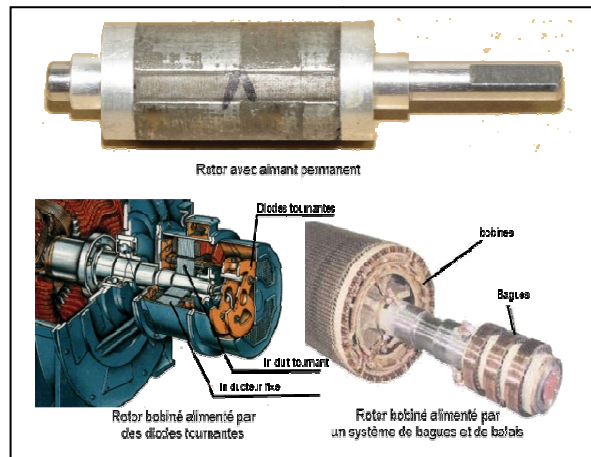
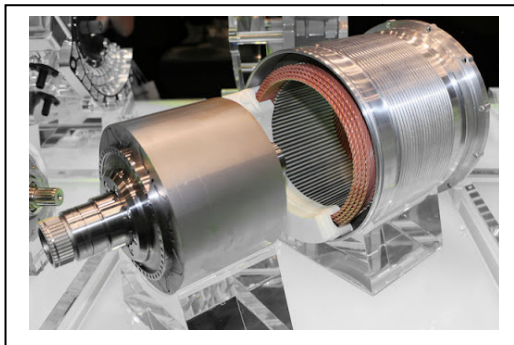
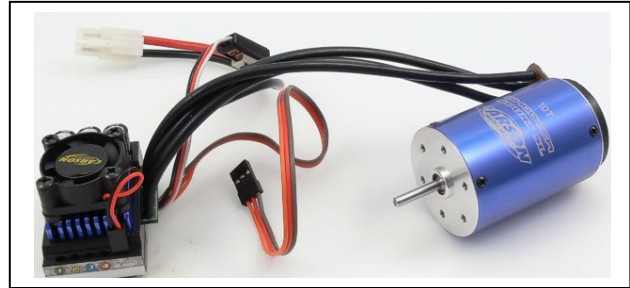
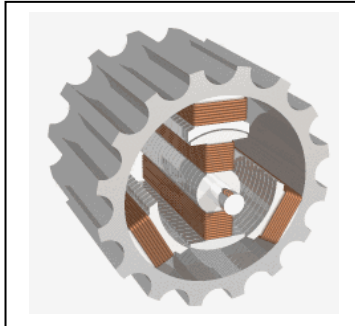


Physique appliquée

BTS 2 Electrotechnique



La machine synchrone

La machine synchrone

1. Mise en situation.....	3
1.1. Utilisation des machines synchrones	3
2. Constitution et principe de fonctionnement:	4
2.1. Constitution:.....	4
2.2. Principe de fonctionnement:	5
2.3. Bilan de puissance en fonctionnement "alternateur":	7
2.4. Modèle de Ben Eschenburg de la machine synchrone :	9
2.5. Expression des puissances en fonctionnement moteur et alternateur:.....	11
3. Exercices d'application:	13

1. Mise en situation

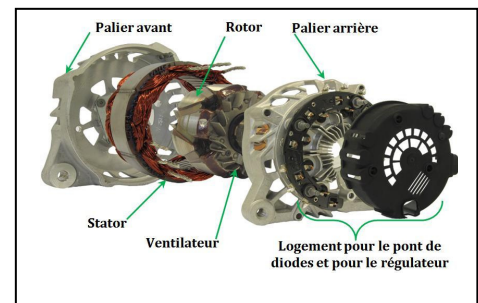
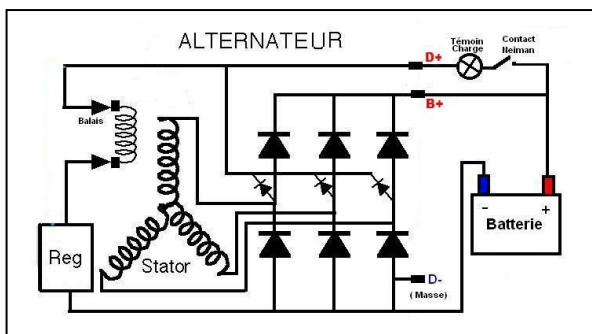
1.1. Utilisation des machines synchrones

Initialement, on utilisait les machines synchrones en fonctionnement alternateur dans les centrales de production d'électricité diverses.



Située en salle des machines, véritable cathédrale industrielle, l'ensemble du Groupe-Turbo Alternateur mesure 74 m de long. Il est composé de 3 turbines Basse Pression et une Turbine Haute pression accouplées à un alternateur. La vitesse de rotation de l'ensemble, alternateur et turbines, est de 1 500 tours par minute.

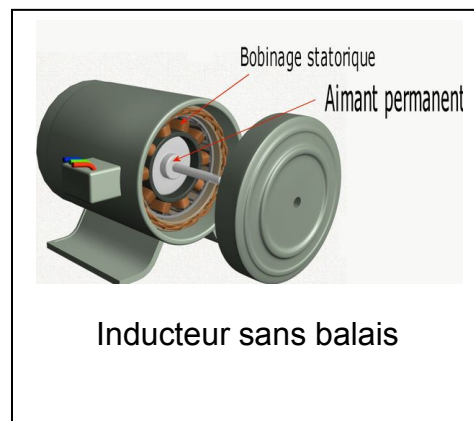
Dans l'automobile on utilise également un alternateur associé à un pont redresseur à diodes :



Le développement de l'électronique de puissance et la généralisation des aimants comme inducteur permettent aujourd'hui d'employer les machines synchrones en tant que moteurs dans une large gamme de puissance. La machine synchrone dans la très grande majorité des cas est utilisée en triphasé.



Inducteur avec balais



Inducteur sans balais

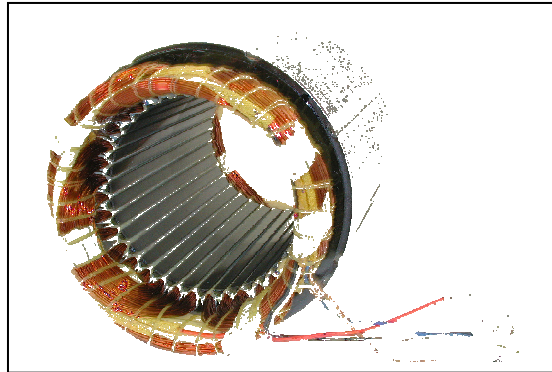
La machine synchrone

2. Constitution et principe de fonctionnement:

2.1. Constitution:

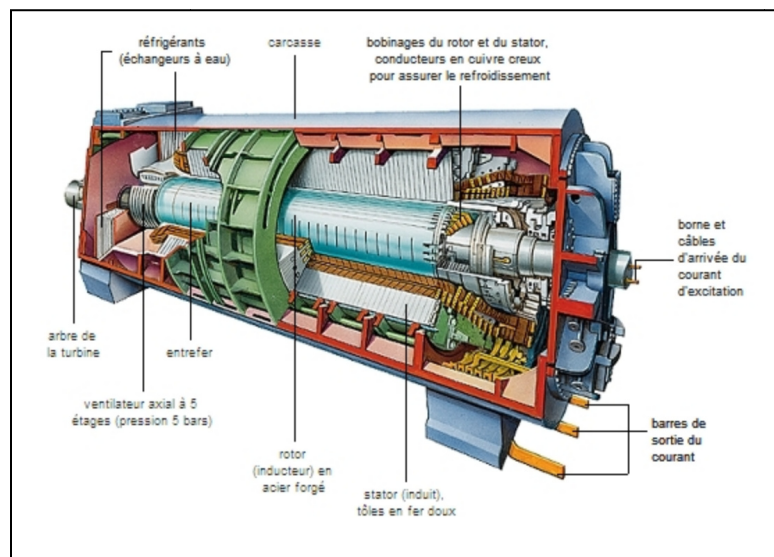
Les machines synchrones sont constituées d'un stator identique à celui de la machine asynchrone et d'un rotor constitué d'un électro aimant ou aimant permanent avec le même nombre de pôles que le stator.

Le stator :



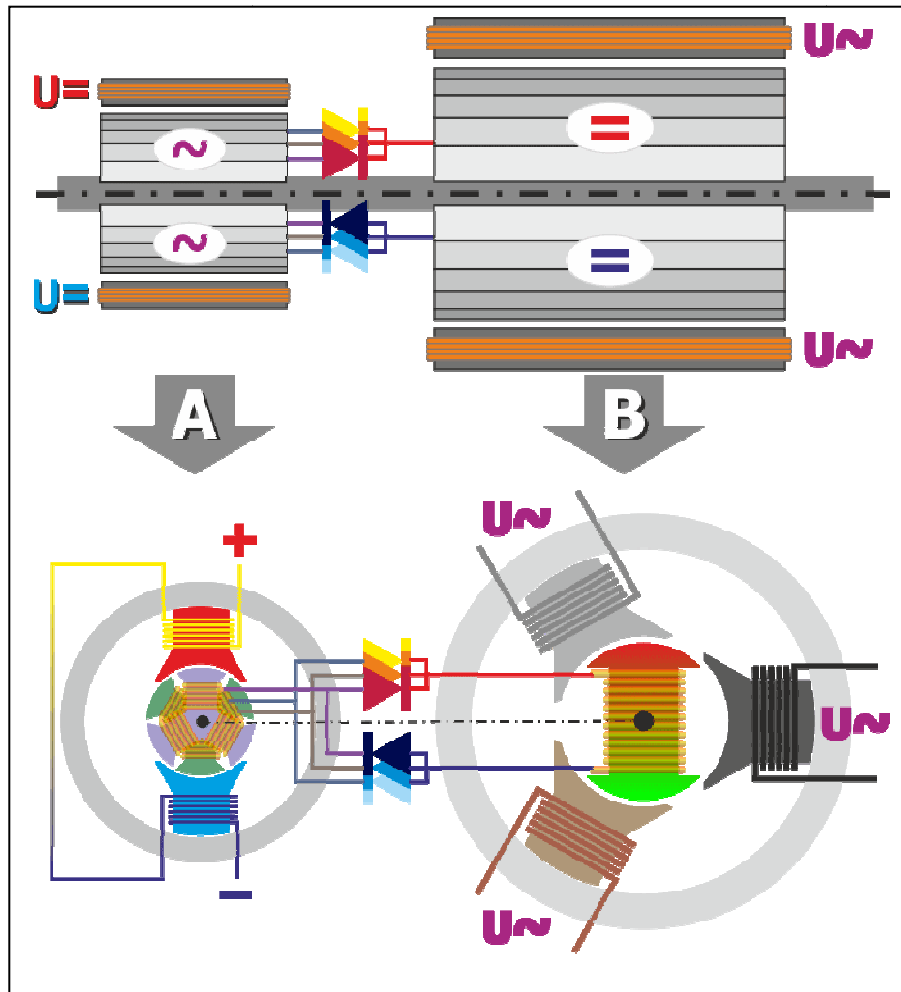
Le rotor :

Soit on utilise un inducteur qui sera alimenté en continu par l'intermédiaire de balais.



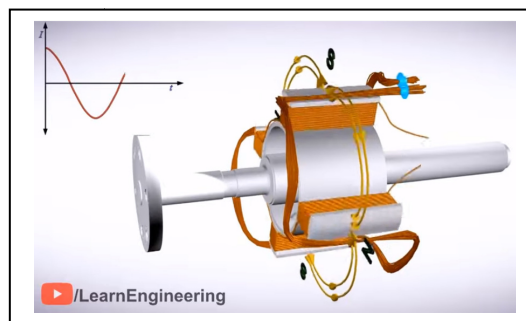
La machine synchrone

Soit on utilise un fonctionnement sans balais grâce à un alternateur inversé qui alimente l'inducteur grâce à un pont redresseur monté sur l'arbre.



2.2. Principe de fonctionnement:

Fonctionnement en alternateur :



Ressource vidéo:

<https://www.youtube.com/watch?v=8d5g-6-LG8>

La machine synchrone

En résumé:

On alimente le rotor qui tourne par un courant continu.
(Appelée roue polaire)

Le champs magnétique est tournant pour les enroulements du stator et ceux-ci seront le siège de tensions induites.

En plaçant des enroulement triphasé, on obtiendra un réseau triphasé de tensions.

La fréquence des tensions sera directement liée à la vitesse du rotor et au nombre de paire de pôles.

$$f = p.n$$

La valeur efficace des tensions sera directement proportionnelle à la valeur du flux (donc du courant d'excitation, à la vitesse et au nombre de spires des enroulements du stator)

$$E = 4,44 . \hat{B} . N . S . f$$

Fonctionnement en moteur :

On alimente le rotor qui tourne par un courant continu.
(Appelée roue polaire)

On alimente le stator par un réseau de tensions triphasées de fréquence f .

le rotor va chercher à s'aligner avec le champs magnétique tournant crée par le stator.

La vitesse de rotation de la machine va donc correspondre à la fréquence des tensions statoriques divisées par "p" paires de pôles. D'ou le nom: moteur synchrone.

La difficulté ici c'est que le pilotage de la machine ne peut se faire qu'en connaissant la position du rotor afin de la placer le flux statorique en adéquation avec le flux rotorique.

Par conséquent, on ne peut contrôle le moteur synchrone que par l'intermédiaire d'un variateur de vitesse.

C'est par un contrôle vectoriel de flux qu'on peut maitriser la vitesse et le couple

La machine synchrone

Exercices sur les puissances d'un alternateur triphasé:

Exercice 1 :

Un alternateur hexapolaire tourne à 1000 tr/min.

Calculer la fréquence des tensions produites.

Même question pour une vitesse de rotation de 1200 tr/min.

Exercice 2 :

Un alternateur triphasé a une tension entre phases de 400 V. Il débite un courant de 10 A avec un facteur de puissance de 0,80 (inductif).

Déterminer les puissances active, réactive et apparente misent en jeu.

Exercice 3 :

Un alternateur triphasé débite un courant de 20 A avec une tension entre phases de 220 V et un facteur de puissance de 0,85.

L'inducteur, alimenté par une source de tension continue de 200 V, présente une résistance de 100 Ω . L'alternateur reçoit une puissance mécanique de 7,6 kW.

Calculer :

1- la puissance utile fournie à la charge

2- la puissance absorbée

3- le rendement

Exercice 4 :

Un alternateur triphasé est couplé en étoile. Sur une charge résistive, il débite un courant de 20 A sous une tension de 220 V entre deux bornes de l'induit. La résistance de l'inducteur est de 50 Ω , celle d'un enroulement de l'induit de 1 Ω . Le courant d'excitation est de 2 A. Les pertes collectives sont évaluées à 400 W.

Calculer :

1- la puissance utile

2- la puissance absorbée par l'inducteur

3- les pertes Joule dans l'induit

4- le rendement

Exercice 5 :

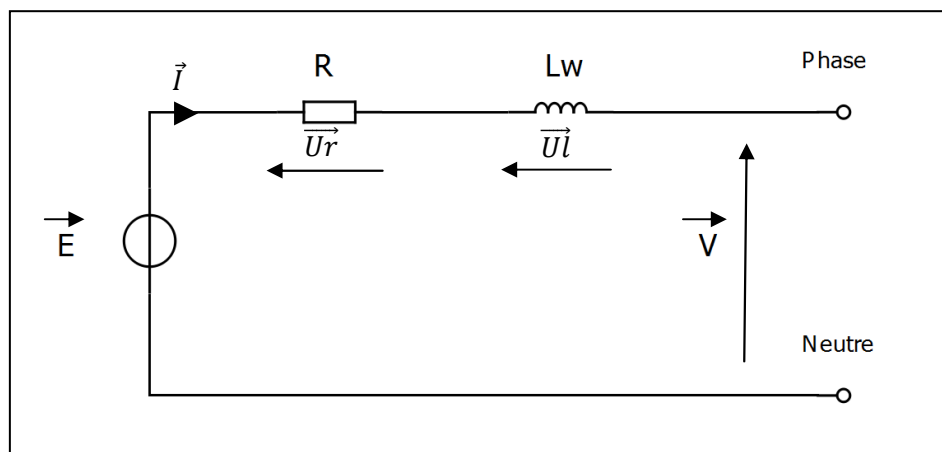
Un alternateur triphasé couplé en étoile alimente une charge résistive. La résistance d'un enroulement statorique est $R_S = 0,4 \Omega$. La réactance synchrone est $X_S = 20 \Omega$. La charge, couplée en étoile, est constituée de trois résistances identiques $R = 50 \Omega$.

- 1- Faire le schéma équivalent du circuit (entre une phase et le neutre).
- 2- Sachant que la tension simple à vide de l'alternateur est $E = 240 \text{ V}$, calculer la valeur efficace des courants de ligne I et des tensions simples V en charge.
- 3- Calculer la puissance active consommée par la charge.

2.4. Modèle de Ben Eschenburg de la machine synchrone :

Fonctionnement en alternateur :

Le modèle retenue pour représenter le comportement de la machine synchrone est celui où le circuit magnétique est considéré comme non saturé:



E est la tension simple à vide entre phase et neutre.

V est la tension simple du réseau entre phase et neutre.

R est la résistance d'une phase statorique.

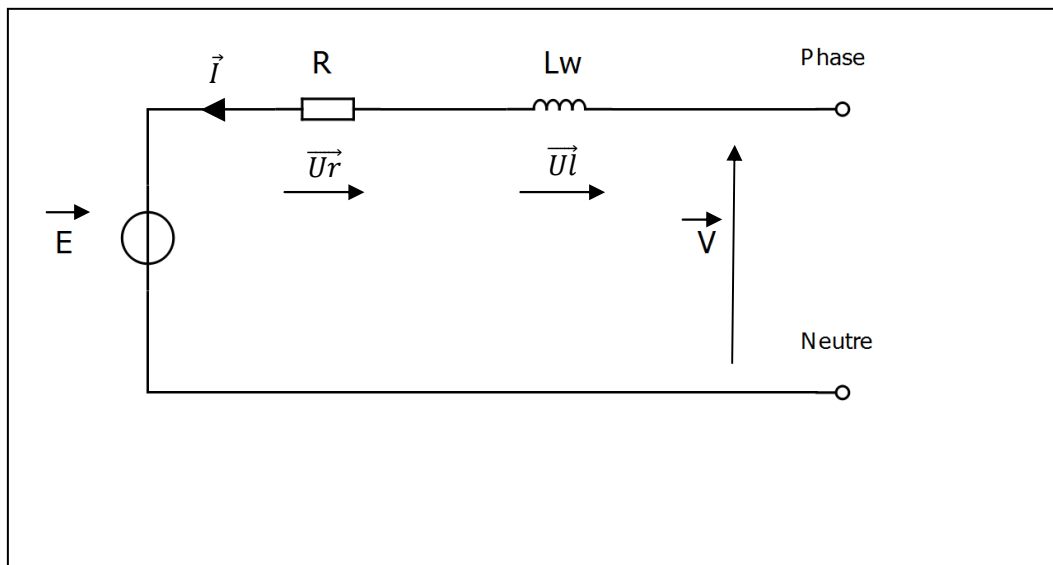
L_w est la réactance synchrone qui tient compte des flux de fuite et de la réaction d'induit qui tend à réduire la tension induite lorsque l'alternateur débite un courant.

La machine synchrone

Exercice 6:

1. Ecrire la loi des mailles.
2. Dessiner le diagramme de Fresnel en prenant $V=230V$ comme référence de phase.

Fonctionnement en moteur:



Exercice 7:

1. Ecrire la loi des mailles.
2. Dessiner l'allure du diagramme de Fresnel en prenant V comme référence de phase.

2.5. Expression des puissances en fonctionnement moteur et alternateur:

Expression des puissances en fonctionnement alternateur:

Exercice 8:

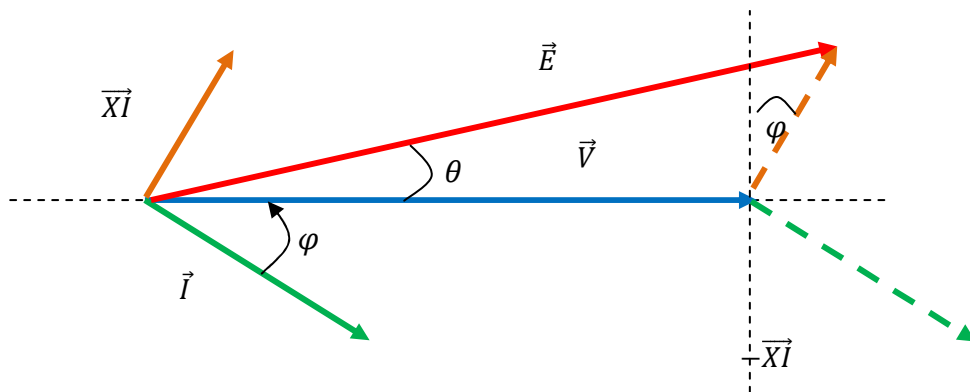
On reprend le diagramme de Fresnel mais on néglige RI devant XI :

En fonctionnement alternateur, la loi des mailles donne :

$$\vec{E} - \overline{XI} - \vec{V} = \vec{0}$$

I est en retard d'un angle φ sur V référence de phase.

Le diagramme de Fresnel sera :



Expression des puissances en moteur et alternateur:

1. Donner l'expression de la puissance active délivrée par l'alternateur.
2. Donner l'expression de la puissance réactive donnée par l'alternateur.
3. Montrer que en surlignant le diagramme que $XI \cos \varphi = E \sin \theta$.
4. Montrer que en surlignant le diagramme que $XI \sin \varphi = E \cos \theta - V$
5. En exprimant $I \cos \varphi$ montrer que la puissance active se met sous la forme:

$$P = \frac{3VE \sin \theta}{X}$$

6. En exprimant $I \sin \varphi$ montrer que la puissance réactive se met sous la forme:

$$Q = \frac{3V}{X} \cdot (E \cos \theta - V)$$

7. Placer deux axes qui permettront de déterminer rapidement avec une proportionnalité de $\frac{3V}{X}$ les valeurs des puissances active et réactive échangées avec la charge.

La machine synchrone

Expression des puissances en fonctionnement moteur:

Exercice 9:

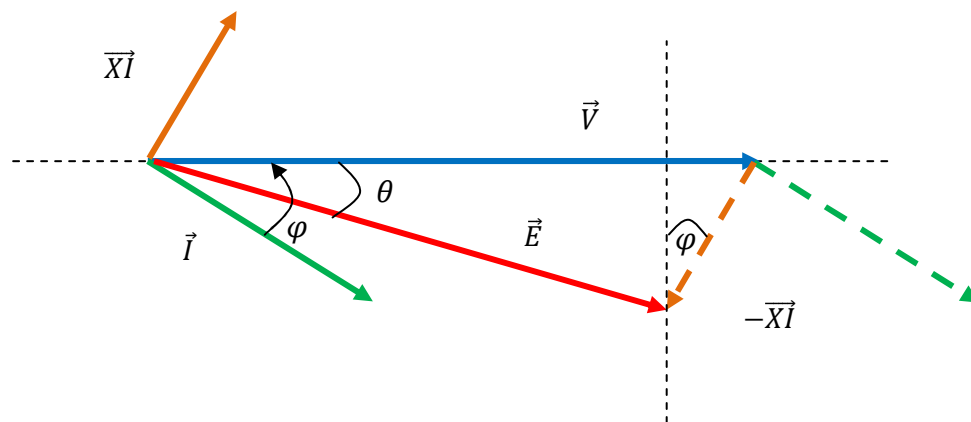
On reprend le diagramme de Fresnel mais on néglige RI devant XI :

En fonctionnement alternatif, la loi des mailles donne :

$$\vec{E} + \vec{XI} - \vec{V} = \vec{0}$$

I est en retard d'un angle φ sur V référence de phase.

Le diagramme de Fresnel sera :



Expression des puissances en moteur et alternateur:

1. Donner l'expression de la puissance active délivrée par l'alternateur.
2. Donner l'expression de la puissance réactive donnée par l'alternateur.
3. Montrer que en surlignant le diagramme que $XI \cos\varphi = E \sin\theta$.
4. Montrer que en surlignant le diagramme que $XI \sin\varphi = V - E \cos\theta$.
5. En exprimant $I \cos\varphi$ montrer que la puissance active se met sous la forme:

$$P = \frac{3VE \sin\theta}{X}$$

6. En exprimant $I \sin\varphi$ montrer que la puissance réactive se met sous la forme:

$$Q = \frac{3V}{X} \cdot (V - E \cos\theta)$$

7. Placer deux axes qui permettront de déterminer rapidement avec une proportionnalité de $\frac{3V}{X}$ les valeurs des puissances active et réactive échangées avec la charge.

La machine synchrone

Remarque sur l'angle θ :

Cet angle se nomme angle de pilotage.

Lorsqu'on fait fonctionner un moteur synchrone pilotée par un variateur de vitesse, on essaie de maintenir cet angle à une valeur proche de 90° de manière à produire le maximum de puissance mécanique.

Si cet angle dépasse 90° , la machine synchrone va décrocher et on se trouve dans un régime instable.

3. Exercices d'application:

Exercice 10:

Une machine synchrone a les caractéristiques suivantes :

- tensions : 380 / 660 V
- puissance apparente : 20 kVA
- 6 pôles - fem d'une phase : $E = 3.f.l_{ex}$ où f est la fréquence des tensions statoriques et l_{ex} le courant d'excitation.
- résistance du stator négligeable

On rappelle que pour une machine tournante $P = T.\Omega$ (P en W, T en N.m, Ω en rd/s).

1 Fonctionnement en alternateur

1.1 Comment doit-on coupler le stator de cette machine si on veut la coupler sur un réseau triphasé 380 / 660 V , 50Hz ?

Quelle doit-être la vitesse de rotation du rotor si on veut que les fem soient de fréquence 50 Hz ?

1.2 On a fait débiter l'alternateur dans des inductances pures à sa vitesse nominale et on a relevé les valeurs suivantes :

- courant d'excitation $l_{ex} = 2,8$ A
- tension entre phases $U = 540$ V , $f = 50$ Hz
- courant en ligne $I = 10$ A

Donner le schéma équivalent d'une phase et calculer la valeur de réactance synchrone X . Montrer que $X = 0,216 f$ (f étant la fréquence des tensions stator).

La machine synchrone

2.Fonctionnement en moteur:

Le moteur synchrone entraîne une charge dont le couple résistant T_r est constant et vaut 120 N.m lorsqu'elle tourne à 1000 tr/mn. Le moteur sera considéré sans pertes.

2.1 Calculer la puissance active P absorbée par le moteur .Pourquoi cette puissance est-elle constante ?

2.2 Le moteur est alimenté par un réseau triphasé 380 / 660V , 50Hz. La puissance réactive du moteur est nulle, quelle est alors la valeur du courant en ligne I et celle du déphasage φ . Tracer sur votre copie le diagramme vectoriel à l'échelle 1cm = 50V et mesurer E . En déduire I_{ex} .

Exercice 11:

Un alternateur, triphasé, couplé en étoile, comporte 26 pôles et doit fournir entre phases une tension de fréquence 50 Hz et de valeur efficace 5650 V quel que soit le courant appelé en ligne. Pour simplifier cette étude, on admettra que la machine est non saturée et que la caractéristique interne (tension entre phases à vide E_v en fonction du courant d'excitation I_{ex} et à fréquence de rotation nominale n_N peut être assimilée à une droite d'équation : $E_v = 10,7 \cdot I_{ex}$, avec E_v en volts et I_{ex} en ampère.

Une mesure à chaud en courant continu a permis de déterminer la résistance d'un enroulement du stator $R = 5,4 \text{ m}\Omega$.

Un essai en court-circuit à courant d'excitation $I_{ex} = 434 \text{ A}$ a donné $I_{cc} = 2000 \text{ A}$.

1. calculer la fréquence de rotation n de l'alternateur en tr/s
2. calculer la réactance synchrone par phase
3. Déterminer les valeurs à donner au courant I_{ex} (on négligera la résistance des enroulements du stator) pour $I = 3330 \text{ A}$ dans une charge inductive de $\cos \varphi = 0,9$.
4. La résistance de l'enroulement du rotor étant $R_e = 0,136 \Omega$, et la somme des pertes dans le fer et mécaniques valant 420 kW, calculer le rendement pour la charge nominale définie à la question 3.

Exercice 12:

(Etude de l'alimentation électrique d'un Airbus A320) En vol, la génération électrique est assurée par deux alternateurs principaux de 90 kVA qui délivrant un système triphasé de tensions 115V/200 V, 400 Hz.

La fréquence est maintenue constante grâce à une régulation hydraulique de la vitesse de rotation des alternateurs.

On s'intéressera aux turboalternateurs principaux on fera l'étude en fonctionnement 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 115V / 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 : 12000 tr/min

Facteur de puissance $0,75 < \cos \varphi < 1$

Résistance d'induit (par phase) $r = 10 \text{ m}\Omega$

L'induit est couplé en étoile.

On a effectué deux essais à vitesse nominale constante : n_n

-Essai en génératrice à vide : on a modélisé la caractéristique à vide E_v : la valeur de la f.e.m induite à vide dans un enroulement en fonction de le l'intensité du courant inducteur par l'équation : $E_v = 4,4 \cdot I_e$.

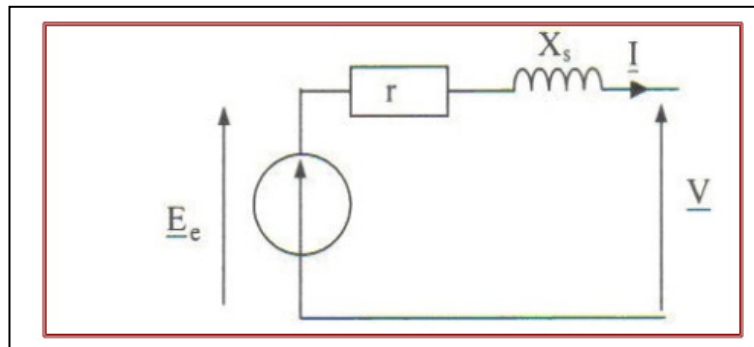
-Essai en court-circuit : dans le domaine utile, la caractéristique de court circuit est la droite d'équation $I_{cc} = 3,07 \cdot I_e$, I_{cc} est la valeur efficace de l'intensité de court circuit dans un enroulement de stator.

1) En fonctionnement nominal :

- a) Calculer la pulsation des tensions de sortie de l'Alternateur.
- b) Déterminer le nombre de paires de pôles de la machine.
- c) Calculer la valeur efficace du courant d'induit nominal I_n .

La machine synchrone

2) On suppose que l'alternateur est non saturé, et pour décrire son fonctionnement on utilise le modèle équivalent par phase représenté ci-dessous.



a) Calculer l'impédance synchrone Z_s de l'alternateur.

b) En déduire la réactance synchrone X_s .

3) Dans ce qui suit on négligera l'influence des résistances statoriques r .

a) Déterminer l'intensité I_{e0} du courant inducteur pour un fonctionnement à vide sous tension nominale.

b) La charge est triphasée équilibrée de nature inductive, l'alternateur fonctionne dans les conditions nominales, il débite son courant nominal $I_n = 260 \text{ A}$. Pour un $\cos \varphi = 0,86$, représenter sur votre feuille le diagramme vectoriel des tensions et en déduire la valeur de la F.e.m induite E_v .

c) Déterminer la valeur du courant d'excitation qui permet de maintenir $V = 115 \text{ V}$ pour un fonctionnement à $\cos \varphi = 0,86$.

Exercice 13:

Extrait sujet 2019:

Partie A. Dimensionnement des groupes électrogènes de secours et des batteries des ASI

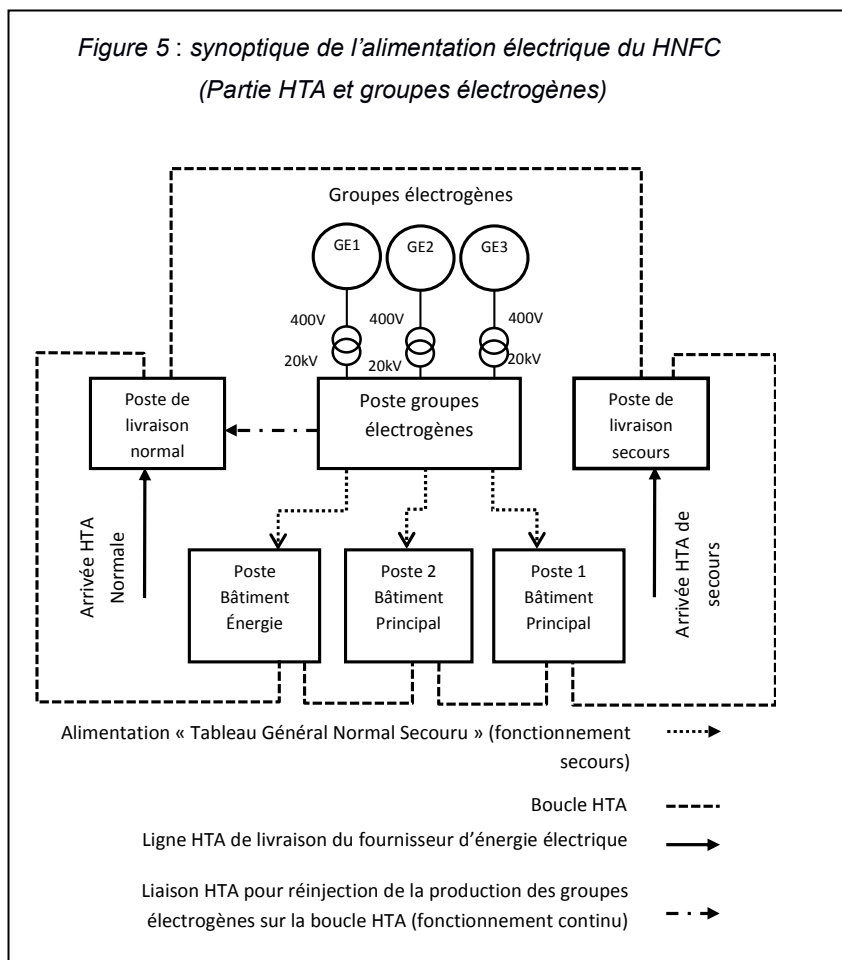
Validation de l'autonomie des groupes électrogènes en carburant.

Pour faire face à une rupture totale du réseau de distribution HTA du fournisseur d'énergie électrique, le centre hospitalier Nord Franche-Comté (HNFC) doit être équipé d'une centrale utilisant des groupes électrogènes.

Cette installation peut aussi être utilisée en complément du réseau HTA lors de périodes de pic de consommation où l'énergie est facturée à un tarif plus élevé.

Cette centrale présente deux modes de fonctionnement :

- le mode continu qui est utilisé lorsque la centrale vient en complément du réseau ;
- le mode secours qui est utilisé lorsque la centrale doit palier une défaillance du réseau d'alimentation HTA.



La machine synchrone

Document 1 : extrait de la documentation des groupes électrogènes

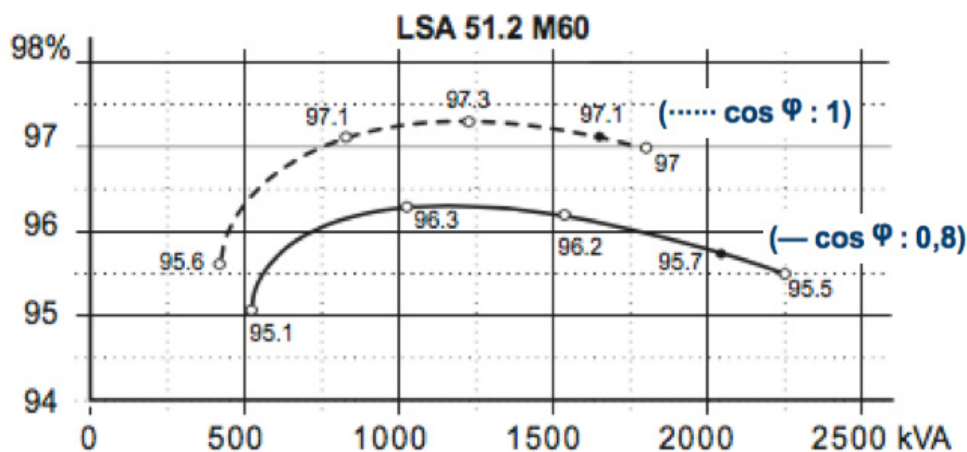
Données générales	
Marque	MITSUBISHI
Type	S16R-PTA2
Nombre de cylindres	16
Disposition des cylindres	V
Cylindrée	65.37 l
Vitesse de rotation	1500 tr.min ⁻¹
Type de régulateur moteur	ELEC
Puissance mécanique moteur mode permanent	1720 kW
Puissance mécanique moteur mode secours	1810 kW
Carburant	
Consommation spécifique à la puissance nominale mode continu	210 g.kW ⁻¹ .h ⁻¹
Consommation spécifique à la puissance nominale mode secours	212 g.kW ⁻¹ .h ⁻¹
Carburant	diesel
Masse volumique mini	0,84kg.l ⁻¹

Document 2 : extrait de la documentation des alternateurs

$\cos\varphi = 0,8$

Couplage Y-50Hz-1500 tr.min ⁻¹		
Service	Continu	Secours
Tension composée	400V	400V
Puissance apparente	2050 kVA	2155 kVA
Puissance active	1640 kW	1724 kW

Courbe du rendement en fonction de la puissance apparente délivrée



La machine synchrone

Q1. Déterminer le rendement η d'un alternateur pour le fonctionnement à pleine puissance en mode secours pour $\cos\varphi = 0,8$.

Q2. En déduire la valeur de la puissance mécanique $P_{méca}$ à fournir à un alternateur.

Q3. Montrer que les moteurs diesels sont bien adaptés aux alternateurs et permettent la pleine puissance du mode de fonctionnement secours.

Q4. Calculer la consommation horaire massique $Conso_m$ en carburant à pleine puissance du moteur d'un groupe électrogène pour le fonctionnement en mode secours.

Q5. En déduire sa consommation horaire volumique $Conso_V$.

En cas de défaillance du réseau d'énergie, l'hôpital doit s'assurer de la disponibilité de moyens d'alimentation autonome en énergie afin de garantir la sécurité des personnes hébergées pendant quarante-huit heures au moins (extrait du code de la sécurité civile).

Q6. Calculer (en m^3) la quantité minimale V_{min} de carburant qui permettra de respecter les obligations légales d'alimentation autonome en cas de défaillance des réseaux d'alimentation.

Partie B. Modélisation d'un alternateur et réglage de sa tension de sortie

Modélisation d'un alternateur

En mode secours, le fonctionnement des groupes électrogènes est autonome et leur tension de sortie n'est pas imposée par un réseau extérieur. Afin d'assurer la qualité de la tension produite, il est impératif d'en contrôler la valeur efficace.

L'objectif de cette partie est d'identifier les paramètres sur lesquels on pourra agir afin d'ajuster la valeur efficace de la tension produite par un alternateur en mode secours.

On donne sur l'annexe n°1 les courbes obtenues lors des essais à vide et en court-circuit de l'alternateur ainsi que les valeurs de la tension et du courant qui permettent de calculer la résistance d'une phase de l'alternateur.

L'induit (stator) de l'alternateur est couplé en étoile.

On supposera la machine non-saturée et on utilisera le modèle de Behn-Eschenburg donné ci-après :

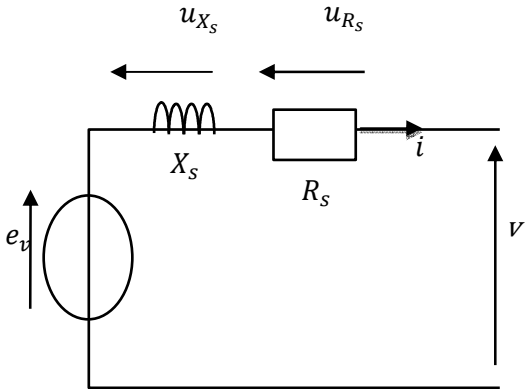
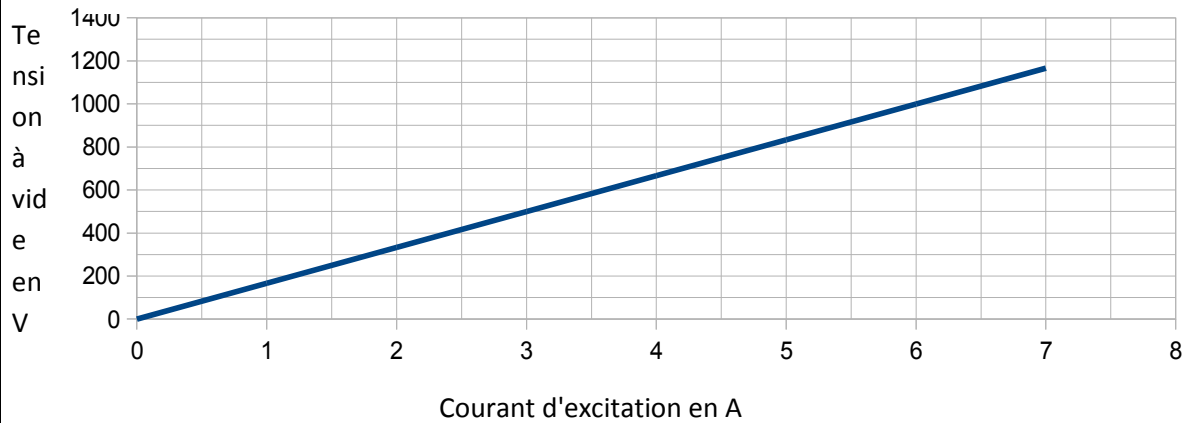


Figure 7 : modèle d'une phase de l'alternateur.

Annexe n°1: Essais réalisés sur un alternateur

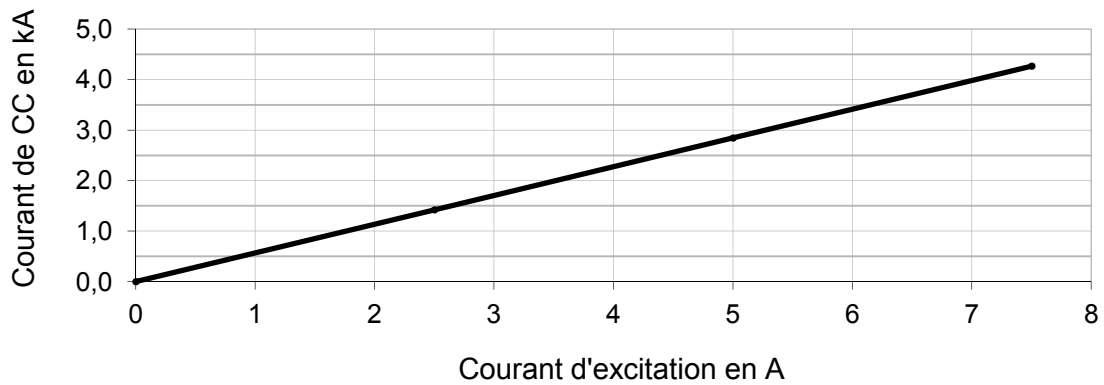
Essai à vide

Tension à vide aux bornes d'un enroulement en fonction du courant d'excitation



Essai en court-circuit

Courant de court circuit dans un enroulement en fonction du courant d'excitation

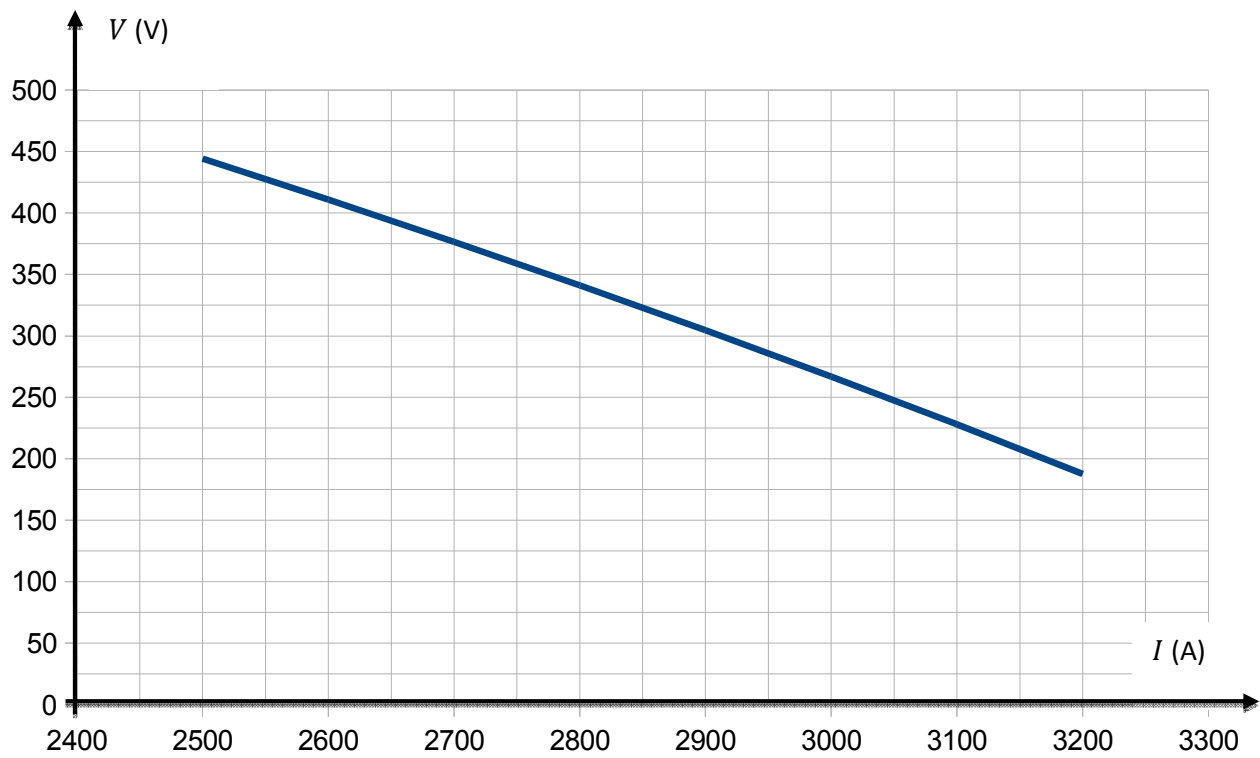


Essai sous une tension continue aux bornes d'un enroulement du stator :

$$U_{continu} = 15 \text{ V et } I_{continu} = 3000 \text{ A}$$

Annexe n°2

Courbe $V(I)$ à $I_{ex}=6,4$ A et $n=1500$ tr.min⁻¹



La machine synchrone

En vous aidant des données de l'annexe n°1 :

Q7. Montrer que l'impédance Z_S regroupant R_S et X_S , a pour valeur $290 \text{ m}\Omega$;

Montrer que R_S a pour valeur $5 \text{ m}\Omega$;

En déduire la valeur de X_S .

La valeur de X_S déterminée précédemment a permis de tracer la caractéristique en charge de l'alternateur (annexe n°2).

Q8. Pour un fonctionnement en mode secours, calculer l'intensité I_{ms} du courant débité par une phase de l'alternateur sous une tension composée de valeur efficace nominale $U = 400 \text{ V}$ et un $\cos\varphi = 0,8$.

Q9. Relever sur l'annexe 2, la valeur efficace de la tension V pour $I = I_{ms}$.

Q10. Pour un fonctionnement en mode continu, on montre que le courant débité par chaque phase de la machine est $I_{mc} = 2,96 \text{ kA}$. Si on ne change aucun réglage par rapport au mode secours, comment la valeur efficace V va-t-elle évoluer ? Justifier la réponse.

Q11. Afin de garder une tension de sortie $U = 400 \text{ V}$, quelle grandeur du modèle doit-on ajuster ? Sur quelle autre grandeur et comment faut-il agir pour y parvenir ?