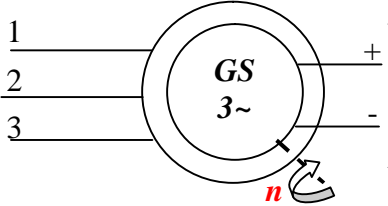


Résumé du cours

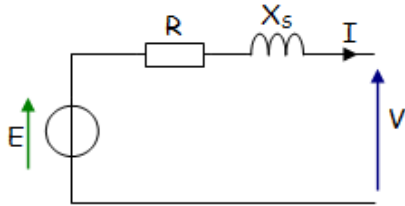
Principe

Stator constitué de 3 enroulements produisant un système de f.é.m. triphasé équilibré et de fréquence : $f = p.n.$



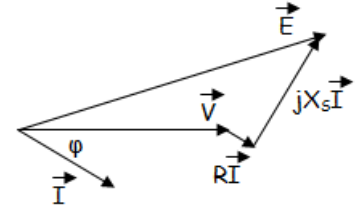
Rotor constitué d'électroaimants alimentés en courant continu et entraîné à la vitesse de rotation n .

Modèle équivalent électrique d'une phase de l'alternateur



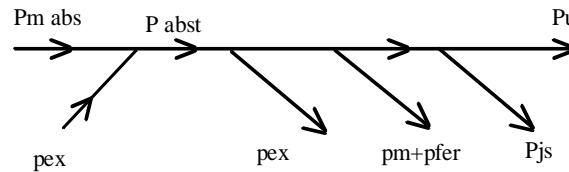
$$\underline{V} = \underline{E} - \underline{RI} - jX_s \underline{I}$$

Diagramme vectoriel



Bilan des puissances

- $P_u = \sqrt{3} U I \cos \varphi$
- $P_{abst} = P_u + \Sigma \text{pertes} = P_u + p_{ex} + p_m + p_{fer} + p_{js}$ ou $P_{abst} = P_{m \text{ abs}} + p_{ex}$
- P_{abs} puissance mécanique absorbée $P_{abs} = C_M \cdot \Omega$



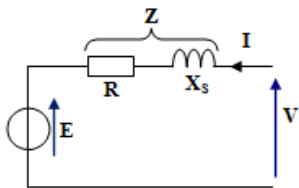
- $p_{js} = 3.r.I^2(Y) = 3.r.J^2(\Delta) = 3/2.R_{ab}.I^2$ (\forall couplage)
- p_{fs} : pertes fer et p_m : pertes mécaniques.
- p_{ex} puissance absorbée par le circuit d'excitation et perdue par effet joule: $p_{ex} = V_e \cdot I_{ex} = r_{ex}.I_{ex}^2$
- Rendement : $\eta = P_u / P_{abst}$

Réversibilité : Moteur synchrone triphasé

La machine synchrone couplée sur le réseau tourne à la vitesse de synchronisme $n = f/p$.

Schéma équivalent, équation :

Puissance et Rendement :



$$\underline{V} = \underline{E} + \underline{ZI}$$

- $P_a = \sqrt{3} U I \cos \varphi$
- $P_u = P_a - \Sigma \text{pertes} = P_a - (p_{ex} + p_m + p_{fer} + p_{js})$
- Rendement : $\eta = P_u / P_{abst}$

Activité 13

TD: Machine synchrone

EXERCICE 1 : Un alternateur monophasé doit fournir une tension 230V-50Hz pour remplacer le réseau Lydec en cas de coupure dépassant quelques minutes.

1. A quelle vitesse de rotation, en tr/min , doit tourner le rotor de cette machine s'il comporte 2 pôles ?

2. Pendant une coupure Lydec, l'alternateur débite une intensité efficace $I = 27 \text{ A}$ sous $U = 220 \text{ V}$ en 50 Hz, avec un facteur de puissance égal à 0,8.

2.1. Calculer la puissance apparente de l'alternateur dans ces conditions :

2.2. Calculer la puissance active utile et la puissance réactive fournies par cette machine :

2.3. En déduire le rendement de l'alternateur si le moteur diesel lui fournit un couple de moment $C_{mot} = 15,9 \text{ N.m}$ à la vitesse de rotation calculée à la question 1:

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

$I_e(\text{A})$	8	10	11,8	15,4	17	20	26	34
$\Phi(\text{mWb})$	50	61	70	85	90	97	105	108

L'alternateur débite un courant **$I = 150 \text{ A}$** dans une **charge purement inductive** sous la tension **$U = 962 \text{ V}$** entre fils de ligne avec une excitation **$I_e = 15,4 \text{ A}$** .

1. Quelle est le nombre de pôles de l'alternateur ?

2. Quelle est la tension à vide pour **$I_e = 15,4 \text{ A}$** ?

3. Calculer la réactance synchrone par phase pour cette excitation.

EXERCICE 3 : Un alternateur possède un stator monté en **étoile**. Son rotor tourne à la vitesse de **1500 tr/min**. La fréquence est de **50 Hz**. La résistance d'une phase est **$R = 0,8 \Omega$** . On a relevé la caractéristique à vide :

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

E : fém. d'un enroulement

Un essai en court-circuit a donné **$I_e = 0,5 \text{ A}$** et **$I_{cc} = 48 \text{ A}$** .

1. Calculer la réactance synchrone d'induit **X_s** .

2. L'alternateur débite dans un récepteur inductif dont le facteur de puissance est **0,8**, un courant de **30 A** en ligne sous une tension de **380 V** entre phases. Quelle est l'intensité du courant d'excitation ?

3. Donner la valeur de la tension simple à la sortie de l'alternateur dans le fonctionnement suivant :
 $I = 17,65 \text{ A}$; $\cos \varphi = 0.6$ (charge capacitive) ; $I_e = 1 \text{ A}$.

EXERCICE 4 : L'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** en fonction du courant d'excitation **I_e** et à fréquence de rotation nominale **n_N** peut être assimilée à une droite d'équation : **E = 10,7.I_e**, avec **E** en (V) et **I_e** en (A). Une mesure à chaud en courant continu a permis de déterminer la résistance d'un enroulement du stator **R = 5,4 mΩ**.

Un essai en court-circuit à courant d'excitation **I_e = 434 A** a donné **I_{cc} = 2000 A**.

1. calculer la vitesse de rotation **n** de l'alternateur en tr/s

.....

2. calculer la réactance synchrone **X_s** par phase

.....

.....

3. Déterminer la valeur à donner au courant I_e (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 5 : On considère un alternateur monophasé (circuit magnétique non saturé), ayant les caractéristiques suivantes :

- Tension d'induit $U = 400 \text{ V}$;
- Vitesse de rotation $N = 1000 \text{ tr/min}$;
- Fréquence $f = 50 \text{ Hz}$;
- Résistance d'induit $r = 0,02 \Omega$.

Lorsque le courant d'excitation vaut 9 A , la tension à vide est égale à 420 V . De plus, pour un courant d'excitation de 5 A , l'alternateur débite un courant de court-circuit de 307 A .

1) Déterminer le nombre de pôles de l'alternateur.

2) Détermination de la réactance synchrone X_s .

3) Le facteur de puissance de l'installation étant de $0,9$, trouver la f.é.m. nécessaire pour alimenter le réseau sous une tension $U = 380 \text{ V}$, l'alternateur débitant un courant $I = 120 \text{ A}$.

4) En déduire le courant d'excitation correspondant (on considère que la courbe $E(I_e)$ est **linéaire** entre 380 et 450 V).

5) Le rotor consomme un courant de $I_e = 5 \text{ A}$ sous une tension de 17 V, et les **pertes constantes** sont égales à 700 W. Calculer pour les conditions des questions 3) et 4), la puissance utile ainsi que le rendement

EXERCICE 6 : Compensateur synchrone :

Les compteurs d'énergie active et réactive installés sur le tableau d'alimentation d'une usine indiquent respectivement 13750 KWh et 16500 KVARh pour une journée.

1. Quel est le facteur de puissance moyen de cette usine ?

2. On veut relever jusqu'à 0,85 le facteur de puissance moyen par l'emploi d'une machine synchrone surexcitée (compensateur synchrone) fonctionnant à vide. Si on néglige en première approximation la puissance active absorbée par cette machine, quelle devra être la puissance apparente ?

3. En supposant que la machine considérée absorbe une puissance active égale à 6,5 % de sa puissance réactive, quelle est exactement la puissance apparente du compensateur synchrone à installer ?

EXERCICE 7 : Machine synchrone réversible d'une centrale hydroélectrique

Principe de fonctionnement :

Une machine hydraulique (turbine ou pompe) est accouplée à une machine synchrone qui peut fonctionner en alternateur ou en moteur.

Aux heures de pointes le groupe turbine-alternateur fournit de l'énergie au réseau.

Aux heures creuses le groupe moteur-pompe permet de remonter l'eau du bassin aval vers le bassin amont.

Caractéristiques de la machine synchrone :

- Puissance apparente nominale : $S_n = 170 \text{ MVA}$.
- Tension entre phases : $U = 15,5 \text{ kV}$.
- Fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$.
- Fréquence de rotation : $n = 600 \text{ tr/min}$.
- Couplage des enroulements en étoile.
- Pour chaque enroulement :
Nombre de conducteurs : $N = 4200$.
Résistance : $R = 0,01 \Omega$.

Le circuit magnétique n'étant pas saturé, la force électromotrice à vide entre phases E est proportionnelle au courant d'excitation I_e selon la relation : $E = 500 I_e$ (E en V et I_e en A)

La caractéristique de court-circuit correspond à la relation : $I_{cc} = 300 I_e$ (I_{cc} et I_e en A)

I. Calculs préliminaires. Calculer :

1. L'intensité I du courant d'induit nominal :

2. Le nombre de paires de pôles p :

3. Le flux utile par pôle pour un courant d'excitation de 50 A, le coefficient de Kapp valant $K = 2,22$

4. La réactance cyclique synchrone X_s de chaque enroulement.

II. Fonctionnement en alternateur.

L'alternateur fonctionne dans les conditions suivantes :

- Intensité du courant d'excitation : $I_e = 44 \text{ A}$
- Facteur de puissance du réseau : $\cos \varphi = 0,9$ ($\varphi > 0$)

1. Représenter le modèle équivalent de chaque enroulement (on négligera la résistance devant la réactance).

2. Construire le diagramme synchrone et en déduire l'intensité du courant d'induit.

3. Calculer la puissance fournie au réseau et le rendement de l'alternateur sachant que l'ensemble des pertes mécaniques, ferromagnétiques et d'excitation valent $2,8 \text{ MW}$.

III. Fonctionnement en moteur synchrone.

La machine synchrone fonctionne en moteur dans les conditions suivantes :

- Tension d'alimentation du réseau : $U = 15,5 \text{ kV}$.
- Puissance absorbée par l'induit : $P = 120 \text{ MW}$.
- Intensité du courant d'excitation telle que l'intensité I du courant d'induit soit minimale.

1. Dans ces conditions le facteur de puissance $\cos \varphi$ est égal à 1, Calculer I .

2. Représenter le modèle équivalent de chaque enroulement. (On négligera la résistance devant la réactance).

3. Construire le diagramme synchrone et en déduire la force électromotrice E_s par enroulement puis le courant d'excitation.

4. Calculer la puissance utile P_u et le couple utile C_u du moteur. On admettra que les pertes autres que par effet Joule dans l'induit valent encore **2,8 MW**.

.....

.....

Activité 14

Exercices: Machine synchrone

EXERCICE 1 : Un alternateur triphasé tourne à la fréquence de rotation $n = 750 \text{ tr/mn}$. Son stator comporte **120 encoches** régulièrement réparties, chacune d'elles contient **4 conducteurs actifs**.

Toutes les encoches sont utilisées. Les trois enroulements sont couplés en étoile, leur résistance est négligeable; la fréquence des tensions produites est **50 Hz**. Le coefficient de Kapp est égal à **K = 2,14**.

Le circuit magnétique de la machine est tel que, dans la zone utile, l'amplitude Φ du flux embrassé à vide par une spire, varie linéairement en fonction du courant d'excitation I_e .

La courbe représentative de la fonction $\Phi(I_e)$ est une portion de droite passant par l'origine et le point de coordonnées : **$I_e = 15,4 \text{ A}$; $\Phi = 0,085 \text{ Wb}$** .

L'alternateur débite dans une charge purement inductive, sous une tension efficace de **962 V** entre fils de ligne.

On donne : intensité du courant d'excitation **$I_e = 15,4 \text{ A}$** , intensité efficace du courant dans l'induit **$I = 150 \text{ A}$** .

1/ Déterminer le nombre de pôles de l'alternateur.

2/ Quelle est la tension efficace à vide, entre deux bornes de l'alternateur, pour un courant d'excitation d'intensité **$I_e = 15,4 \text{ A}$** ?

3/ Calculer la réactance synchrone X_s de l'alternateur

4/ L'alternateur débite un courant d'intensité **$I = 80 \text{ A}$** dans une charge de nature inductive dont le facteur de puissance vaut **0,8**. L'intensité du courant d'excitation reste égale à **15,4 A**. Calculer la tension entre bornes de l'alternateur. Quelle est la puissance fournie à la charge ?

5/ Reprendre la question précédente, avec les mêmes valeurs numériques, si la charge est de nature capacitive, en gardant la même hypothèse de non saturation.

EXERCICE 2 : Un alternateur triphasé dont les enroulements du stator sont couplés en étoile, fournit en charge normale, un courant d'intensité efficace $I = 200 \text{ A}$ sous une tension efficace entre phases $U = 5 \text{ kV}$ lorsque la charge est inductive ($\cos \varphi = 0,87$).

La résistance d'un enroulement du stator est égale à $r = 0,20 \Omega$. La fréquence de rotation de la roue polaire est $n = 750 \text{ tr/mn}$. Le courant et la tension ont pour fréquence $f = 50 \text{ Hz}$.

L'ensemble des pertes dites "constantes" et par effet Joule dans le rotor atteint 55 kW .

Un essai à vide, à la fréquence de rotation nominale, a donné les résultats suivants (I_e est l'intensité du courant d'excitation ; E la valeur efficace de la tension entre phases) :

$I_e \text{ (A)}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$E \text{ (V)}$	0	1 050	2 100	3 150	4 200	5 200	5 950	6 550	7 000	7 300	7 500

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

1/ Quel est le nombre de pôles du rotor ?

2/ Calculer la réactance synchrone X_s de l'alternateur lorsqu'il n'est pas saturé ? On supposera X_s constante dans la suite du problème.

3/ En déduire la f.é.m. synchrone E au point nominal

4/ Quelle est la puissance nominale de l'alternateur ?

5/ Déterminer le rendement au point de fonctionnement nominal.

EXERCICE 3 : Un alternateur triphasé, dont les enroulements statoriques sont couplés en étoile, est entraîné à sa fréquence de rotation nominale $n' = 1500 \text{ tr/mn}$.

Sa puissance apparente nominale est : $S_n = 3,2 \text{ kVA}$.

La tension entre phases a pour valeur efficace : $U_n = 220 \text{ V}$ et pour fréquence 50 Hz .

Le relevé de la caractéristique à vide $E(I_e)$ à fréquence de rotation nominale a fourni les résultats suivants :

(I_e : intensité du courant d'excitation ; E : tension efficace mesurée entre deux bornes)

$E \text{ (V)}$	0	40	80	120	160	200	240	260
$I_e \text{ (A)}$	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,52	0,72	0,90

Pour un courant d'excitation $I_e = 0,40 \text{ A}$, un essai en court-circuit a montré que le courant dans un enroulement statorique a pour intensité efficace $I_{cc} = 8 \text{ A}$. La résistance du stator est négligeable.

1. Quel est le nombre de pôles du rotor ?

2. Calculer l'intensité efficace I_n du courant nominal que peut débiter l'alternateur.

3. Déterminer la réactance synchrone X_s de l'alternateur quand celui-ci n'est pas saturé.

4. L'alternateur débite un courant d'intensité efficace $I = 8,4 \text{ A}$ dans une charge inductive de facteur de puissance $\cos \varphi = 0,5$. L'intensité du courant d'excitation étant réglée à la valeur $I_e = 0,9 \text{ A}$, estimer la tension entre phases.

5. On suppose que l'estimation précédente correspond à la réalité. On mesure la puissance absorbée par la charge en utilisant la méthode des deux wattmètres. Donner le schéma du montage.