,38 \text{ A}, I_{cc} = 70 \text{ A}.$$

Par ailleurs, une mesure de la résistance entre phase et neutre a donné $R = 0,1 \Omega$.

A partir de ces résultats, justifier la valeur de $X_s = 4,5 \Omega$.

Pour la suite, on négligera la résistance R devant la réactance synchrone X_s , ainsi que les pertes mécaniques et les pertes dans le fer.

II.2.2. Compensateur synchrone

La machine fonctionne en compensateur synchrone : elle ne fournit aucune puissance mécanique mais elle fonctionne à vide en absorbant un courant en avance de $\pi/2$ rad sur la tension simple correspondante. Elle fournit donc une puissance réactive qui compense celle consommée par les lampes.

II.2.2.1. Déterminer à l'aide des hypothèses du II.1 la puissance réactive totale consommée par les lampes. En déduire la valeur efficace de l'intensité du courant qui doit circuler dans la machine pour fournir cette même puissance réactive.

II.2.2.2. Donner la relation entre $\underline{V}$, $\underline{E}_v$ et $\underline{I}$, puis représenter ces grandeurs sur un diagramme de Fresnel.

II.2.2.3. Déterminer la valeur du courant d'excitation correspondant à ce fonctionnement.

II.2.3. Amélioration du facteur de puissance à l'aide de la machine synchrone

II.2.3.1. La tension composée d'alimentation à 400 V est maintenue. La machine fonctionnant en compensateur synchrone, en parallèle avec la charge (l'ensemble du bâtiment) elle fournit, comme précédemment, une puissance réactive égale à celle qui est consommée par les lampes. Déterminer la nouvelle valeur du courant dans les câbles de phase.

II.2.3.1. Déterminer la nouvelle valeur des pertes en ligne.

II.2.3.1. Proposer une ou plusieurs solutions pour diminuer encore ces pertes en ligne.

1 Exercice 12: **BTS 1984: (Solution 12:)**

On dispose d'un moteur synchrone à 8 pôles, alimenté par un réseau de caractéristiques constantes: 3800 V- 50 Hz.

La puissance nominale du moteur est $P_N = 165 \text{ kW}$ et il peut supporter une intensité maximale $I_{\max} = 50 \text{ A}$.

Sauf dans la question 5, la résistance d'induit et les pertes magnétiques et mécaniques sont supposées négligeables.

La caractéristique à vide, relevée entre bornes, passe par les points suivants.

$I_e(\text{A})$	0	0.5	0.91	1.15	1.5	2	3	4
$E(\text{V})$	0	2000	3200	4000	4800	6000	8000	10000

L'induit, monté en étoile, a une réactance synchrone par phase, supposée constante $X_{\text{ph}} = 65.8 \Omega$.

1. Le moteur travaille dans ses conditions d'excitation optimale ($\cos \phi = 1$) . Il est traversé par un courant égal à la moitié du courant maximal. Déterminer la f.e.m. E_v entre les bornes, l'excitation I_e , la puissance P , le couple T et le décalage polaire θ correspondant.
2. Déterminer par 6 points et tracer les courbes $I = f(I_e)$ et $\cos \phi = f(I_e)$ correspondant à une puissance constante égale à la puissance nominale. On précisera les points correspondant à des fonctionnements particuliers.
3. Pour l'intensité absorbée maximale, quelles sont les condensateurs qui, montés en triangle, vont remplacer le moteur fonctionnant en compensateur synchrone.

- On associe le moteur synchrone à une installation absorbant une puissance $P_1=600$ kW avec un facteur de puissance $\cos\phi_1=0.6$ AR que l'on désire améliorer. Quel est le nouveau facteur de puissance $\cos\phi_2$ de l'ensemble de l'installation plus moteur synchrone, ce dernier travaillant à puissance nominale et avec son intensité maximale? Quelle doit être alors l'excitation du moteur synchrone.
- On ne néglige plus les pertes et la résistance d'induit. On donne $P_{mec} = 1$ kW; $P_{fer} = 2$ kW ; $R=0.8 \Omega$ entre bornes. L'excitation est fournie par une excitatrice en bout d'arbre, de rendement $\eta = 80\%$ sous une tension $U_E = 600$ V. Calculer le rendement du moteur synchrone dans ces conditions.

1Exercice 13: Utilisation du diagramme de Behn-Eschenburg (Solution 13:)

On considère un alternateur triphasé à pôles lisses, branché en étoile, de fréquence 50 Hz et de vitesse de rotation 1500 tr / min.

La machine a donné aux essais les valeurs suivantes:

- La résistance de l'induit par phase (à température de régime) $R=0.2 \Omega$.
- La caractéristique en court-circuit qui passe par le point $J=6$ A et $I_{cc} = 225$ A.
- La caractéristique à vide à 1500 tr/min, E' étant la tension entre phases

J(A)	2	4	6	8	12	14	16
E'(V)	952.6	1853	2477	2892	3516	3706	3845

- Déterminer, pour chaque valeur du courant d'excitation, l'impédance interne et la réactance synchrone (par phase) de l'alternateur. Représenter la courbe $Z=f(J)$.
- Représenter le diagramme de Behn-Eschenburg pour les valeurs suivantes: $J = 14$ A, $I = I_N = 150$ A (courant nominal), $\cos\phi=0.8$. En déduire, pour ce fonctionnement la chute de tension et représenter la caractéristique externe $V=f(I)$, à $\cos\phi=0.8$.
- Faire des remarques sur la précision de ce diagramme.

1Exercice 14: utilisation du diagramme de Potier. (Solution 14:)

Un alternateur triphasé, monté en étoile, a les caractéristiques nominales suivantes: 23 kVA, 127/220 V, 1500 tr/min, 50 hz.

Lors des essais, on a relevé les valeurs suivantes :

- La caractéristique à vide à 1500 tr/min:

J(A)	1	2	3.5	7	8	10	15
U_o (V)	86.6	160	214	260	268	278	291

- La caractéristique en court-circuit qui passe par le point : $J=6$ A et $I_{cc}=60$ A .
- Dans un fonctionnement en alternateur à 1500 tr/min, avec une charge triphasée équilibrée purement inductive, on a mesuré: $U=216.5$ V, $I=50$ A et $J=11.5$ A .
- La résistance mesurée à chaud est $R=0.19 \Omega$.

On demande:

- La réactance de fuites par phase et le coefficient d'équivalence de Potier.
- Le courant d'excitation permettant un débit de 60 A avec un facteur de puissance de 0.8 sous une tension composée de 220 V, la charge étant triphasée et équilibrée.

1Exercice 15: Fonctionnement d'un moteur synchrone couplé sur le réseau. (Solution 15:)

Un alternateur triphasé, monté en étoile, a les caractéristiques nominales suivantes: 23 kVA, 127/220 V, 1500 tr/min, 50 hz.

Lors des essais, on a relevé les valeurs suivantes :

- La caractéristique à vide à 1500 tr/min:

J(A)	1	2	3.5	7	8	10	15
U_o (V)	86.6	160	214	260	268	278	291

- La caractéristique en court-circuit qui passe par le point : $J=6$ A et $I_{cc}=60$ A .

On utilisera pour son étude le diagramme de Behn -Eschenburg et on négligera la résistance du stator. On demande:

- La réactance synchrone par phase correspondant à une excitation de 10 A.
- La machine fonctionnant en compensateur synchrone (on la suppose parfaitement à vide.),déterminer le courant débité par le réseau pour une excitation de 10 A.
- Calculer la capacité de chacun des trois condensateurs qui, branchés en triangle sur le même réseau fourniraient la même puissance réactive.
- L'excitation étant toujours réglée à 10 A, le moteur entraîne un compresseur qui lui oppose un couple résistant dont le moment a pour valeur 72 N.m. On admet que le rendement du moteur est alors de 0,95. Déterminer le courant débité par le réseau.
- Déterminer l'excitation pour que le moteur entraînant le compresseur, fournisse la même puissance réactive que dans la deuxième question.

- Le couple résistant du compresseur devenant les 8/5 de sa valeur précédente, on règle l'excitation pour que le moteur ne mette en jeu aucune puissance réactive. Déterminer le courant d'excitation et le courant débité par le réseau.

1Exercice 16: Machine Synchrone (3EI) (Solution 16:)

Une machine synchrone tétrapolaire $s=10$ kVA, 127/220 V, 50 Hz, est couplée sur un réseau triphasé 220 V, 50 Hz. Sa caractéristique à vide $E_v = f(I_e)$ relevée entre phases à la vitesse de synchronisme :

I_e (A)	3.5	5	8.5	10	15	20
E_v (V)	113	150	220	242	296	330

Un essai en court circuit donne $I_{cc} = 20$ A pour $I_e = 5.8$ A. Les pertes sont considérées comme négligeables.

Fonctionnement en alternateur :

- Quel est le couplage du stator ?
- Quel est le courant nominal d'induit de cette machine ?
- Quelle est sa fréquence de synchronisme et sa vitesse nominale ?
- Calculer sa réactance synchrone cyclique par phase pour $I_e = 15$ A ? On conservera cette valeur pour la suite du problème.
- La machine étant à vide, quelle est la valeur de I_{eo} pour un courant d'induit de 0 A.
- La machine étant à vide ($P = 0$), calculer I pour $I_e = 5$ A et pour $I_e = 20$ A, calculer pour chaque cas la valeur de Q échangée avec le réseau et son signe.
- L'alternateur fournissant $P = 5$ kW au réseau, déterminer I , ϕ , θ , T et Q pour trois valeurs de $I_e = 3.5$ A, 9.3A, 20 A. Préciser les valeurs de I et de I_e pour $\theta = \pi/2$.

Fonctionnement en moteur synchrone :

On adopte une réactance synchrone par phase de 3.3 Ω .

- On exerce sur l'arbre un couple résistant de 31.83 mN, calculer I , ϕ , θ , T et Q pour trois valeurs de $I_e = 3.5$ A, 9.3 A, 20 A. Préciser la valeur de I_e qui provoque le décrochage de la machine.
- Fonctionnement en compensateur synchrone : le moteur à vide est couplé sur le réseau EDF avec $I_e = 20$ A, calculer la puissance réactive qu'il fournit ?
Il est destiné à relever le $\cos \phi$ d'une installation comprenant un four de 3 kW et un moteur asynchrone triphasé fournissant une puissance de 6 kW, de rendement 0.818, de $\cos \phi = 0.707$, calculer le $\cos \phi$ global de l'installation ainsi que le courant en ligne que doit fournir l'EDF. Calculer la batterie de condensateurs (donner la valeur du condensateur d'une phase dans le cas d'un couplage étoile et triangle) que remplace ce moteur synchrone.
- Ce moteur synchrone est couplé sur un réseau triphasé 110 V/ 25 Hz, il fournit un couple moteur de 31.83 mN, calculer I , $\cos \phi$, P et la vitesse pour un courant I_e de 20 A.

1Exercice 17: Etude d'une machine synchrone triphasée tétrapolaire couplage étoile, $f_n=50$ Hz (3EI) (Solution 17:)

Essai à vide réalisé à 1500 tr/mn :

E_v par phase (V)	540	1040	1440	1730	1900	2030	2120	2200
I_e (A)	2	4	6	8	10	12	14	16

Essai en court circuit réalisé à 1500 tr/mn : pour $I_{cc} = 225$ A, on relève $I_e = 6$ A.

- Montrer que la caractéristique en court circuit est une droite indépendante de la vitesse.
- Dans l'hypothèse de B.E, calculer $L\omega$ en fonction de I_e et tracer cette courbe, qu'en concluez-vous sur la validité de cette hypothèse ?
- On associe l'alternateur à une charge triphasée équilibrée purement inductive ($\cos \phi = 0$), on relève $I = 150$ A, $V = 1800$ V et $I_e = 15$ A, en déduire $L\omega$, cette valeur sera conservée par la suite.
- Cet alternateur est couplé sur un réseau triphasé 3300 V, 50 Hz et fournit 860 KW à $\cos \phi = 1$, $L\omega = 2.4 \Omega$ pour une phase, la résistance entre bornes est de 0,4 Ω , calculer I et I_e . On pourra négliger la résistance devant $L\omega$ en le justifiant.
- On conserve la même puissance active transférée, quelle est la valeur de I_e pour un $\cos \phi$ de 0,8 AV.
- Rendement : on entraîne l'alternateur non excité à une vitesse de 1500 tr/mn en fournissant 1800 W; puis on le lance à 1600 tr/mn et on l'abandonne à lui-même, il ralentit et passe à 1500 tr/mn avec une accélération angulaire de -0.191 rad/s^2 , en déduire J ; on recommence en l'excitant avec la valeur de I_e calculée à la question 4) lancement à 1600 tr/mn, puis on l'abandonne, il passe alors à la vitesse de 1500 tr/mn avec une accélération de -1.27 rad/s^2 , en déduire les pertes fer. I_e étant fournie par une source extérieure, calculer le couple mécanique de l'entraînement dans les conditions de la question 4).
- On couple cette machine synchrone sur le réseau 3300 V, 50 Hz en fonctionnement moteur, le couple utile est de 3000 Nm, le couple de pertes fer et mécaniques étant de 76,2 Nm, r étant négligée.
 - Calculer la puissance électromagnétique.

- b. Calculer le qui rend I minimale.
8. La machine synchrone étant couplée sur le même réseau, en fonctionnement moteur à puissance constante (différente de la valeur précédente) :
 - a. $I = 150$ A, $\cos \phi = 0,8$ AV, calculer I_e .
 - b. $I = 150$ A, $\cos \phi = 0,8$ AR, calculer I_e .
 - c. Calculer le qui provoque le décrochage.
9. Même réseau, même fonction, même couple de pertes fer et mécaniques, même couple utile qu'à la question 7) et $\cos \phi = 1$, U passe à 3630 V et f à 55 Hz, calculer Ω , P , E_v , I , I_e ?

1Exercice 18: Machine Synchrone Application du diagramme bipolaire simplifié (3EI) (Solution 18:)

Une machine synchrone à 6 pôles fonctionne en moteur synchrone triphasé. La résistance de chaque enroulement du stator est négligée, la réactance cyclique synchrone de chaque phase est constante et égale à 8Ω , le couplage choisi est étoile, la tension entre phases du réseau triphasé, équilibré, direct est 200 V, 50 Hz, on règle l'excitation du moteur pour que le facteur de puissance soit égal à l'unité, le moteur développe une puissance de 5 kW, ses pertes fer et mécaniques étant négligées.

Première partie.

On demande :

1. La vitesse en tr /mn
2. Le courant fourni par le réseau
3. Le couple moteur
4. La fem E_v
5. θ l'angle de décalage interne

Deuxième partie.

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 restant la même. Déterminer :

1. Le déphasage du courant sur la tension et le sens de ce déphasage.
2. Le courant I absorbé par le moteur.
3. La fem E_v du moteur.

Troisième partie.

Déterminer graphiquement quelques points du graphe $I = f(E_v)$ qui exprime le courant I absorbé par le moteur en fonction de la fem E_v par phase de la machine (ou encore du courant d'excitation qui lui est proportionnel car la machine est supposée non saturée), quand la puissance active échangée avec le réseau est de 4 kW. Ces points seront choisis de façon à donner une idée générale de l'allure du graphe ($\cos \phi = 1$, $\cos \phi = 0.8$ AR, $\cos \phi = 0.8$ AV, décrochage de la MS).

Quatrième partie.

Le moteur fournissant une puissance de 5 kW avec l'excitation correspondant à un facteur de puissance de 0.8 AV, quelles sont les valeurs prises par le courant absorbé I et le facteur de puissance $\cos \phi$ lorsque :

1. La tension varie de $\pm 20\%$ autour de $U_n = 200$ V, la fréquence restant constante égale à 50 Hz, on admettra d'une part que le couple résistant de la charge mécanique entraînée est proportionnel au carré de la vitesse et que d'autre part les variations se produisent assez lentement pour que la MS ne décroche pas !
2. La fréquence varie de $\pm 10\%$ autour de 50 Hz, avec les mêmes hypothèses que précédemment.
3. Le couple résistant restant maintenant constant et égal à 47.746 mN $\forall \Omega$, $U = 200$ V, la fréquence f varie de 10% autour de 50 Hz, valeurs de I et de $\cos \phi$.
4. Le couple résistant restant maintenant constant et égal à 47.746 mN $\forall \Omega$, U/f étant constant et égal à 4, comment varient I et $\cos \phi$ quand la fréquence varie.

1Exercice 19: BTS Etk 2011 Métro Compagnie Nationale du Rhone (Solution 19:)

Détermination de la puissance électrique disponible

Dans cette partie, on étudie les caractéristiques des alternateurs permettant d'effectuer la conversion de la puissance mécanique disponible, en puissance électrique.

On suppose que les alternateurs sont couplés au réseau qui impose une tension composée de valeur efficace 6,3 kV, et de fréquence 50 Hz.

Les grandeurs, intensités et tensions, sont supposées purement sinusoïdales.

Conformément à la partie A, et compte-tenu du rendement des liaisons mécaniques, on admet que les puissances disponibles sur l'arbre des alternateurs, notées P_1 et P_2 sont:

$P_1 = 2,11$ MW pour le débit Q_1 ;

$P_2 = 2,96$ MW pour le débit Q_2 .

Le tableau 2 est un extrait de la documentation sur l'alternateur fournie par la Compagnie Nationale du Rhône. On précise que les enroulements du stator de l'alternateur sont couplés en étoile.

Dénomination	Symbole	Unité	Valeur
Puissance nominale apparente	S_n	kVA	3200
Puissance active nominale	P_n	MW	2.88
Tension nominale entre phases	U_n	kV	6.3
Vitesse nominale	n	tour.min ⁻¹	750
Résistance d'un enroulement du stator	R	mΩ	80
Résistance de l'enroulement d'excitation	R_e	Ω	0.12

Tableau 2

B.1. Caractéristiques générales de l'alternateur

B.1.1. Calculer le nombre de paires de pôles noté p de l'alternateur.

Pour le point de fonctionnement nominal de l'alternateur, calculer :

B.1.2. la valeur efficace, notée I_n , du courant dans un enroulement du stator ;

B.1.3. le facteur de puissance, noté f_n ;

B.1.4. la puissance réactive notée Q_n .

B.2. Rendement et pertes

Le tableau 3 fourni par la CNR indique le rendement (exprimé en pourcentage) de chaque alternateur en fonction de l'évolution de sa puissance apparente et de son facteur de puissance.

Puissance KVA $\cos \phi$	800	1600	2400	3200
1	94,7	96,7	97,3	97,5
0,9	93,9	96,3	96,7	97,0

Tableau 3

B.2.1. D'après les tableaux 2 et 3, calculer les pertes totales de l'alternateur en fonctionnement nominal.

B.2.2. Calculer les pertes joules dans l'induit pour un courant de valeur efficace 293 A.

B.2.3. Calculer les pertes joules dans l'inducteur pour un courant d'excitation de 405 A.

B.2.4. Quel pourcentage des pertes totales représentent les pertes joules de l'alternateur en fonctionnement nominal? Quelle est l'origine des autres pertes ?

À partir des données du tableau 3, on a tracé (figure 4) la courbe du rendement d'un alternateur en fonction de la puissance mécanique à facteur de puissance unitaire.

Rendement d'un alternateur (%) en fonction de la puissance mécanique

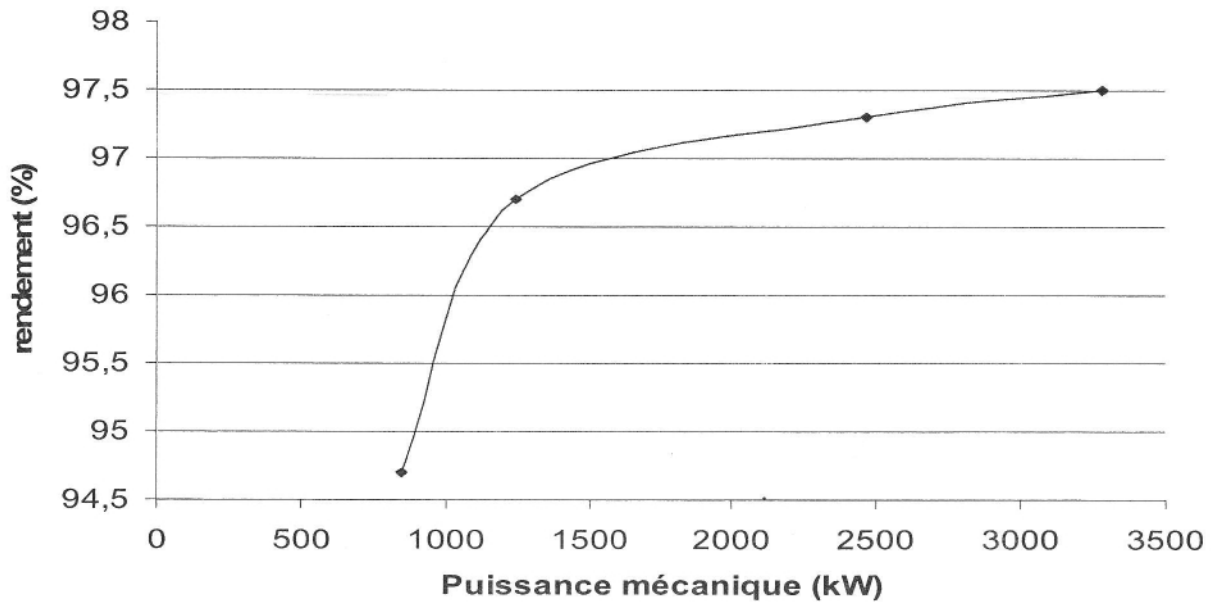


Figure 4

B.2.5 À partir de cette courbe, estimer la puissance électrique produite par la PCH pour chaque débit (Q_1 et Q_2).

B.3. Réglage du point de fonctionnement électrique

L'alternateur choisi par la CNR est une génératrice synchrone à pôles saillants. Bien que conçu pour des machines à pôles lisses, le modèle de Behn-Eschenburg conduit, dans cet exemple, à des résultats comparables à ceux obtenus à partir de modèles plus élaborés. On cherche à montrer, à débit et à puissance donnés, l'influence du réglage du courant inducteur sur le facteur de puissance.

Le modèle équivalent par phase de la génératrice en régime permanent est représenté par le schéma de la figure 5.

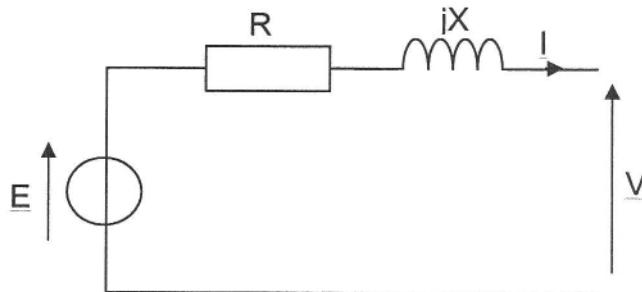


Figure 5

B.3.1. Quelle est la valeur de R ?

B.3.2. Décrire le protocole expérimental permettant d'obtenir la caractéristique à vide de l'alternateur présentée dans l'annexe 1.

B.3.3. À l'aide des deux courbes présentées en annexe 1, calculer la valeur de la réactance X . Chaque étape du calcul sera soigneusement expliquée.

B.3.4. Justifier que, dorénavant, le modèle retenu pour une phase de la génératrice est celui de la figure 6.

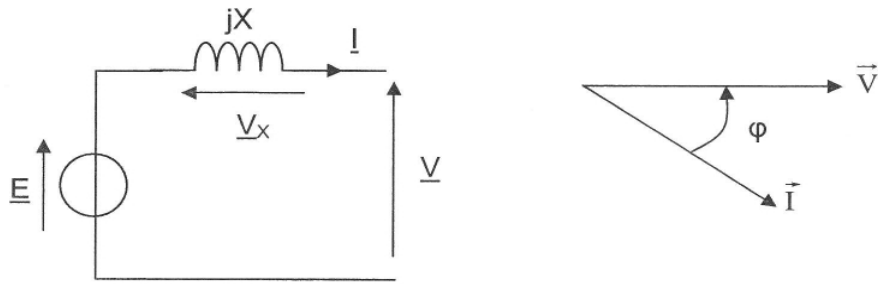


Figure 6
Figure 6

On prendra pour la suite $X = 12 \Omega$

B.3.5. On cherche à déterminer le réglage du courant inducteur pour les deux points de fonctionnement suivants :

Point A : $Q_1 = 50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $P = 2,05 \text{ MW}$ à $\cos\phi = 1$

Point B : $Q_1 = 50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $P = 2,05 \text{ MW}$ à $\cos\phi = 0,9$ (AR)

B.3.5.1. Construire les deux diagrammes de Behn-Eschenburg de l'alternateur sur le document réponse (Faire figurer les vecteurs tensions $\vec{V}$, $\vec{V}_x$ et $\vec{E}$, ainsi que la direction du vecteur courant $\vec{I}$). La tension V sera orientée suivant l'axe origine des phases.

B.3.5.2. Déterminer, dans chaque cas, la valeur efficace de la fem E du modèle de Behn- Eschenburg.

B.3.5.3. Déterminer dans chaque cas, en se référant à l'annexe 1, la valeur le du courant d'excitation.

C.1. Ondulation du courant d'excitation

C.1.1. Déterminer la période et la fréquence de la tension v_e .

C.1.2. La valeur moyenne de la tension V_e est donnée par l'expression :

$$\langle v_e \rangle = \frac{5}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{5}\right) \cdot V_M \quad \text{où } V_M \text{ est la valeur maximum de la tension } v_e.$$

Calculer la valeur moyenne de la tension v_e .

C.1.3. Pour estimer l'ondulation de la fem e du modèle de Behn-Eschenburg résultant de l'ondulation de la tension v_e , on fait l'hypothèse du premier harmonique, c'est-à-dire que l'on néglige les harmoniques de rangs supérieurs à 1. Ainsi, on peut écrire :

$$v_e(t) = V_0 + V_{1M} \cos(\omega_1 t)$$

Calculer la valeur de la pulsation ω_1 . Préciser les valeurs de V_0 et de V_{1M} .

Conformément à la figure 9, l'inducteur est modélisé par la mise en série d'une résistance $R_e = 0,12 \Omega$ et d'une inductance propre $L_e = 0,33 \text{ H}$.

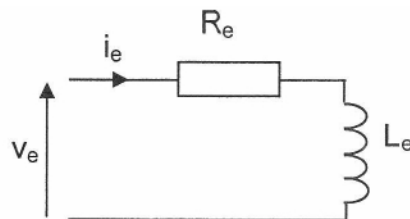


Figure 9

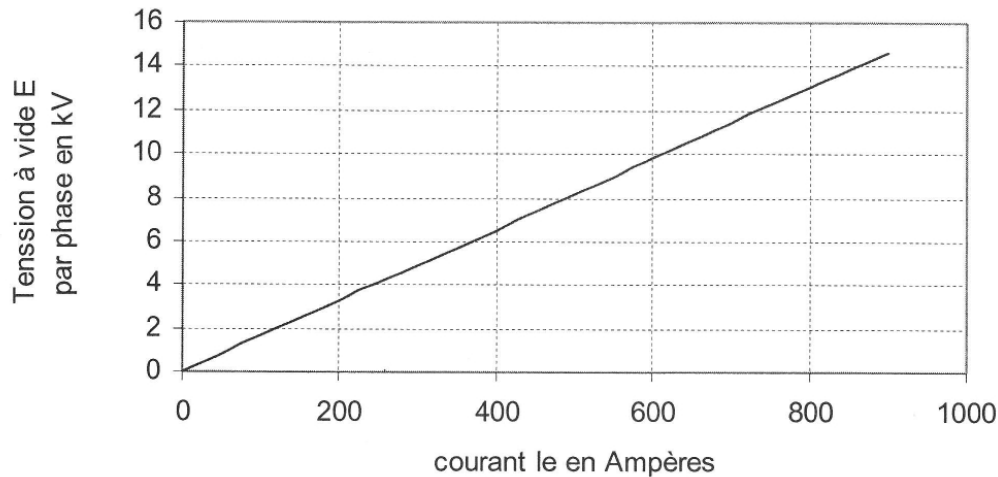
C.1.4. Calculer la valeur moyenne I_{e0} du courant d'excitation i_e .

C.1.5. En se référant à l'annexe 1, en déduire la valeur E_0 de la fem e du modèle de Behn-Eschenburg créée par la valeur moyenne I_{e0} .

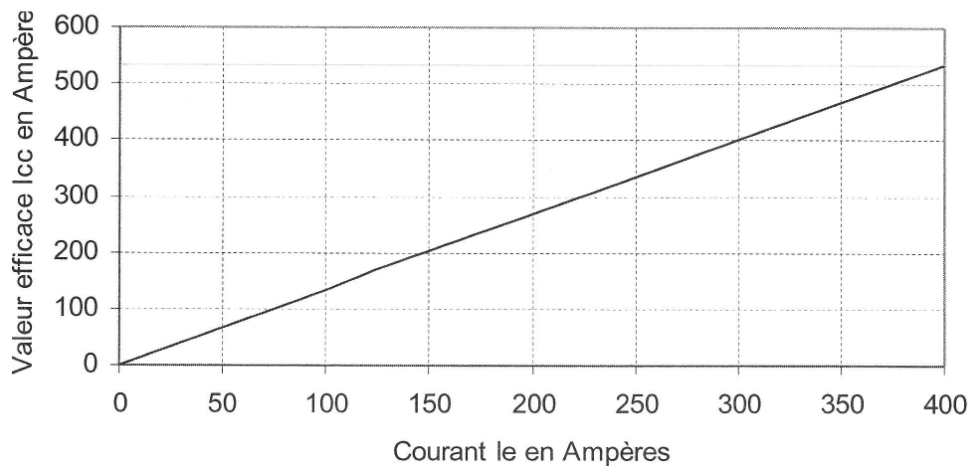
C.1.6. Calculer l'amplitude I_{1M} du fondamental du courant i_e . Conclusion ?

ANNEXE 1

Caractéristique à vide de l'alternateur



Caractéristique en court-circuit



1 Exercice 20: BTS 2012 Métro Sucrerie (Solution 20:)

A.3. Maintenance des alternateurs

La production d'énergie électrique est assurée par 2 turboalternateurs triphasés identiques. Afin de tenir l'objectif « zéro panne » pendant la période de production, ils sont régulièrement contrôlés par une société extérieure à l'entreprise. Les essais sont réalisés dans les locaux de cette société. L'alternateur est entièrement démonté afin de vérifier l'état d'usure des pièces, l'isolement des circuits induit et inducteur. Après remontage, les essais classiques (essai à vide et essai en court circuit) sont réalisés sur un banc spécifique. Pour cela, un moteur est accouplé à l'alternateur en test et permet l'entraînement jusqu'à la vitesse de synchronisme. La puissance électrique absorbée par ce moteur (parfaitement connu de la société de maintenance) permet de remonter aux différentes pertes de l'alternateur. On se propose de prédéterminer le rendement d'un alternateur à partir de ces essais.

A.3.1. Analyse du rapport d'essai d'un alternateur

CONVERTEAM THE POWER CONVERSION COMPANY		RAPPORT D'ESSAI / TESTING REPORT		Certif. Body 1 Ref. : NA Certif. Body 2 Ref. : NA CONVERTEAM FNOXR 22135 Page 0 / 2
MOTORS SA		MOTEUR SYNCHROME / SYNCHRONOUS MOTOR		
PROJET / Project Client / Customer Type / Type	: PITHIVIERS : SUCRERIE DE PITHIVIERS : MSHD 800 L4C	No Cmde / Order no. N° Moteur/ Serial n°	: 07D885 : 001	
ELECTRICAL DATA				
Nb of Stators	: 1	Couplage / Coupling	: ETOILE /	
Puissance / Power	: 1 x 5 000 Kva	Phase angle/stators	: 0	
Tension / Voltage	: 1 x 5 500 V	Service Factor	: S1	
Courant / Current	: 1 x 525 A	Cl. Echauffement Stator	: 115(S)° K	
Vitesse / Speed	: 1500 rpm	Cl. Echauffement Rotor	: NA K	
Couple / Torque	: 31.8 kN.m	Cooler water temp.	: 25 °C	
Rendement / Efficiency	: 0.954			
Cos Phi	: 0.8			
Freq.	: 50 Hz			

rpm : « rotation per minute » soit tours par minute

rpm : « rotation per minute » soit tours par minute

A.3.1.1. La vitesse de rotation des turbines est de 9 000 tr.min⁻¹. Justifier la nécessité d'installer un réducteur de vitesse en

$$r = \frac{n_{\text{alternateur}}}{n_{\text{turbine}}}$$

sortie de turbine et calculer son rapport de réduction défini par

A.3.1.2. Calculer le nombre de pôles d'un alternateur.

A.3.1.3. Vérifier la valeur du courant nominal de l'induit à partir de la puissance apparente nominale.

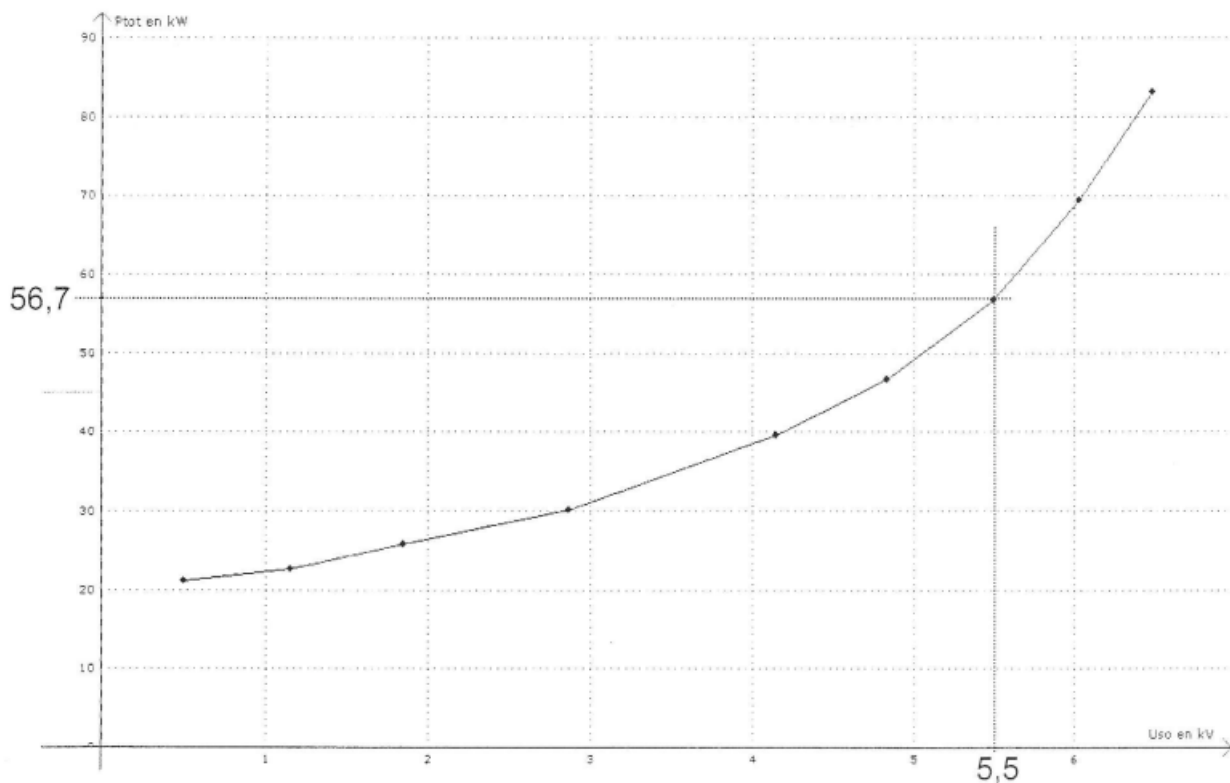
A.3.2. Prédétermination du rendement d'un alternateur

La société de maintenance procède à la mesure des résistances des bobinages statoriques (entre phases) et du bobinage rotorique à la température ambiante. Elle les corrige ensuite pour la température de fonctionnement (75°C). Les résultats sont les suivants :

$$R_{ph \text{ stator}} = 93,2 \text{ m}\Omega$$

$$R_{\text{rotor}} = 245,5 \text{ m}\Omega$$

Lors de l'essai à vide à la vitesse de synchronisme, on mesure les pertes totales de l'alternateur pour différentes valeurs de la tension à vide U_{50} :



On souhaite prédéterminer le rendement de l'alternateur pour son point de fonctionnement nominal avec une charge sinusoïdale triphasée équilibrée dont le facteur de puissance est 0,8.

- A.3.2.1.** Calculer la puissance électrique active fournie pour ce point de fonctionnement.
- A.3.2.2.** À partir de la courbe donnant les pertes totales en fonction de la tension à vide, justifier que l'on peut estimer les pertes mécaniques $p_{\text{méc}}$ à 20 kW,
- A.3.2.3.** Donner alors la valeur des pertes fer p_{fer} pour une tension à vide égale à la tension nominale.
- A.3.2.4.** Calculer les pertes Joule statoriques p_{Js} .
- A.3.2.5.** La modélisation de l'alternateur (non traitée ici) permet d'estimer le courant continu rotorique à 276,5 A pour le point de fonctionnement choisi.
Calculer les pertes Joule rotoriques p_{Jr} .

On réalise un essai en court-circuit à /a vitesse de synchronisme et on mesure des pertes fer dites « supplémentaires » créées par le courant statorique. Elles valent 25,9 kW pour un courant statorique de 525 A.

A.3.2.6. En déduire alors la somme P_T de toutes les pertes.

A.3.2.7. Calculer le rendement de l'alternateur. Comparer avec la valeur donnée sur le rapport d'essai de l'alternateur.

Solution 1: Exercice 1:Machine Synchrone Réversible (Tale C.H.Vigouroux) (Solution 1:)

Solution 2: Exercice 2:Modèle d'une machine, en charge (Solution 2:)

Solution 3: Exercice 3:Coeff forme, distribution (Solution 3:)

Solution 4: Exercice 4:Déwatté, Potier. (Solution 4:)

Solution 5: Exercice 5:Déwatté, Potier, Charge condensateur (Solution 5:)

Solution 6: Exercice 6:BTS 2008 Sujet 0 (Solution 6:)

B.1.1. Calculs préliminaires

$$p = \frac{f}{n} = \frac{50}{1000/60} = 3$$

B.1.1.1.

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3}U_n} = \frac{3 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \times 6,6 \cdot 10^3} = 262,4 \text{ A}$$

B.1.1.2.

B.1.1.3. Pour le calcul de la réactance synchrone :

$$X = \frac{E_V(i_{exc})}{I_{CC}(i_{exc})} = \frac{300 \times i_{exc}}{170 \times i_{exc}} = 1,76 \Omega$$

B.1.2.

$$f_p = \cos(\arctan 0,49) = \frac{P_{al}}{S_{al}} = \frac{P_{al}}{\sqrt{P_{al}^2 + Q_{al}^2}} = 0,898$$

B.1.2.2.

B.1.2.3.

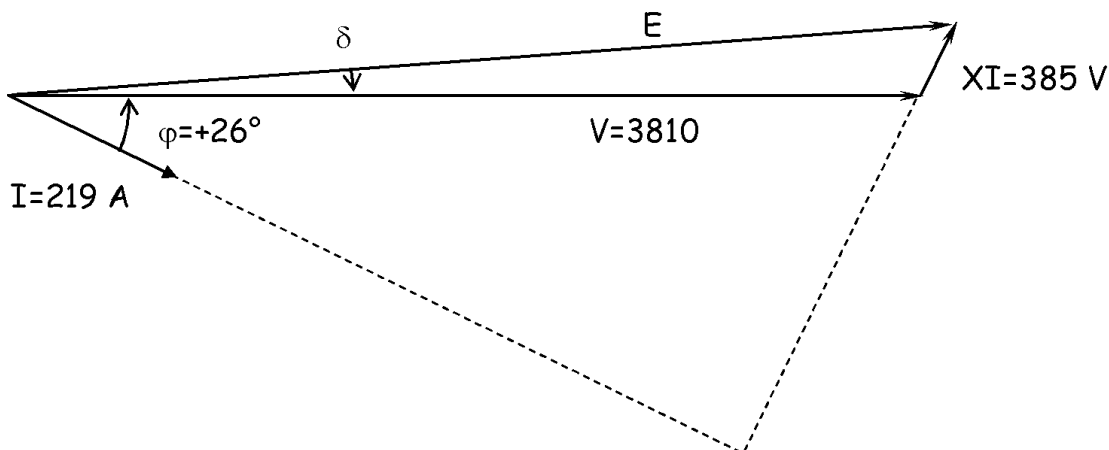
Si

$$\varphi = \arctan 0,49 = 26^\circ$$

$$V = \frac{6,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 3810 \text{ V}$$

$$XI \approx ZI = 1,76 \times 219 = 385 \text{ V} \text{ et orienté à } +90^\circ \text{ par rapport à } I$$

$$\vec{V} + \vec{XI} = \vec{E}$$



E (à cause de XI ajouté à V) est plus grand que V donc il est nécessaire de surexciter l'alternateur pour qu'il crée une fem E assez grande (la RMI sous excite l'alternateur).

B.1.2.5 la fem E vaut 4000 V mesuré par Fresnel

Ou par le calcul

$$E = \sqrt{(V + XI \sin \varphi)^2 + (XI \cos \varphi)^2} = \sqrt{(3810 + 385 \sin \varphi)^2 + (385 \cos \varphi)^2} = 3993 \text{ V}$$

$$i_{exc} = \frac{E}{300} = \frac{3993}{300} = 13,3 \text{ A}$$

B.1.2.6. Angle de décalage interne V/E mesuré sur la courbe $-5,16^\circ$

$$\delta = -\text{Arc tan} \left(\frac{XI \cos \varphi}{V + XI \sin \varphi} \right) = -5,17$$

$$\eta = \frac{2,25 \cdot 10^6}{2,25 \cdot 10^6 + 0,25 \cdot 10^6} = 0,9$$

B.1.2.7.

B.1.2.8. Les pertes sont des pertes Joules, Fer, Mécaniques

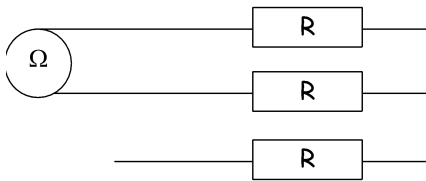
Solution 7: Exercice 7: BTS 2007 Métro (Solution 7:)

$$f = p \times n_s = 4 \times \frac{1500}{60} = 100 \text{ Hz}$$

B.1.1.

On prend n_s en tr/s donc $n_s = 1500/60 = 25 \text{ tr/s}$

B.1.2. On mesure $r = 2R$ donc $R = r/2 = 0,03 \Omega$



B.1.3. a) Comme à vide $I = 0$, donc les chutes de tension dans R et $L\omega$ sont nulles, donc $V = E$

$$\frac{E}{\Omega} = A = \frac{37}{1500 \frac{2\pi}{60}} = 0,235$$

Donc $A = 0,235 \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

$$E = K \cdot N \cdot p \cdot \hat{\phi} \cdot \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{K \cdot N \cdot p \cdot \hat{\phi}}{A} \cdot \Omega$$

B.1.3.b)

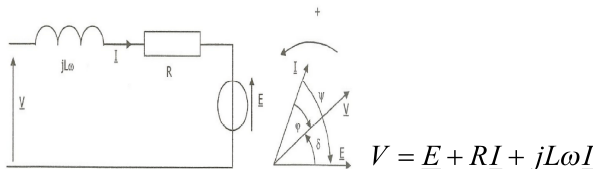
le coefficient A ne dépend que de paramètres matériels

K : constante des enroulements

N : nombre de conducteurs

P : le nombre de paires de pôles d'inducteur qui ne dépend que

le flux maximum créé par l'inducteur est constant car créé par des aimants permanents

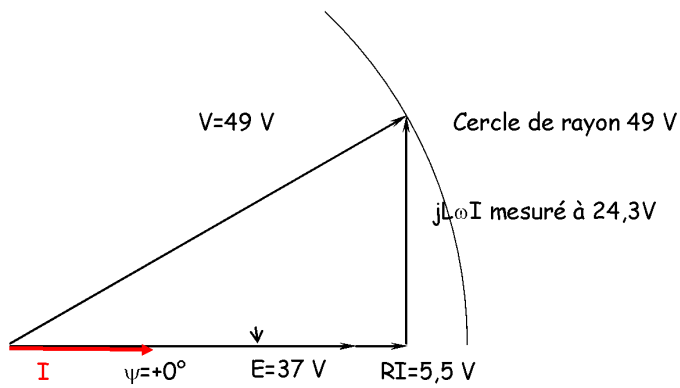


B.1.4.a)

B.1.4.b) $E = 37 \text{ V}$ car la vitesse de rotation est la même

$$RI = 0,03 \times 185 = 5,55 \text{ V}$$

$$V = 49 \text{ V}$$



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

Par le calcul on obtient :

$$L\omega I = \sqrt{V^2 - (E + RI)^2} = \sqrt{49^2 - (37 + 5,5)^2} = 24,38 \text{ V}$$

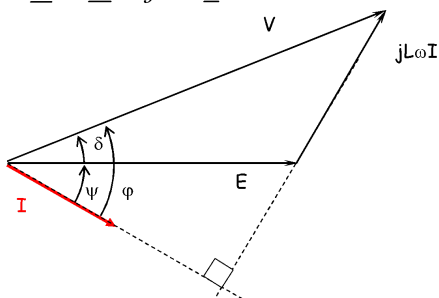
$$L = \frac{\sqrt{V^2 - (E + RI)^2}}{\omega I}$$

$$L = \frac{\sqrt{49^2 - (37 + 5,5)^2}}{2\pi \times 100 \times 185} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

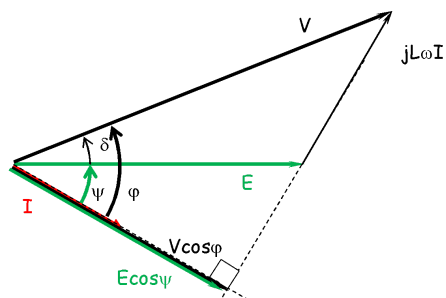
L'inductance vaut 0,2 mH

B.2. Détermination de l'expression du couple :

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



B.2.1.



B.2.2.

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

Je peux projeter la relation sur I.

Ce qui donne

- V projeté sur I donne $V \cos \phi$
- E projeté sur I donne $E \cos \psi$
- $jL\omega I$ projeté sur I donne 0

Donc $\underline{V} = \underline{E} + jL\omega\underline{I}$ projeté sur I donne $V \cos \phi = E \cos \psi$

B.2.3. $P_a = 3VI \cos \phi = 3EI \cos \psi$

$$B.2.4 \quad C_{em} = \frac{P_a}{\Omega} = 3 \frac{E}{\Omega} I \cos \psi = 3AI \cos \psi \quad \text{donc } C_{em} = 3AI \cos \psi$$

C. Stratégie d'autopilotage

C.1. Commande à $\psi=0$

C.1.1. $C_{em} = f(\cos \psi)$ or $\cos \psi$ est max pour $\psi=0$

C.1.2. le couple ne dépend plus que du courant I

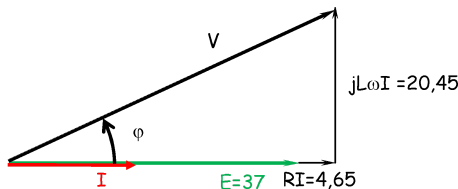
$$C.1.3.a) \quad C = 3AI \cos \psi = 3 \times 0,24 \times 155 \times 1 = 111,6 \text{ Nm} \quad \text{donc } C = 111,6 \text{ Nm}$$

C.1.3.b) $n = 1500 \text{ tr/min}$ donc $E = 37 \text{ V}$ et comme $\psi=0$, E est colinéaire à I

$$RI = 0,03 \times 155 = 4,65 \text{ V colinéaire à I}$$

$$L\omega I = 0,21 \cdot 10^{-3} \times 2\pi \times 100 \times 155 = 20,45 \text{ V perpendiculaire à I}$$

$$V = E + RI + jL\omega I$$



$$C.1.3.c) \quad V = \sqrt{(E + RI)^2 + (L\omega I)^2} = \sqrt{(37 + 4,65)^2 + (20,45)^2} = 46,4 \text{ V}$$

Si on néglige RI

$$V = \sqrt{E^2 + (L\omega I)^2} = \sqrt{37^2 + (20,45)^2} = 42,3 \text{ V}$$

$$C.1.3.d) \quad \varphi = \text{Arctan} \frac{L\omega I}{E + RI} = \text{Arctan} \frac{20,45}{37 + 4,65} = 26,1^\circ$$

En négligeant RI

$$\varphi = \text{Arctan} \frac{L\omega I}{E} = \text{Arctan} \frac{20,45}{37} = 28,9^\circ$$

C.2) Commande à ψ variable

C.2.1. Point de fonctionnement à $\psi \neq 0$

$$C.2.1.a) \quad C = 3AI \cos \psi = 3 \times 0,24 \times 155 \times \cos(-59) = 57,47 \text{ Nm}$$

$$C.2.1.b) \quad f = p n_s \text{ donc } f = 4 \frac{5000}{60} = 333 \text{ Hz}$$

$$\omega = 2\pi f = 2094 \text{ rad/s}$$

C.2.1.c) Comme E est proportionnel à Ω

$$E = 37 \text{ V pour } 1500 \text{ tr/min}$$

$$E = \frac{37 \times 5000}{1700} = 123,3 \text{ V} \quad \text{pour } 5000 \text{ tr/min}$$

$$E = A \times \Omega = 0,24 \times \frac{5000 \times 2\pi}{60} = 123,3 \text{ V}$$

$$\text{ou } L\omega I = 0,21 \cdot 10^{-3} \times 2094 \times 155 = 68,16 \text{ V}$$

$$C.2.1.d) \quad RI = 4,65 \text{ V}$$

$$E = 163 \text{ V}$$

$$L\omega I = 68,16 \text{ V}$$

$$T_{em} = \frac{3EI \cos \psi}{\Omega} = \frac{3EI \cos \psi}{n \times \frac{2\pi}{60}} = 3 \frac{E}{n} \times \frac{60}{2\pi} I \cos \psi$$

$k=0,28$

$$T_{em} = 8,0 \times I \cos \psi$$

A.2) Fonctionnement en moteur « à couple constant » (de $n = 0$ à $n = 400 \text{ tr. min}^{-1}$)

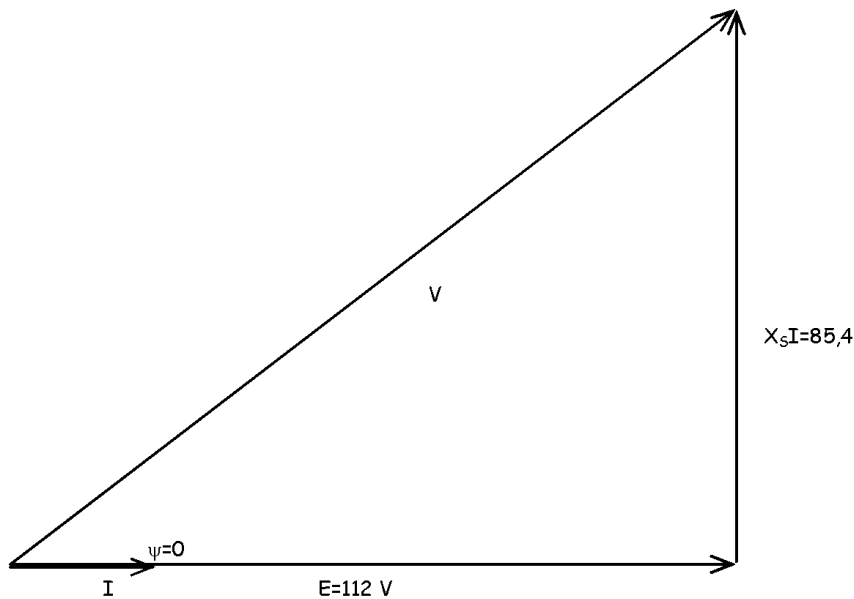
A.2.1) $I = \frac{T}{k_T \cos \psi} = \frac{570}{8 \cos 1} = 71,2 \text{ A}$

Le courant absorbé par une phase est de 71,2 A

A.2.2) $E = k_E \times n = 0,28 \times 400 = 112 \text{ V}$ donc $E=112 \text{ V}$

$X_S I = k_x \times n \times I = 3 \cdot 10^{-3} \times 400 \times 71,2 = 85,4 \text{ V}$ donc $X_S I = 85,4 \text{ V}$

A.2.3) $\underline{E} + jX_S \underline{I} = \underline{V}$



Donc $V = \sqrt{112^2 + 85,4^2} = 140,8 \text{ V}$

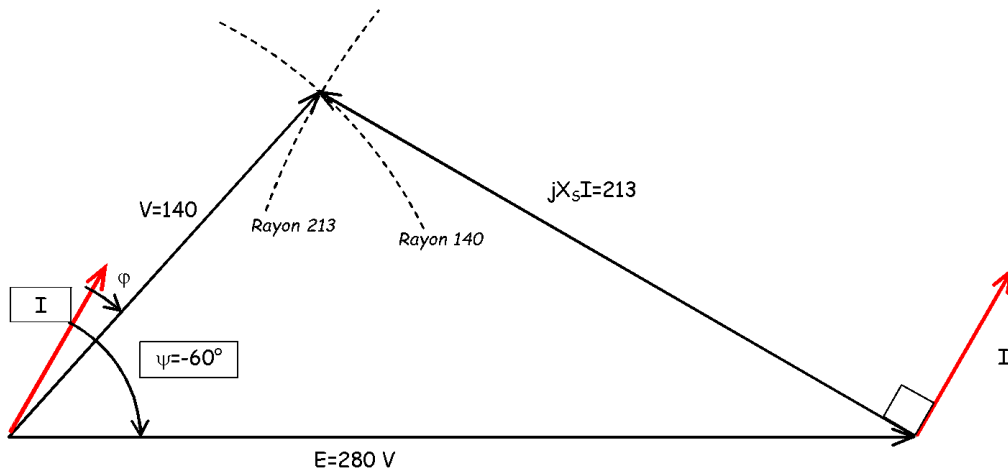
A.3) Mode défluxage

A.3.1) $E = k_E \times n = 0,28 \times 1000 = 280 \text{ V}$ donc $E=280 \text{ V}$

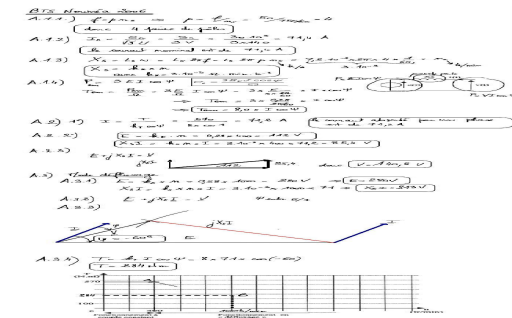
$X_S I = k_x \times n \times I = 3 \cdot 10^{-3} \times 1000 \times 71,2 = 213 \text{ V}$ donc $X_S I = 213 \text{ V}$

A.3.2) $\underline{E} + jX_S \underline{I} = \underline{V}$

A.3.3) $\underline{E} + jX_S \underline{I} = \underline{V}$



A.3.4) $T = k_T I \cos \psi = 8 \times 71 \times \cos(-60) = 284 \text{ Nm}$ donc $T = 284 \text{ Nm}$



Solution 9: Exercice 9: BTS 2005 Métro (Solution 9:)

A.1 Nombre de pôles : 1500 tr/min et 50 Hz $2 \cdot p = 4$

A.2. Puissance active $P_n = S_n \cdot \cos \varphi_A \Rightarrow P_n = 32000 \text{ kW}$

Puissance réactive $Q_n = S_n \cdot \sin \varphi_A \Rightarrow Q_n = 24000 \text{ kVar}$

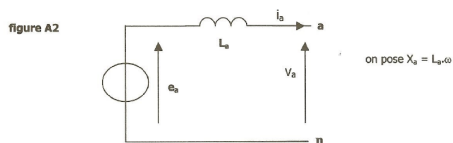
$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3}U_n} = 2100 = 2,1 \text{ kA}$$

A.3. Intensité nominales en ligne

$$X_a = \frac{X_a I_a}{I_n} = \frac{6600}{2100} = 3,14 \Omega \quad \text{donc} \quad L_a = \frac{3,14}{2\pi \cdot 50} = 0,01 = 10 \text{ mH}$$

A.4.

A.5.



$$e_a = v_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad \text{sinusoidal} \Rightarrow \underline{E}_a = \underline{V}_a + j\omega L_a \underline{I}_a$$

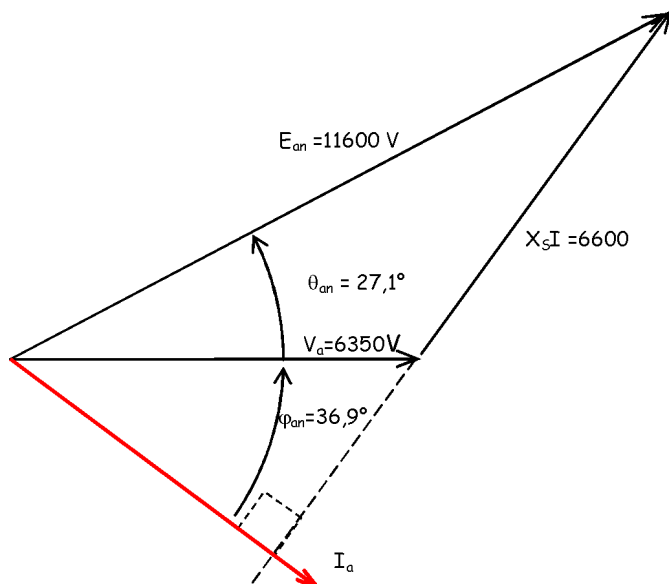
$$\Rightarrow \underline{E}_a = \underline{V}_a + jX_a \underline{I}_a$$

A.6.1.

$X_a I_a = 6600 \text{ V}$ déphasé de 90° par rapport à I
 $\cos \phi = 0,8$ donc $\phi_{V/I} = \arccos 0,8 = 36,9^\circ$

$$U_n = 11000 \text{ V} \Rightarrow V_a = \frac{11000}{\sqrt{3}} = 6350 \text{ V}$$

$U_n = 11000 \text{ V}$ donc



On trace d'abord V_a
 Puis le courant I déphasé de $36,9^\circ$
 Puis la tension $X_s I$ perpendiculaire au courant I
 La somme donne E_{an} que l'on mesure

$$E_{an} = 11600 \text{ V}$$

$$\theta_{an} = 27,1^\circ \text{ angle de décalage interne}$$

On peut vérifier par calcul :

$$E_{an} = \sqrt{(V_a \cos \varphi_{an})^2 + (X_s I + V_a \sin \varphi_{an})^2}$$

$$E_{an} = \sqrt{(6350 \cos 36,9)^2 + (6600 + 6350 \sin 36,9)^2}$$

$$\boxed{E_{an} = 11584 \text{ V}}$$

$$\theta_{an} = \arctan \left(\frac{X_s I + V_a \sin \varphi_{an}}{V_a \cos \varphi_{an}} \right) - 36,9$$

$$\theta_{an} = \arctan \left(\frac{6600 + 6350 \sin 36,9}{6350 \cos 36,9} \right) - 36,9$$

$$\boxed{\theta_{an} = 27,1^\circ}$$

Solution 10: Exercice 10: BTS 2000 Métro (Solution 10:)

$$1.1.1. \quad \omega = 2\pi f = 25,1 \cdot 10^2 \text{ rd/s}$$

$$1.1.2. \quad \Omega = \frac{\omega}{p} \Rightarrow p = 2$$

$$1.1.3. \quad S_n = 3 \cdot V_n \cdot I_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \Rightarrow I_n = \frac{90 \cdot 10^3}{3 \times 115} = 260 \text{ A}$$

$$1.2.1. \quad \underline{V} = \underline{E}_V - \underline{Z}_S \cdot \underline{I} \quad \text{et} \quad \underline{Z}_S = \frac{E_{VCC}}{I_{CC}} \quad \text{et}$$

La tension E_V évolue linéairement avec i_e et son équation est : $E_V = \frac{400}{92} I_e$

Et comme $I_{CC} = 3,07 \times I_e$

Vu que $Z_S = \frac{E_{VCC}}{I_{CC}}$ avec E_{VCC} et I_{CC} déterminés pour le même courant i_e

$$Z_S = \frac{E_{VCC}}{I_{CC}} = \frac{\frac{400}{92} I_e}{3,07 \times I_e} = \frac{400}{3,07} = 1,4 \Omega$$

Donc

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2} \approx 1,4 \Omega$$

1.3.1. On souhaite avoir la tension nominale à vide : soit $V=115$ V

Donc $V = E_V = 115$ V d'où comme $E_V = \frac{400}{92} I_e$ alors $I_e = \frac{92}{400} 115 = 26,5$ A

1.3.2. Comme

$$V_n = 115$$

$$X_S I_N = 1,4 \times 260 = 364$$

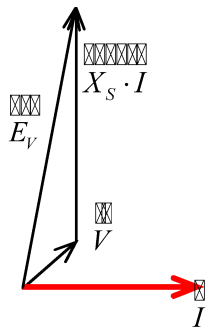
$$\cos \varphi = 0,75 \Rightarrow \varphi_{V/I} = 41,5^\circ$$

Sur le diagramme on lit $E_V = 450$ V

On peut vérifier par le calcul

$$E_V = \sqrt{(V \cos \varphi)^2 + (V \sin \varphi + X_S I)^2}$$

$$E_V = \sqrt{(115 \cos 41,5)^2 + (115 \sin 41,5 + 364)^2} = 448$$



1.3.3. $E_V = 450$ V et comme $E_V = \frac{400}{92} I_e$ alors $I_e = \frac{92}{400} 450 = 102$ A

Solution 11: Exercice 11: BTS 1999 Métro (Solution 11:)

II.1.1. Intensité : Une charge équilibrée consommant $P=50$ kW avec un facteur de puissance k alimentée en triphasé absorbe un

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times k} = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 400 \times 0,76} = 95$$

courant

Comme le système est triphasé équilibré et les courants sinusoïdaux le courant $I_N = 0$

II.1.2. Résistance des câbles

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

La résistance des câbles est

$$R = 2,7 \cdot 10^{-8} \frac{850}{35 \cdot 10^{-6}} = 0,656 \Omega$$

Donc les câbles constituent les conducteurs de ligne

$$R = 2,7 \cdot 10^{-8} \frac{850}{10 \cdot 10^{-6}} = 2,3 \Omega$$

Pour le neutre

II.1.3. Pertes Joules

$$P_J = 3 R_{ph} I^2 = 27,1$$

kW

Dans le neutre : pas de courant donc pas de pertes

Remarque : pertes très importantes par rapport à la charge utile de 50kW ce que l'on va faire en abaissant le facteur de puissance

II.2. Correction des perturbations

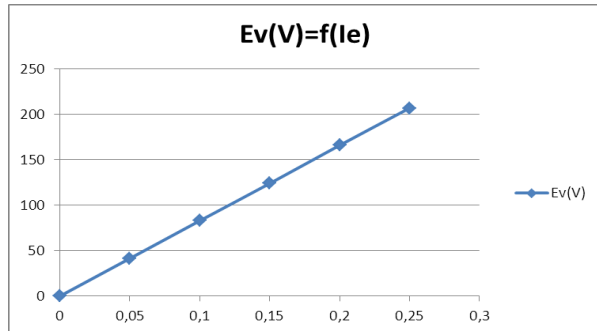
II.2.1. Paramètres du modèle

II.2.1.a. Coefficient β

Puisque le modèle retenu est celui de Behn-Eschenburg par définition de ce modèle, sa caractéristique à vide coïncide avec la tangente à l'origine de la caractéristique à vide de la machine réelle. Lorsque cette caractéristique est décrite par un tableau de valeurs, on convient que la tangente à l'origine est la droite passant par l'origine des axes et le premier point du tableau de valeurs (après 0) Donc ici la tangente passe par les points de coordonnées [0 ; 0] et [0,05A ; 41,5V].

$$\beta = \frac{41,5}{0,05} = 0,83 \cdot 10^3 \text{ VA}^{-1}$$

Alors



Rq : ici tous les points sont alignés

II.2.1.b. Valeur de X_s

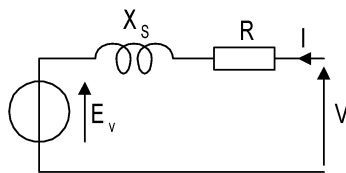


figure 4

Si on réalise un court circuit symétrique entre les 3 phases, on peut utiliser le schéma ramené à une phase pour étudier le court circuit. En appelant E_{VCC} la fem correspondant à $I_e = 0,38 \text{ A}$ on sait alors que le courant I vaut $I_{CC} = 70 \text{ A}$.

Comme alors $V=0$ on obtient, d'après le schéma de la figure 4 :

$$Z_s = \frac{E_{VCC}}{I_{CC}} = \sqrt{X_s^2 + R^2}$$

Avec $E_{V(I_e=0,38)} = E_{VCC} = \beta \cdot 0,38$

$$\Rightarrow Z_s = \frac{E_{VCC}}{I_{CC}} = \frac{\beta \cdot 0,38}{I_{CC}} = \frac{830 \cdot 0,38}{70} = \sqrt{X_s^2 + R^2} = 4,51$$

Et comme $Z_s = \sqrt{X_s^2 + R^2}$

Donc avec $R = 0,1 \Omega \Rightarrow X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2} = \sqrt{4,51^2 - 0,1^2} = 4,5 \Omega$

Ce qui justifie bien la valeur de l'énoncé : $X_s = 4,5 \Omega$

II.2.2. Si la machine vue en convention récepteur absorbe un courant en avance de $\pi/2$ sur la tension simple, elle est donc vue comme une batterie de condensateurs en étoile par le réseau.

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi = 3VI \cos \varphi = 0 \quad \varphi = \pi/2$$

La machine ne consomme effectivement donc pas de puissance active

Elle fournit la puissance réactive $Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi = 3VI \sin \varphi = 3VI$

II.2.2.1. Si les lampes absorbent 50 kW avec $f_p = 0,76$ inductif alors elles consomment la puissance réactive :

$$Q_{\text{lampes}} = P \cdot \tan(\arccos 0,76) = 42,8 \text{ kVar}$$

La machine synchrone doit fournir cette puissance donc $3VI = 42,8 \cdot 10^3 \Rightarrow I = 61,7 \text{ A}$

II.2.2.2.

D'après la figure 4 en négligeant R, il vient en écrivant la loi des mailles

$$\underline{V} = \underline{E}_v + jX_s \cdot \underline{I} \quad \text{soit} \quad \underline{V} = \underline{E}_v + j4,5 \cdot \underline{I}$$

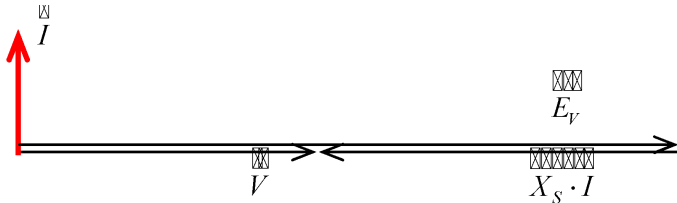
Diagramme de Fresnel :

$\vec{I}$ en avance sur $\vec{V}$ de $\frac{\pi}{2}$.

$\vec{X}_S \cdot \vec{I}$ sera en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur $\vec{I}$ on aura donc $X_S \cdot I = 4,5 \times 61,7 = 278V$

Et $V=230V$ et en retard de $\frac{\pi}{2}$ par rapport au courant

Donc $\vec{E}_V = \vec{V} - j\vec{X}_S \cdot \vec{I}$



II.2.2.3. Valeur de I_e

D'après le diagramme de Fresnel, on a, en module $V = E_V - X_S \cdot I$ donc avec $V = 230V$ et

$X_S \cdot I = 4,5 \times 61,7 = 278V$ alors $I = 61,7A \Rightarrow E_V = 508V \Rightarrow I_e = 0,612A$

II.2.3. Amélioration du facteur de puissance avec la machine synchrone

II.2.3.a. Courant dans les câbles de phase.

L'ensemble vu par le réseau (lampes+ MS) va consommer 50kW, sans mettre en jeu de réactif puisque la puissance réactive fournie par la machine synchrone égale exactement la puissance réactive absorbée par les lampes et que la MS fonctionnant à vide et n'ayant pas de pertes ne met en jeu aucune puissance active.

Le réseau « voit » donc un récepteur (lampes consomment P et Q et MS consomme pas de P et compense Q) de facteur de puissance = 1

Le nouveau courant en ligne l' est donc donné par :

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I' \cdot \cos \varphi' = 50000 \Rightarrow I' = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 72,2A$$

II.2.3.b. Nouvelles pertes en ligne

L'ensemble est toujours équilibré, le courant dans le neutre est donc toujours nul. Alors

$$p'_J = 3 \cdot R_{phase} \cdot I'^2 \Rightarrow p'_J = 15,6kW$$

On remarque bien que ces pertes sont inférieures à celles trouvées précédemment.

II.2.3.c. Diminution des pertes en ligne

En laissant de côté l'aspect économique puisque $p_J = 3 \cdot \frac{\rho \cdot \ell}{S} I^2$ on peut diminuer p_J en diminuant ρ (Cu à la place de l'Al) en diminuant I ou surtout en augmentant S .

Solution 12: Exercice 12:BTS 1984:

Solution 13: Exercice 13:Utilisation du diagramme de Behn-Eschenburg

Solution 14: Exercice 14:utilisation du diagramme de Potier.

Solution 15: Exercice 15:Fonctionnement d'un moteur synchrone couplé sur le réseau.

Solution 16: Exercice 16:Machine Synchrone (3EI)

Solution 17: Exercice 17:Etude d'une machine synchrone triphasée tétrapolaire couplage étoile, $f_n=50\text{Hz}$ (3EI)

Solution 18: Exercice 18:Machine Synchrone Application du diagramme bipolaire simplifié (3EI)

Solution 19: Exercice 19:BTS Etk 2011 Métro Compagnie Nationale du Rhone ()

B.1. Caractéristique générale de l'alternateur (6 points)

$$p = \frac{f}{n_s} = 4$$

B.1.1. $n = 750 \text{ tr/min}$ soit $12,5 \text{ tr/s}$ donc soit 4 paires de pôles

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \times U_n} = \frac{3200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 6,3 \cdot 10^3} = 293,2 \text{ A}$$

B.1.2. Le courant consommé est $I_N = 293,2 \text{ A}$.

$$f_n = \frac{P_n}{S_n} = \frac{2,88}{3,2} = 0,9$$

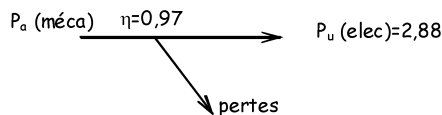
B.1.3.

B.1.4. $Q_n = \sqrt{S^2 - P^2} = 1,39 \text{ MVar}$ La puissance réactive consommée est $Q_n = 1,39 \text{ MVar}$.

B.2. Rendement et pertes (8 points)

B.2.1. Pour le fonctionnement nominal $S_n = 3200 \text{ kVA}$, $f_n = 0,9$ donc $\eta = 97\%$

Un alternateur convertit de la puissance mécanique en électrique



$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{P_{u(\text{elec})}}{P_{\text{abs(méca)}}} \\ P_{\text{pertes}} &= P_{\text{abs(méca)}} - P_{u(\text{elec})} \end{aligned} \right\} P_{\text{pertes}} = \frac{P_{u(\text{elec})}}{\eta} - P_{u(\text{elec})} = \frac{2,88}{0,97} - 2,88 = 89 \text{ kW}$$

Les pertes sont donc de 89 kW

B.2.2. L'induit est le stator, siège des tensions induites (par le rotor), il est constitué des trois enroulements où apparaissent les tensions triphasées induites

$$P_{J_{\text{induit}}} = 3RI^2 = 3 \times 0,08 \times 293^2 = 20,6 \text{ kW}$$

La puissance dissipée dans l'induit est donc de 20,6 kW

B.2.3. L'inducteur est le rotor (constitué d'une bobine alimentée en continu créant ainsi un aimant mis en rotation par l'énergie mécanique de la chute d'eau)

$$P_{J_{\text{inducteur}}} = R_e I_e^2 = 0,12 \times 405^2 = 19,7 \text{ kW}$$

La puissance dissipée dans l'inducteur est donc de 19,7 kW

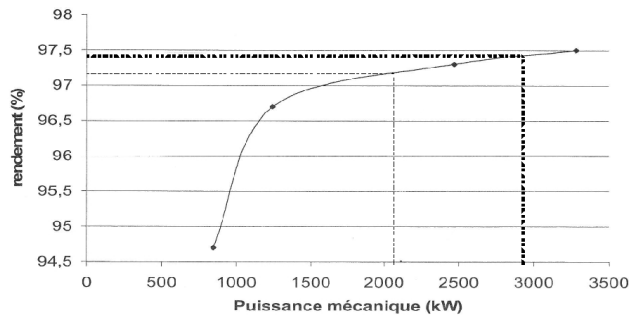
$$\%_{\text{pertes joules}} = \frac{20,6 + 19,7}{89} = 45,3\%$$

B.2.4. Les pertes Joules représentent donc 45,3 %

Les autres pertes étant dues aux pertes par courants de Foucault et Hystérésis et aux pertes mécaniques.

B.2.5.

Rendement d'un alternateur (%) en fonction de la puissance mécanique



Puissance KVA	800	1600	2400	3200
Cos φ				
1	94,7	96,7	97,3	97,5
0,9	93,9	96,3	96,7	97,0

Pour une puissance mécanique de 2,11 MW (Q_1) le rendement pour $f_p=1$ sera d'environ 97,2 % (soit 96,7 % pour $f_p=0,9$)
 Pour une puissance mécanique de 2,96 MW (Q_2) le rendement pour $f_p=1$ sera d'environ 97,4 % (soit 97 % pour $f_p=0,9$)
 La PCH fournit l'énergie électrique des 2 alternateurs.

$$P_{elecPCH} = 2 \times \begin{cases} 2,11 \times 0,972 = 4,1 \text{ MW} \\ 2,96 \times 0,974 = 5,76 \text{ MW} \end{cases}$$

Donc si l'on se base juste sur la courbe

B.3. Réglage du point de fonctionnement électrique (10 points)

B.3.1. R donnée par la CNR : $R = 80 \text{ m}\Omega$

B.3.2. L'alternateur étant entraîné à 750 tr/min

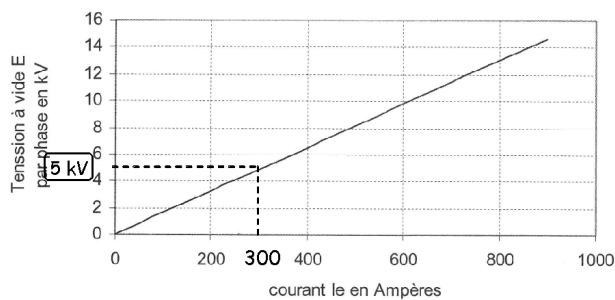
On alimente l'inducteur par un courant que l'on mesure

On relève la tension aux bornes d'un enroulement de l'alternateur

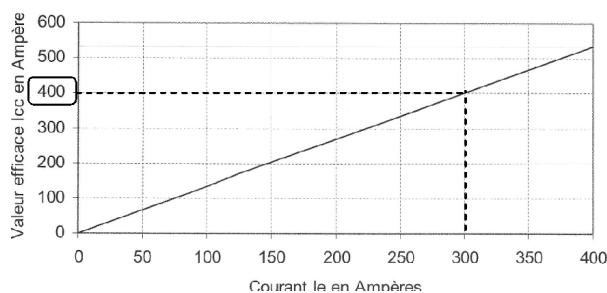
$$Z = \frac{E(i_e)}{I_{cc}(i_e)} = \frac{E(300)}{I_{cc}(300)} = \frac{5000}{400} = 12,5 \Omega$$

B.3.3.

Caractéristique à vide de l'alternateur



Caractéristique en court-circuit



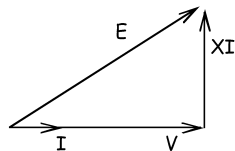
$$\Rightarrow X = \sqrt{Z^2 - R^2} \approx 12,5 \Omega$$

B.3.4. $R (0,08 \Omega) \ll X (12,5 \Omega)$ donc le schéma proposé est correct

B.3.5. $Q_1=50 \text{ m}^3/\text{s}$; $P=2,05 \text{ MW}$; $\cos\phi=1$.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \phi} = \frac{P}{3V \cos \phi} = \frac{2,05 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \times 6,3 \cdot 10^3 \times 1} = 187,8 \text{ A}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} XI = 12 \times 187,8 = 2,25 \text{ kV} \\ V = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 3,63 \text{ kV} \\ \varphi = 0 \end{cases}$$



$$E = \sqrt{3,63^2 + 2,25^2} = \boxed{4,27 \text{ kV}}$$

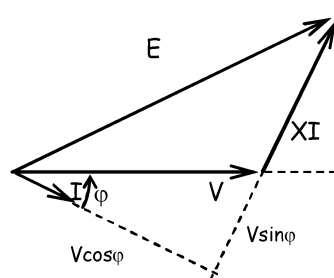
Deux possibilités :

- Par lecture du graphique $E=f(I)$ de l'annexe 2 $\Rightarrow \boxed{I_e = 260 \text{ A}}$ (lecture peu précise)
- Afin d'être plus précis on peut établir l'équation de $I_e = f(E)$ donc $I_e = (800/13000) \times E$
Soit $I_e = (800/13000) \times 4270 = I_e = 262,8 \text{ A}$

$Q_1 = 50 \text{ m}^3/\text{s}$; $P = 2,05 \text{ MW}$; $\cos\phi = 0,9$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos\phi} = \frac{P}{3V \cos\phi} = \frac{2,05 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \times 6,3 \cdot 10^3 \times 0,9} = 208,7 \text{ A}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} XI = 12 \times 208,7 = 2,5 \text{ kV} \\ V = \frac{6,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 3,63 \text{ kV} \\ \varphi = \arccos 0,9 = 26^\circ \end{cases}$$



$$E = \sqrt{(V + XI \sin\phi)^2 + (XI \cos\phi)^2} = \boxed{5,23 \text{ kV}}$$

Comme précédemment $\Rightarrow \boxed{I_e \approx 320 \text{ A}}$ (lecture peu précise)
Ou $I_e = (800/13000) \times 5230 = I_e = 321,8 \text{ A}$

C. Réglage du courant d'excitation (22 points)

C.1. Ondulation du courant d'excitation (10 points)

C.1.1. $T = 4 \text{ ms}$ donc $f = 250 \text{ Hz}$

$$\langle v_e \rangle = \frac{5}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{5}\right) \times 50 = \boxed{46,7 \text{ V}}$$

C.1.2. On lit sur le chronogramme $V_M = 50 \text{ V}$ donc

C.1.3. $\omega_1 = 2\pi f = 1570 \text{ rad/s}$

On lit sur le spectre : la valeur moyenne de la tension $V_0 = 46,7 \text{ V}$ et l'amplitude du fondamental $V_{1M} = 4 \text{ V}$

$$\langle i_e \rangle = \left\langle \frac{V_0}{R_e} \right\rangle + \left\langle \frac{V_{1M}}{\sqrt{R_e^2 + (L\omega_1)^2}} \cos\omega_1 t \right\rangle$$

C.1.4.

car l'impédance de la bobine en continu est nulle ($\left\langle \frac{V_0}{R_e} \right\rangle$) et la valeur

$$\left\langle \frac{V_{1M}}{\sqrt{R_e^2 + (L\omega_1)^2}} \cos\omega_1 t \right\rangle$$

moyenne d'une tension sinusoïdale est nulle :

$$I_{e0} = \frac{V_0}{R_e} = \frac{46,7}{0,12} = 389 \text{ A}$$

C.1.5. $I_{e0} = 389 \text{ A}$ donc d'après le graphique ou l'équation $E_0 = 6,3 \text{ kV}$ (lecture peu précise)
 Par le calcul de l'équation de la droite : $E_0 = (13000/800) \times I_{e0} = (13000/800) \times 389 = 6,32 \text{ kV}$

C.1.6. Lecture peu précise de $V_{1M} = 3-4 \text{ V}$

$$I_{1M} = \frac{V_{1M}}{\sqrt{R_e^2 + (L_e \omega_1)^2}} = \frac{4}{\sqrt{0,12^2 + (0,33 \times 1570)^2}} = 7,7 \text{ mA}$$

négligeable devant I_{e0}

Solution 20: Exercice 20: BTS 2012 Métro Sucrerie ()

A.3. Maintenance des alternateurs

A.3.1. Analyse du rapport d'essai d'un alternateur

A.3.1.1. Il est nécessaire d'adapter la vitesse de rotation des turbines de façon à ce qu'elles produisent des tensions à 50 Hz. Le réducteur de vitesse en sortie de turbine doit avoir un rapport de réduction

$$r = \frac{n_{\text{alternateur}}}{n_{\text{turbine}}} = \frac{1500}{9000} = 0,166$$

$$p = \frac{f}{n_s} = \frac{50}{1500/60} = 2$$

A.3.1.2. donc 2 paires de pôles soit 4 pôles

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{5000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5500} = 524,8 \text{ A}$$

A.3.1.3. proche des 525 A de la plaque

A.3.2. Prédétermination du rendement d'un alternateur

A.3.2.1. $P_{\text{elec}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_n \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \times 5500 \times 525 \times 0,8 = 4 \text{ MW}$ soit une $P_{\text{elec}} = 4 \text{ MW}$.

A.3.2.2. Si l'on extrapole la courbe on peut supposer qu'elle passe par 20 kW pour $U_{s0} = 0$ donc ces pertes ne peuvent être que d'origine mécanique.

A.3.2.3. A la tension nominale $P_{\text{tot}} = 56,7 \text{ kW}$. Comme on est à vide P_{Js} et P_{Jr} sont nulles. Il ne reste donc que les pertes mécaniques constantes = 20 kW et les pertes fer donc $p_{\text{fer}} = 56,7 - 20 = 36,7 \text{ kW}$.

$$p_{Js} = \frac{3}{2} R_B I_N^2 = \frac{3}{2} \times 93,2 \cdot 10^3 \times 525^2 = 38,5 \text{ kW}$$

A.3.2.4.

$$p_{Jr} = R_{\text{rotor}} I_r^2 = 0,2455 \times 276,5^2 = 18,7 \text{ kW}$$

A.3.2.5. $p_{Jr} = R_{\text{rotor}} I_r^2 = 0,2455 \times 276,5^2 = 18,7 \text{ kW}$

A.3.2.6. La somme P_T de toutes les pertes est

$$P_T = p_{\text{méca}} + p_{Js} + p_{Jr} + p_{\text{fer}} = 20 + 38,5 + 18,7 + (36,7 + 25,9) = 139,8 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{4 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^6 + 139,8 \cdot 10^3} = 0,966$$

A.3.2.7. au lieu de 0,954