

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

Université d'El -oued

Faculté de science et technologie

Department de Genie Electrique

2^{ér} Année ELT

Electrotechnique Fondamentale 2 cours examen TD

Dr: Guediri abdelkarim

SOMMAIRE

RESUMÉ : ELECTROTECHNIQUE FONDAMENTALE 1	
CIRCUITS MAGNETIQUES.....	2
I. Grandeurs magnétiques	2
I.1. Le vecteur champ d'induction magnétique	2
II. Lois fondamentales du magnétisme.....	2
II.1. Loi de Faraday Loi de Lenz.....	2
II.2. Force appliquée sur une particule ou un conducteur	2
II.3. Applications.....	2
III. Les circuits magnétiques linéaires	2
III.1 Circuit magnétique parfait.....	2
III.2 Conséquences : relations d'Hopkinson.....	2
III.3 Analogie électrique.....	2
IV. Les circuits magnétiques en régime sinusoïdal : bobine à noyau de fer.....	3
IV.1 Caractérisation de la bobine à noyau de fer en régime linéaire.....	3
IV.2 Comportement simplifié dans l'hypothèse de Kapp.....	3
IV.3 Caractérisation de la bobine à noyau de fer en régime non linéaire: saturation du Matériau.....	4
V. Les milieux magnétiques, aimants permanents.....	4
V.1 Cycle d'hystérésis de divers matériaux.....	4
V.2 Droite de charge : Calcul de longueur d'aimant.....	4
V.3 Désaimantation : droite de recul.....	5
V.4 Les électroaimants.....	5
VI. Couplage des circuits	6
VI.1 Rappels sur les inductances.....	6
VI.2 Inductances mutuelles.....	6
TRANSFORMATEUR MONOPHASE	
1 Présentation.....	8
2 Transformateur parfait.....	9

3 Transformateur reel.....	9
4 Calcul du rendement.....	11
5 Autres caractéristiques du transformateur.....	12
exercices corrigés sur le transformateur.....	13

TRANSFORMATEURS TRIPHASES

I.Présentation.....	28
II.Modélisation.....	31
III. Essais.....	31
III.3 Rendement.....	32

Machine à courant continue

I. Introduction.....	38
I. 1 Constitution générale d'une machine à courant continu.....	38
I.2 Modèle équivalent En fonctionnement générateur ,en moteur.....	39
I-3 CARACTERISTIQUES DU MOTEUR.....	39
II.GENERALITE SUR LE MOTEUR A COURANT CONTINU.....	41
III.Moteur à excitation indépendante ou séparée.....	46
V.Démarrage du moteur à excitation séparée.....	50
VII.Bilan énergétique Soient.....	54
EXERCICE DE LA MACHINES A COURANT CONTINUA.....	64

Machine synchrone

1.Constitution et principe de fonctionnement.....	85
2. Modélisation.....	86
3. Bilan des puissances.....	87
4. Bilan des puissances d'un alternateur.....	88
Exercice de la machine synchrone.....	92

Moteur asynchrone triphasé

1. Constitution et principe de fonctionnement.....	136
2. Caractéristiques.....	136
3. Bilan des puissances.....	138
4. Point de fonctionnement du moteur en charge.....	140

5. Complément : caractéristiques $T_r=f(n)$ de quelques charges.....	140
MOTEURS ASYNCHRONES EXERCICES.....	141

Reference

1. Rochlin, I., Mikenberg, M., Landa, E., & Keydar, S. (2018). Imaging shallow-linear diffractors using 3D-converted wave data. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018* (pp. 2697-2701). Society of Exploration Geophysicists.
2. John Hindmarsh, Alasdair Renfrew. "Synchronous machines", Elsevier BV, 1996
3. Pierre MAYÈ : Moteurs électriques industriels. Dunod, 2005
4. R. Annequin et J. Boutigny. Cours de sciences physiques, électricité 3. Paris, Vuibert.
5. M. Kouznetsov. Fondement de l'électrotechnique.
6. -H. Lumbroso. Problèmes résolus sur les circuits électriques. Dunod.
7. J.P Perez, R. Carles et R. Fleekinger, Electromagnétisme Fondements et Applications 3ème Edition, 1997.
8. MARCEL Jufer, Electromécanique, Presses polytechniques et universitaires romandes Lausanne, 2004
9. A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans, Electric Machinery McGraw-Hill Higher Education, 2003.

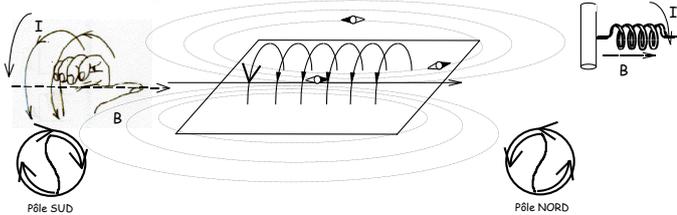
RESUMÉ : ELECTROTECHNIQUE FONDAMENTALE 1

CIRCUITS MAGNETIQUES

I) Grandeurs magnétiques :

I.1) Le vecteur champ d'induction magnétique : \vec{B}

Les lignes de champ vont du Nord vers le Sud



Relation Champ d'induction/ Champ d'excitation

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \text{ avec } \mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

Théorème d'Ampère :

$$\sum H d\ell = \sum NI$$

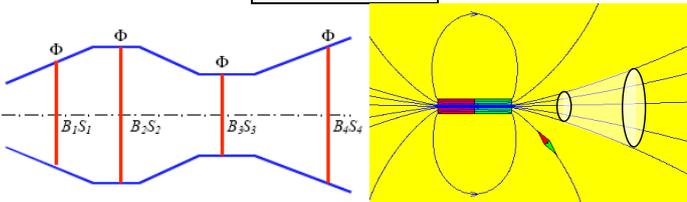
II) Lois fondamentales du magnétisme :

II.1) Loi de Faraday Loi de Lenz

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = \|\vec{B}\| \cdot \|\vec{S}\| \cdot \cos(\vec{B}, \vec{S})$$

$$e(t) = - \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Le courant induit par ses effets s'oppose à la cause qui lui a donné naissance



Dans un circuit magnétique le flux se conserve et la surface décrivant ce flux s'appuie sur les lignes de champ

II.2) Force appliquée sur une particule ou un conducteur :

Loi de Lorentz : $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$

Loi de Laplace : $\vec{F} = i\ell \wedge \vec{B}$

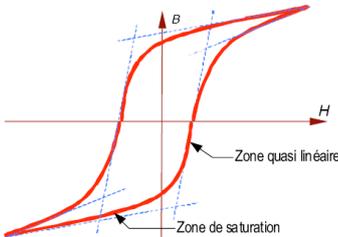
II.3) Applications :

TV , Effet Hall, Haut parleur, MCC, Appareils de mesure magnétoélectrique , Conducteurs tressés

III) Les circuits magnétiques linéaires :

III.1) Circuit magnétique parfait:

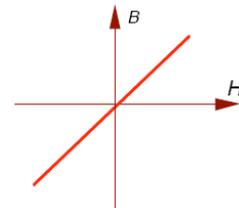
Circuit Non linéaire



Linéarisation

- Pas de lignes de fuites .
- L'induction magnétique est uniforme,
- Circuit linéarisé $B = \mu_0 \mu_r H$, avec μ constant

Circuit linéarisé

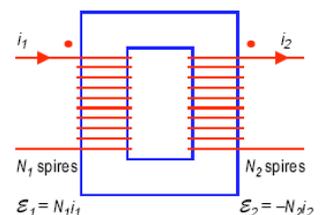


III.2) Conséquences : relations d'Hopkinson:

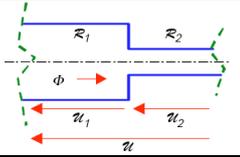
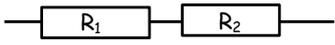
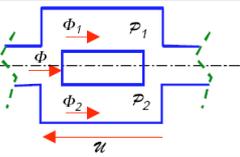
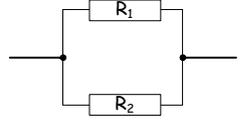
On peut considérer que les lignes de champs sont concentrées dans le circuit magnétique.

$H \cdot \ell = NI = \mathcal{E}$ On a alors : $H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{\phi}{S}$ d'où la relation

$\mathcal{E} = H \cdot \ell = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{\phi}{S} \ell$ avec $\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu S}$ Donc la relation d'Hopkinson : $\sum NI = \left(\sum_i \mathfrak{R}_i \right) \cdot \phi$



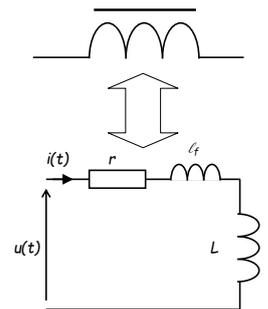
III.3) Analogie électrique:

Grandeurs magnétiques		Grandeurs électriques	
Force magnétomotrice : $\mathcal{E} = Ni$ en A/m ou A.tr/m		Force électromotrice : E en Volts (V)	
flux d'induction : φ en Webers (Wb)		Courant électrique : i en Ampères (A)	
Réluctance : $\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu S}$		Résistance : $R = \rho \frac{\ell}{S}$	
ddp magnétique : $\mathcal{U} = \mathfrak{R} \varphi$		ddp électrique : $U = R I$	
maille magnétique $\sum_{maille} \mathcal{U}_m = 0$		Maille électrique : $\sum_{maille} U_m = 0$	
nœud magnétique $\sum_{noeud} \varphi_m = 0$		nœud électrique : $\sum_{noeud} I_n = 0$	
Association série $\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2$		Association série $R_{eq} = R_1 + R_2$	
Association parallèle : $\frac{1}{\mathfrak{R}_{eq}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} + \frac{1}{\mathfrak{R}_2}$		Association parallèle : $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	

IV) Les circuits magnétiques en régime sinusoïdal : bobine à noyau de fer:

IV.1) Caractérisation de la bobine à noyau de fer en régime linéaire:

- Coefficient d'auto induction : $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$ avec $L = \frac{N^2 \mu_0 S}{\ell}$ et $\phi = N \varphi = Li$
- Afin de tenir compte de la résistance des fils on ajoute une résistance r .
- Le flux de fuite fait apparaître une inductance de fuite. $\ell_f = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{air}}$



IV.2) Comportement simplifié dans l'hypothèse de Kapp: $\ell_f \frac{di(t)}{dt} \text{ et } r i(t) \ll N \frac{d\phi(t)}{dt}$

En régime sinusoïdal $U = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} B_{\max} N S f = 4,44 \times B_{\max} N S f$

La loi d'Hopkinson nous rappelle que $Ni = \mathfrak{R} \cdot \phi$ donc $i = \frac{\mathfrak{R} \cdot \phi}{N} = \frac{\mathfrak{R}}{N^2} \frac{U \sqrt{2}}{\omega} \sin \omega t = \frac{U \sqrt{2}}{L \omega} \sin \omega t$ et l'on retrouve la

définition de l'inductance en régime sinusoïdal : $Z = L \omega$ On a donc toujours $V = L \omega I$ avec $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$

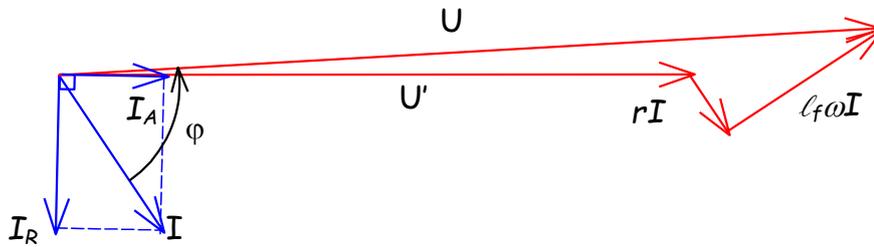
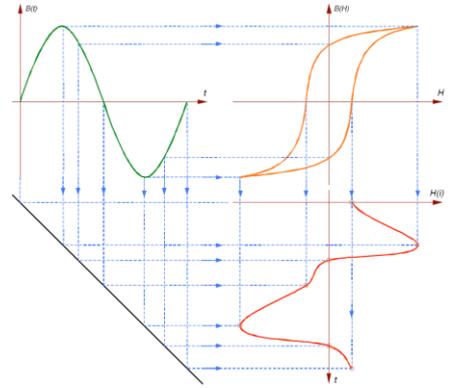
On peut déterminer $X = L \omega = \frac{U^2}{Q_{fer}} = \frac{Q_{fer}}{I_R^2} = \frac{U}{I_R}$

IV.3) Caractérisation de la bobine à noyau de fer en régime non linéaire: saturation du matériau

Le cycle d'hystérésis déforme le courant qui génère donc des harmoniques et des pertes par hystérésis $P_H = k_H \cdot f \cdot B_M^2$ et courant de Foucault

$P_F = k \frac{B_M^2 f^2}{\rho}$ que l'on modélisera par une résistance

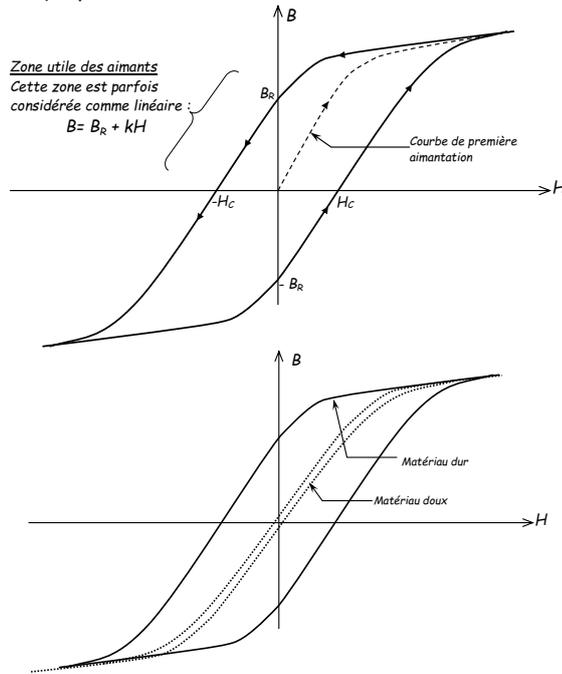
$$R_f = \frac{U^2}{P_{fer}} = \frac{P_{fer}}{I_A^2} = \frac{U}{I_A}$$



V) Les milieux magnétiques, aimants permanents:

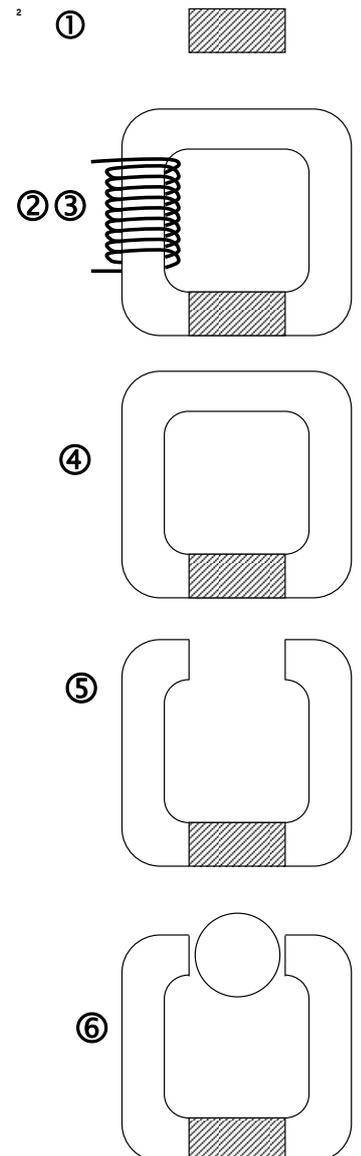
V.1) Cycle d'hystérésis de divers matériaux

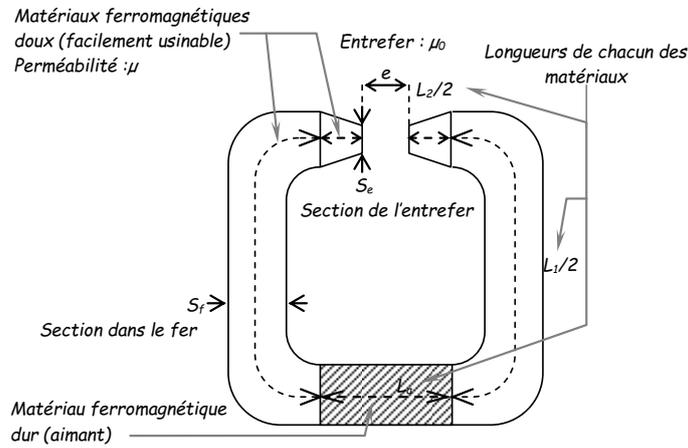
Pour certains matériaux le fait de revenir en arrière fait apparaître un dédoublement de la courbe qui dépend du passé magnétique du matériau qui présente ainsi un effet de mémoire.



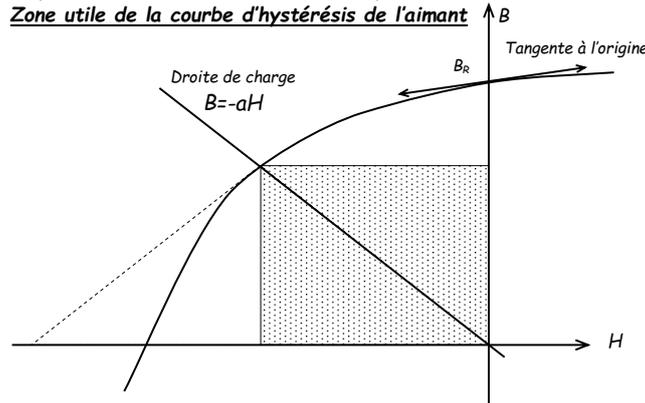
V.2) Droite de charge : Calcul de longueur d'aimant

$$B = -a \times H \quad \text{avec} \quad a = \mu_0 \frac{S_e \times L}{S_a \times e}$$





Son intersection avec la courbe d'hystérésis de l'aimant donne le point de fonctionnement.

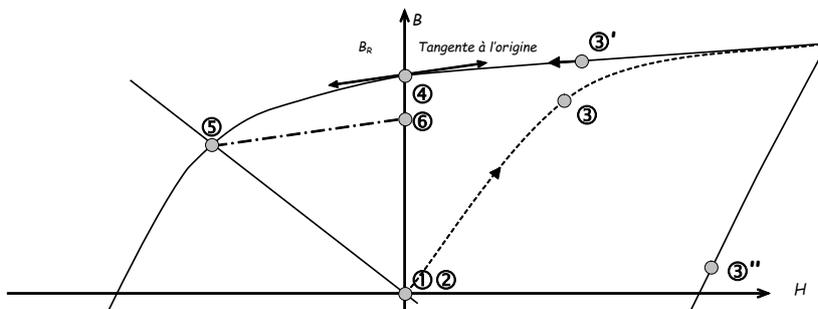


Maximum d'énergie magnétique pour un minimum de volume d'aimant $\left(V_{\text{volume aimant}} = \frac{b_e^2 S_e}{\mu_0} \cdot \frac{1}{B \times H} \right)$: il faut que le produit de

B par H (aire du rectangle) maximum.

Ainsi la longueur d'aimant à usiner est donnée par $L = \frac{S_a B_a}{\mu_0 H S_e} \cdot e$

V.3) Désaimantation : droite de recul



V.4) Les électroaimants:

Un électroaimant génère une force. Le circuit magnétique se déforme de façon à rendre le flux le plus grand possible (donc en diminuant la reluctance du circuit, c'est-à-dire en diminuant l'entrefer)

La force de l'électroaimant est du type :

$$F = \frac{\mu_0}{2} \frac{N^2 I^2}{(e+x)^2} S$$

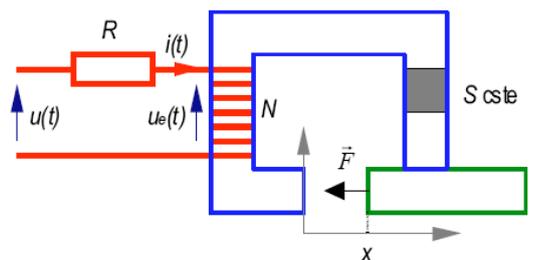
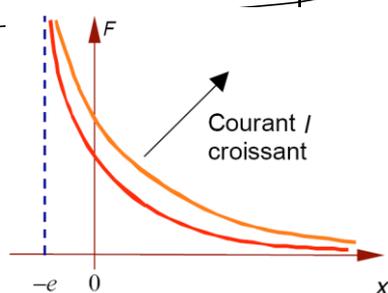


Figure 1 : armature en translation

VI) Couplage des circuits :

VI.1) Rappels sur les inductances:

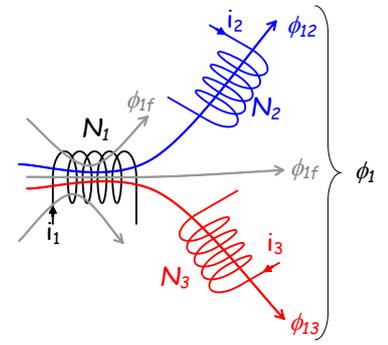
Inductance propre: $L_1 = \frac{N_1 \phi_1}{i_1}$ avec ϕ_1 : tous les flux qui traversent la bobine 1

Inductance principale: $L_{1p} = \frac{N_1 \phi_{1p}}{i_1}$ avec $\phi_{1p} = \phi_1 - \phi_{1f}$: tous les flux utiles qui

traversent des bobines

Inductance de fuite: $\ell_{1f} = \frac{N_1 \phi_{1f}}{i_1}$ avec ϕ_{1f} : tous les flux qui ne traversent aucune partie

utile



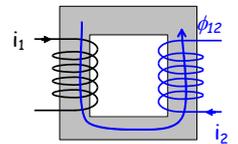
VI.2) Inductances mutuelles: Inductance mutuelle : $M_{12} = \frac{N_2 \phi_{12}}{i_1}$ et $M_{21} = \frac{N_1 \phi_{21}}{i_2}$

VI.2.1) Sans fuites de flux:

Entre deux bobines parfaitement couplées : $\phi_{12} = \phi_{21} = \phi_1 = \phi_2$

$$M_{12} = M_{21} = M$$

$$M = \frac{N_2}{N_1} L_1 = \frac{N_1}{N_2} L_2 \quad \text{et} \quad M = \frac{N_2 N_1}{\mathfrak{R}} \quad \text{et} \quad M = \sqrt{L_2 L_1} \quad \text{et} \quad \frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

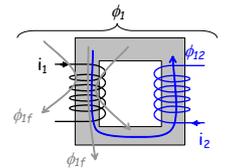


VI.2.2) Avec fuites de flux: coefficients de couplage

$$\ell_{f1} = L_1 - M \frac{N_1}{N_2} \quad \text{et} \quad \ell_{f2} = L_2 - M \frac{N_2}{N_1} \quad \text{où apparaissent les inductances primaires :}$$

$$L_{1p} = L_1 - \ell_{f1} = M \frac{N_1}{N_2} \quad \text{et de même} \quad L_{2p} = L_2 - \ell_{f2} = M \frac{N_2}{N_1} \quad \text{donc} \quad (L_1 - \ell_{f1})(L_2 - \ell_{f2}) = M^2 \quad \text{et en se servant des}$$

inductances primaires $M = \sqrt{L_{2p} L_{1p}}$



- **Coefficient de couplage:** $k_{12} = \sqrt{\frac{\phi_{12} \phi_{21}}{\phi_1 \phi_2}} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \leq 1$ permet de voir le niveau de couplage (=1 si couplé)

- **Coefficient de dispersion de Blondel:** chiffre les fuites : $\sigma_{12} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2} = 1 - k_{12}^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$

➤ Sans fuite : $L_1 L_2 = M^2 \Rightarrow \sigma_{12} = 0$

➤ Avec fuites : $L_1 L_2 > M^2$

- **Coefficient d'Hopkinson:** rapport du flux total sur le flux utile $\gamma = \frac{\phi_1}{\phi_{12}} = 1 + \frac{\phi_{f1}}{\phi_{12}} > 1$

TRANSFORMATEUR MONOPHASE

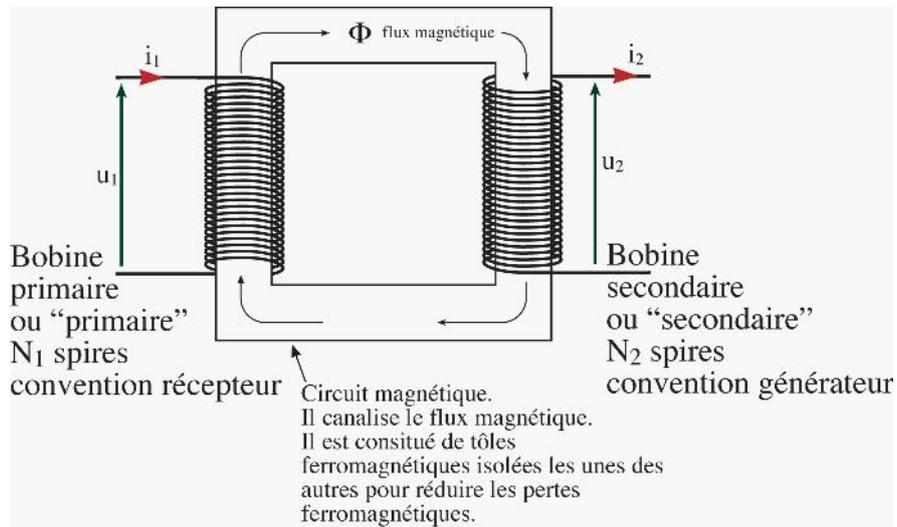
TRANSFORMATEUR MONOPHASE



Transformateur

1 Présentation

1.1 Schéma



1.2 Principe de fonctionnement

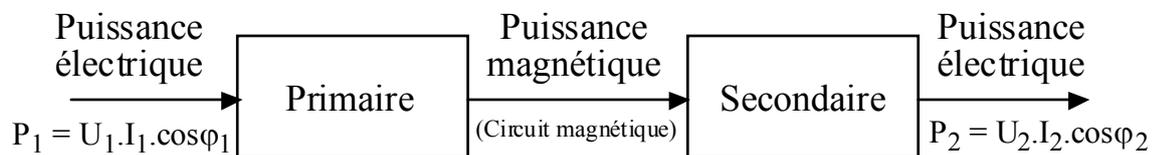
Pour information

Loi de Faraday : une variation de flux à travers une spire crée une f.é.m. e . Inversement une f.é.m. e dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci.

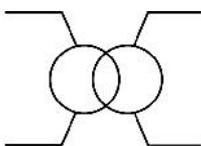
$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

C'est ce phénomène qui est exploité dans le transformateur.

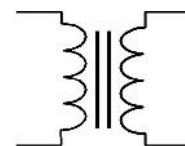
1.3 Transformation d'énergie



1.4 Symboles

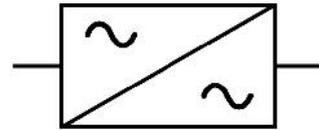


ou



Le transformateur est un convertisseur statique (pas de pièce en mouvement). Il transforme une tension sinusoïdale en une autre tension sinusoïdale de valeur efficace différente.

symbole :



2 Transformateur parfait

Parfait : il n'y a aucune perte ; le rendement est de 100%

On définit **le rapport de transformation m** par :
$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

si $m > 1$, le transformateur est élévateur de tension ;
si $m < 1$, le transformateur est abaisseur de tension.

de plus
$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Comme le transformateur est parfait : $P_1 = P_2$; $Q_1 = Q_2$; $S_1 = S_2$; et $\varphi_1 = \varphi_2$.

Remarque : en observant les valeurs instantanées $u_1(t)$ et $u_2(t)$, on constate qu'elles sont en opposition de phase. C'est-à-dire que lorsque u_1 est maximum, u_2 est minimum.
 $m = -u_2/u_1$

3 Transformateur réel

3.1 Rapport de transformation

Le rapport de transformation se mesure à vide (pas de charge, $I_2=0$)

$$m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

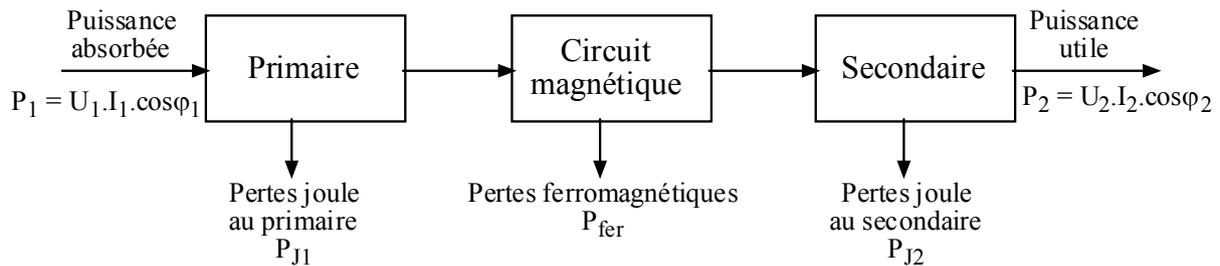
3.2 Transformateur en charge

On constate une chute de tension : $U_2 < m.U_1$.

Plus I_2 augmente (la charge augmente) plus U_2 diminue

Cette dernière observation vient du fait d'une chute de tension provoquée par la résistance du bobinage $\Delta U = r_2.I_2$ (si I_2 augmente ΔU augmente aussi).

3.3 Bilan énergétique



Les pertes fer sont dues à l'hystérésis du matériau ferromagnétique et aux courants de Foucault. Les pertes fer sont proportionnelles à B_{\max}^2 -donc à U_1^2 - et à la fréquence f (voir § 1.2.2.).

Bilan des puissances :
$$P_1 = P_{J1} + P_{J2} + P_{fer} + P_2$$

3.4 Limitation des pertes fer

Pour réduire les pertes par hystérésis, il faut choisir un matériau ferromagnétique avec un cycle d'hystérésis le plus étroit possible.

Pour réduire les pertes par courants de Foucault, le noyau est feuilleté. C'est-à-dire qu'il est constitué de tôles vernies, donc isolées les unes des autres. La taille des boucles de courant de Foucault est alors limitée par l'épaisseur de la tôle. Plus les boucles sont petites, plus les pertes sont réduites.

3.5 Rendement

$$\eta = \frac{P_{\text{utilisée}}}{P_{\text{absorbée}}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_J} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{P_1 - P_{fer} - P_J}{P_1}$$

$$P_J = P_{J1} + P_{J2}$$

Le rendement varie en fonction des conditions d'utilisation du transformateur. Le meilleur rendement s'obtiendra pour les grandeurs d'utilisation nominales indiquées sur la plaque signalétique du transformateur.

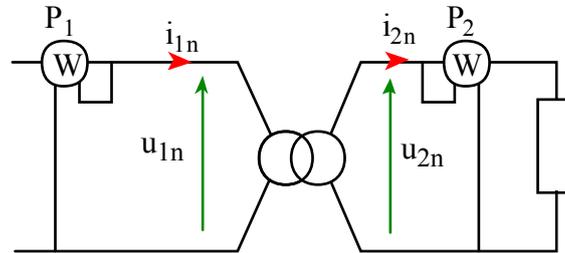
Les bons transformateurs de fortes puissances peuvent atteindre un rendement de 98%.

4 Calcul du rendement

4.1 Mesure directe

Cette méthode consiste à mesurer avec deux wattmètres P_1 et P_2 .

$$y = \frac{P_2}{P_1}$$



4.2 Mesure par la méthode des pertes séparées

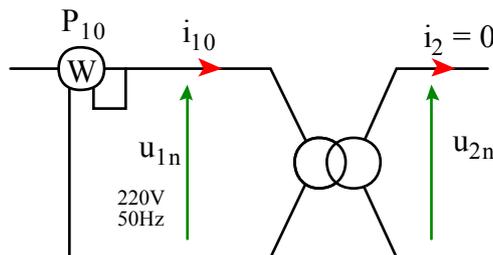
Deux essais particuliers du transformateur permettent de mesurer séparément les pertes par effet joule (p_j) et les pertes ferromagnétiques (p_{fer}).

Cette méthode consiste à évaluer les différentes pertes dans les conditions nominales d'utilisation.

4.2.1 Essai à vide : mesure des pertes fer

Montage :

Mesure à tension nominale.



A vide le circuit secondaire est ouvert : $I_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$ et $P_{J2} = 0$

Bilan des puissances : $P_{10} = P_{J10} + P_{fer}$.

Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules au primaire.

Remarque : l'indice 0 (zéro) indique qu'il s'agit de valeurs à vide.

A vide I_{10} est très faible. Par conséquent $P_{J10} \ll P_{10}$.

Finalement :

essai à vide $P_{10} = P_{fer}$

Complément :

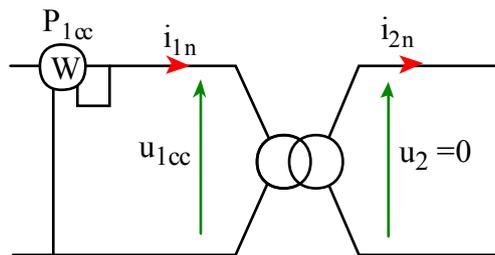
les pertes fer dépendent essentiellement du champ magnétique donc de la tension U_1 et de la fréquence f . Comme ces deux grandeurs restent les mêmes à vide ou en charge, les pertes fer mesurées à vide sont les mêmes que celles en charge.

Il faut donc naturellement faire cet essai à la tension nominale (ex. $U_{1N} = 220$ V).

4.2.2 Essai en court circuit : mesure des pertes joule

Montage :

Mesure à tension réduite et courant nominal.



Le circuit secondaire est en court-circuit : $U_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$

Bilan des puissances : $P_{1cc} = P_{J1cc} + P_{J2cc} + P_{fer}$.

Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules.

Remarque : l'indice cc indique qu'il s'agit de valeurs mesurées en court-circuit.

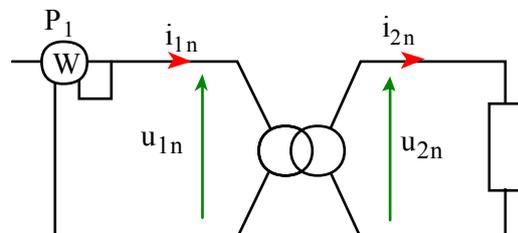
En court-circuit, pour obtenir I_n , il faut travailler à très faible tension U_{1cc} . Par conséquent P_{fer} est très faible.

Finalement : essai en court-circuit $P_{1cc} = P_J$

4.2.3 Essai en charge

Montage :

il faut choisir une charge appropriée pour travailler dans les conditions nominales de tension et de courant. On mesure P_1 .



Rendement : $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{10} - P_{Jcc}}{P_1}$

5 Autres caractéristiques du transformateur

❖ Lecture de la plaque signalétique

Selon la norme NF 15.100, on peut lire sur la plaque signalétique d'un transformateur industriel, les données suivantes :

exemple : 5000 V / 235 V ; 50 Hz ; 8 kVA

Ce qui donne :

$U_{1n} = 5000$ V tension nominale du primaire.

$U_{20} = 235$ V tension à vide du secondaire.

$f = 50$ Hz fréquence nominale de fonctionnement.

$S_{1n} = 8$ kVA puissance apparente nominale au primaire

exercices corrigés sur le transformateur

Exercice 1 :

Faire le bilan de puissance du transformateur à vide.

En déduire que la puissance consommée à vide est sensiblement égale aux pertes fer.

Solution EX 01:

Faire le bilan de puissance du transformateur à vide.

$$P_1 = P_2 + \text{pertes Joule} + \text{pertes Fer}$$

A vide, la puissance fournie au secondaire est nulle : $P_2 = 0$

$$P_1 \text{ à vide} = \text{pertes Joule} + \text{pertes Fer}$$

En déduire que la puissance consommée à vide est sensiblement égale aux pertes fer.

A vide, un transformateur consomme peu de courant : les pertes Joule sont donc négligeables devant les pertes Fer.

$$P_1 \text{ à vide} \approx \text{pertes Fer}$$

Exercice 2 :

courant de mise sous tension d'un transformateur

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

$$230 \text{ V} / 24 \text{ V} \quad 50\text{Hz}$$

$$63 \text{ VA} \quad 2 \text{ kg}$$

1- Calculer le courant primaire nominal I_{1N} et le courant secondaire nominal I_{2N} .

2- A la mise sous tension d'un transformateur, il se produit un courant d'appel très important (de l'ordre de $25 I_{1N}$) pendant une dizaine de millisecondes.

Evaluer le courant de mise sous tension.

exercices corrigés sur le transformateur

Solution EX 02:

courant de mise sous tension d'un transformateur

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

$$230 \text{ V} / 24 \text{ V} \quad 50 \text{ Hz}$$

$$63 \text{ VA} \quad 2 \text{ kg}$$

1- Calculer le courant primaire nominal I_{1N} et le courant secondaire nominal I_{2N} .

$$I_{1N} = S_N / U_{1N} = 63 / 230 = 0,27 \text{ A}$$

$$I_{2N} = S_N / U_{2N} = 63 / 24 = 2,6 \text{ A}$$

2- A la mise sous tension d'un transformateur, il se produit un courant d'appel très important (de l'ordre de $25 I_{1N}$) pendant une dizaine de millisecondes.

Evaluer le courant de mise sous tension. $25 \times 0,27 = 6,8 \text{ A}$

Exercice 3 :

transformateur de distribution

Un transformateur de distribution possède les caractéristiques nominales suivantes : $S_{2N} = 25 \text{ kVA}$, $p_{\text{Joule N}} = 700 \text{ W}$ et $p_{\text{fer}} = 115 \text{ W}$.

1- Calculer le rendement nominal pour :

- une charge résistive
- une charge inductive de facteur de puissance 0,8

2- Calculer le rendement pour :

- une charge résistive qui consomme la moitié du courant nominal

exercices corrigés sur le transformateur

Solution EX 03:

transformateur de distribution

Un transformateur de distribution possède les caractéristiques nominales suivantes

$$S_{2N} = 25 \text{ kVA}, p_{\text{Joule N}} = 700 \text{ W et } p_{\text{fer}} = 115 \text{ W}.$$

1- Calculer le rendement nominal pour :

- une charge résistive

$$P_2 = S_2 \cos \varphi_2$$

La charge est résistive : $\cos \varphi_2 = 1$

$$P_{2N} = 25000 \times 1 = 25 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 + \text{pertes Joule} + \text{pertes Fer} \\ &= 25000 + 700 + 115 = 25,815 \text{ kW} \end{aligned}$$

Rendement nominal : $P_2/P_1 = 96,8 \%$

- une charge inductive de facteur de puissance 0,8

$$(25000 \times 0,8) / (25000 \times 0,8 + 700 + 115) = 96,1 \%$$

2- Calculer le rendement pour :

- une charge résistive qui consomme la moitié du courant nominal

$$P_2 = S_2 \cos \varphi_2$$

$$I_2 = I_{2N}/2 \quad \text{donc : } P_2 \approx P_{2N}/2 \approx 12,5 \text{ kW}$$

Les pertes Joule sont proportionnelles au carré des courants (Loi de Joule).

$$700 \times (1/2)^2 = 175 \text{ W}$$

$$(12500) / (12500 + 175 + 115) = 97,7 \%$$

exercices corrigés sur le transformateur

Exercice 4 :

transformateur monophasé

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

- tension primaire nominale : $U_{1N} = 5375 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$
- rapport du nombre de spires : $N_2/N_1 = 0,044$
- résistance de l'enroulement primaire : $R_1 = 12 \Omega$
- résistance de l'enroulement secondaire : $R_2 = 25 \text{ m}\Omega$
- inductance de fuite du primaire : $L_1 = 50 \text{ mH}$
- inductance de fuite du secondaire : $L_2 = 100 \mu\text{H}$

1- Calculer la tension à vide au secondaire.

2- Calculer la résistance des enroulements ramenée au secondaire R_S .

3- Calculer l'inductance de fuite ramenée au secondaire L_S . En déduire la réactance de fuite X_S .

Le transformateur débite dans une charge résistive $R = 1 \Omega$.

4- Calculer la tension aux bornes du secondaire U_2 et le courant qui circule dans la charge I_2 .

Solution EX 04:

transformateur monophasé

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

- tension primaire nominale : $U_{1N} = 5375 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$
- rapport du nombre de spires : $N_2/N_1 = 0,044$
- résistance de l'enroulement primaire : $R_1 = 12 \text{ W}$
- résistance de l'enroulement secondaire : $R_2 = 25 \text{ mW}$
- inductance de fuite du primaire : $L_1 = 50 \text{ mH}$
- inductance de fuite du secondaire : $L_2 = 100 \mu\text{H}$

1- Calculer la tension à vide au secondaire.

$$5375 \cdot 0,044 = 236,5 \text{ V}$$

2- Calculer la résistance des enroulements ramenée au secondaire R_S .

$$R_S = R_2 + R_1 m_v^2 = 0,025 + 12 \cdot 0,044^2 = 48,2 \text{ mW}$$

exercices corrigés sur le transformateur

3- Calculer l'inductance de fuite ramenée au secondaire L_S . En déduire la réactance de fuite X_S .

$$L_S = L_2 + L_1 m_v^2 = 100 \times 10^{-6} + 50 \times 10^{-3} \times 0,044^2 = 197 \mu\text{H}$$

$$X_S = L_S \omega = 197 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 50 = 61,8 \text{ m}\Omega$$

Le transformateur débite dans une charge résistive $R = 1 \Omega$.

4- Calculer la tension aux bornes du secondaire U_2 et le courant qui circule dans la charge I_2 .

$$\Delta U_2 = U_{2V} - U_2 \approx (R_S \cos \varphi_2 + X_S \sin \varphi_2) I_2$$

La charge est résistive : $\cos \varphi_2 = 1$

$$\text{D'où } \Delta U_2 \approx R_S I_2$$

D'autre part :

$$I_2 \approx U_{2V} / (R_S + R) \approx 225,6 \text{ A}$$

Exercice 5 :

Soit un transformateur parfait 380V/220V 50 Hz de puissance apparente $S=2 \text{ kVA}$.

1. Calculer les courants nominaux I_{1N} , I_{2N} et le rapport de transformation m .
2. La charge inductive est constituée d'une résistance $R=20 \Omega$ en série avec une inductance $L=50 \text{ mH}$. Calculer l'impédance de la charge et son facteur de puissance. En déduire les courants du transformateur et la puissance active fournie.

Solution EX 05:

$$1- S_N = V_{1N} \cdot I_{1N} \iff I_{1N} = S_N / V_{1N}$$

$$\text{A.N: } I_{1N} = 2000 / 380 = 5.26 \text{ A}$$

$$S_N = V_{2N} \cdot I_{2N} \iff I_{2N} = S_N / V_{2N}$$

$$\text{A.N: } I_{2N} = 2000 / 220 = 9.09 \text{ A}$$

$$m = V_{2N} / V_{1N} = I_{1N} / I_{2N} = 0.57$$

exercices corrigés sur le transformateur

2- L'impédance : $Z = \sqrt{R^2 + (LW)^2} = 25.43 \Omega$

Facteur de puissance:

$$\text{tg } \Phi = XL/R = LW/R = 0.785$$

$$\Phi = \text{arctg}(XL/R) = \text{arctg}(0.785) \text{ A.N: } \Phi = 38.14^\circ \quad \text{fp} = \cos \Phi = 0.786$$

Les courants du transformateur et la puissance active :

$$I_1 = I_{1N} = 5.26 \text{ A}$$

$$I_2 = V_2 / Z = 220 / 25.43 = 8.65 \text{ A}$$

$$\text{Cos}\Phi = \text{fp} = P/S \rightarrow P = S.\text{fp} = 2000.0.786 = 1572 \text{ w}$$

Exercice 6 :

Un transformateur de distribution possède les caractéristiques nominales suivantes :

$$S_{2N} = 25 \text{ kVA}, \quad P_{\text{Joule } N} = 700 \text{ W} \quad \text{et} \quad P_{\text{fer}} = 115 \text{ W}.$$

1- Calculer le rendement nominal pour :

- une charge résistive
- une charge inductive de facteur de puissance 0,8

2- Calculer le rendement pour :

- une charge résistive qui consomme la moitié du courant nominal

Solution EX 06:

1- Calculer le rendement nominal pour :

- une charge résistive $P_2 = S_2 \cos \varphi_2$

La charge est résistive : $\cos \varphi_2 = 1 \quad \Rightarrow \quad P_{2N} = 25000 \times 1 = 25 \text{ kW}$

$$P_1 = P_2 + \text{pertes Joule} + \text{pertes Fer} = 25000 + 700 + 115 = 25,815 \text{ kW}$$

$$\text{Rendement nominal : } P_2/P_1 = 96,8 \%$$

exercices corrigés sur le transformateur

- une charge inductive de facteur de puissance 0,8

$$(25000 \times 0,8) / (25000 \times 0,8 + 700 + 115) = 96,1 \%$$

2- Calculer le rendement pour :

- une charge résistive qui consomme la moitié du courant nominal

$$P_2 = S_2 \cos \varphi_2$$

$$I_2 = I_{2N}/2 \text{ donc : } P_2 \approx P_{2N}/2 \approx 12,5 \text{ kW}$$

Les pertes Joule sont proportionnelles au carré des courants (Loi de Joule).

$$700 \times (1/2)^2 = 175 \text{ W}$$

$$(12500) / (12500 + 175 + 115) = 97,7 \%$$

Exercice 7 :

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

tension primaire nominale : $U_{1N} = 5375 \text{ V}$ / 50 Hz

rapport du nombre de spires : $N_2/N_1 = 0,044$

résistance de l'enroulement primaire : $R_1 = 12 \Omega$

résistance de l'enroulement secondaire : $R_2 = 25 \text{ m}\Omega$

inductance de fuite du primaire : $L_1 = 50 \text{ mH}$

inductance de fuite du secondaire : $L_2 = 100 \mu\text{H}$

1- Calculer la tension à vide au secondaire.

2- Calculer la résistance des enroulements ramenée au secondaire R_s .

3- Calculer l'inductance de fuite ramenée au secondaire L_s .

En déduire la réactance de fuite X_s .

Le transformateur débite dans une charge résistive $R = 1 \Omega$.

4- Calculer la tension aux bornes du secondaire U_2

et le courant qui circule dans la charge I_2 .

exercices corrigés sur le transformateur

Solution EX 07:

1- Calculer la tension à vide au secondaire.

$$5375 \times 0,044 = 236,5 \text{ V}$$

2- Calculer la résistance des enroulements ramenée au secondaire R_S .

$$R_S = R_2 + R_1 m_v^2 = 0,025 + 12 \times (0,044)^2 = 48,2 \text{ m}\Omega$$

13- Calculer l'inductance de fuite ramenée au secondaire L_S .

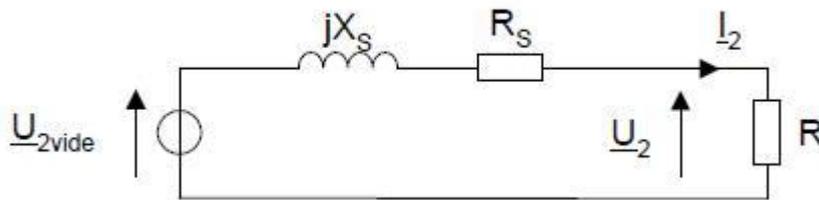
En déduire la réactance de fuite X_S .

$$L_S = L_2 + L_1 m_v^2 = 100 \cdot 10^{-6} + 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,044^2 = 197 \text{ }\mu\text{H}$$

$$X_S = L_S \omega = 197 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 50 = 61,8 \text{ m}\Omega$$

Le transformateur débite dans une charge résistive $R = 1 \text{ }\Omega$.

4- Calculer la tension aux bornes du secondaire U_2 et le courant qui circule dans la charge I_2 .



Impédance complexe totale : $Z = (R_S + R) + jX_S$

Impédance totale : $Z = \sqrt{(R_S + R)^2 + X_S^2}$

Courant au secondaire : $I_2 = U_2 / Z$

$$I_2 = \frac{U_{2V}}{\sqrt{(R_S + R)^2 + X_S^2}} = 225,2 \text{ A} \quad \text{Loi d'Ohm : } U_2 = R \cdot I_2 = 225,2 \text{ volts}$$

Autre méthode :

$$\Delta U_2 = U_{2V} - U_2 \approx (R_S \cos \varphi_2 + X_S \sin \varphi_2) I_2$$

La charge est résistive : $\cos \varphi_2 = 1$

$$\text{D'où } \Delta U_2 \approx R_S I_2 \quad (1)$$

$$\text{D'autre part : } U_2 = R \cdot I_2 \quad (2)$$

$$(2) \iff I_2 \approx U_{2V} / (R_S + R) \approx 225,6 \text{ A} \iff U_2 \approx 225,6 \text{ V}$$

exercices corrigés sur le transformateur

Exercice 8 :

Un transformateur de commande et de signalisation monophasé a les caractéristiques suivantes :

230 V/ 24 V 50 Hz 630 VA 11,2 kg

1- Les pertes totales à charge nominale sont de 54,8 W.

Calculer le rendement nominal du transformateur pour $\cos \varphi_2 = 1$ et $\cos \varphi_2 = 0,3$.

2- Calculer le courant nominal au secondaire I_{2N} .

3- Les pertes à vide (pertes fer) sont de 32,4 W.

En déduire les pertes Joule à charge nominale.

En déduire R_S , la résistance des enroulements ramenée au secondaire.

4- La chute de tension au secondaire pour $\cos \varphi_2 = 0,6$ (inductif) est de 3,5 % de la tension nominale ($U_{2N} = 24 \text{ V}$)

24 V). En déduire X_S , la réactance de fuite ramenée au secondaire.

5- Un court-circuit a lieu à 15 mètres du transformateur.

Le câble de ligne en cuivre a une section de $1,5 \text{ mm}^2$.

5-1- Calculer sa résistance totale R sachant que la résistivité du cuivre est :

$\rho = 0,027 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

5-2- Calculer le courant de court-circuit I_{2CC} .

Faire l'application numérique (on pourra prendre $R_S \approx 30 \text{ m}\Omega$ et $X_S \approx 15 \text{ m}\Omega$).

exercices corrigés sur le transformateur

Solution EX 08:

1- Calculer le rendement nominal du transformateur pour $\cos \varphi_2 = 1$ et $\cos \varphi_2 = 0,3$.

$$(630 \times 1) / (630 \times 1 + 54,8) = 92 \%$$

$$(630 \times 0,3) / (630 \times 0,3 + 54,8) = 77,5 \%$$

2- Calculer le courant nominal au secondaire I_{2N} .

$$630 / 24 = 26,25 \text{ A}$$

3- Les pertes à vide (pertes fer) sont de 32,4 W.

En déduire les pertes Joule à charge nominale.

$$\text{Bilan de puissance : } 54,8 - 32,4 = 22,4 \text{ W}$$

En déduire R_S , la résistance des enroulements ramenée au secondaire.

$$\text{Loi de Joule : } 22,4 / 26,25^2 = 32,5 \text{ m}\Omega$$

4- La chute de tension au secondaire pour $\cos \varphi_2 = 0,6$ (inductif) est de 3,5 %

de la tension nominale (24 V). En déduire X_S , la réactance de fuite ramenée au secondaire.

$$\text{Chute de tension au secondaire : } \Delta U_2 = 0,035 \times 24 = 0,84 \text{ V}$$

$$\Delta U_2 = (R_S \cos \varphi_2 + X_S \sin \varphi_2) I_{2N}$$

$$X_S = (0,84 / 26,25 - 0,0325 \times 0,6) / 0,8 = 15,6 \text{ m}\Omega$$

5- Un court-circuit a lieu à 15 m du transformateur.

Le câble de ligne en cuivre a une section de 1,5 mm².

5-1- Calculer sa résistance totale R sachant que la résistivité du cuivre est :

$$\rho = 0,027 \text{ }\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}.$$

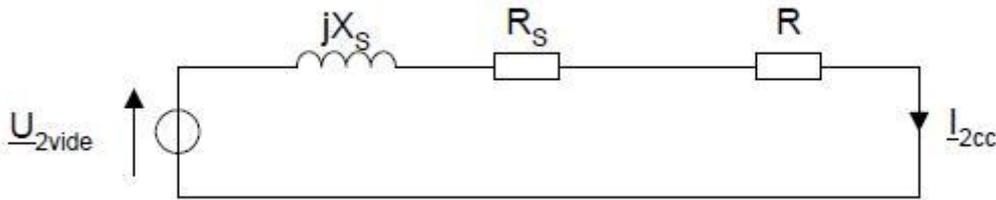
$$R = \rho L / S = 0,027 \times 2 \times 15 / 1,5 = 540 \text{ m}\Omega$$

5-2- Calculer le courant de court-circuit I_{2CC} :

$$I_{2cc} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{(R_S + R)^2 + X_S^2}}$$

exercices corrigés sur le transformateur

Schéma électrique équivalent :



Impédance complexe totale : $Z = (R_s + R) + jX_s$

Impédance totale : $Z = ((R_s + R)^2 + X_s^2)^{1/2}$

Courant de court-circuit : $I_{2cc} = U_{2\text{vide}} / Z \approx U_{2N} / Z = U_{2\text{vide}} / ((R_s + R)^2 + X_s^2)^{1/2}$

Faire l'application numérique. $Z = ((0,0325 + 0,540)^2 + 0,0156^2)^{1/2} = 573 \text{ m}\Omega$

$24 / 0,573 = 42 \text{ ampères}$

Exercice 9 :

Les essais d'un transformateur monophasé ont donné :

A vide : $U_1 = 220 \text{ V}$, 50 Hz (tension nominale primaire) ;

$U_{2v} = 44 \text{ V}$; $P_{1v} = 80 \text{ W}$; $I_{1v} = 1 \text{ A}$.

En court-circuit : $U_{1cc} = 40 \text{ V}$; $P_{1cc} = 250 \text{ W}$; $I_{2cc} = 100 \text{ A}$ (courant nominal secondaire).

En courant continu au primaire : $I_1 = 10 \text{ A}$; $U_1 = 5 \text{ V}$.

Le transformateur est considéré comme parfait pour les courants lorsque ceux-ci ont leurs valeurs nominales.

1- Déterminer le rapport de transformation à vide m_v et le nombre de spires au secondaire, si l'on en compte 500 au primaire.

2- Calculer la résistance de l'enroulement primaire R_1 .

exercices corrigés sur le transformateur

3- Vérifier que l'on peut négliger les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide (pour cela, calculer les pertes Joule au primaire).

4- En admettant que les pertes dans le fer sont proportionnelles au carré de la tension primaire, montrer qu'elles sont négligeables dans l'essai en court-circuit. Faire l'application numérique.

5- Représenter le schéma équivalent du transformateur en court-circuit vu du secondaire.

En déduire les valeurs R_s et X_s caractérisant l'impédance interne.

Quels que soient les résultats obtenus précédemment, pour la suite du problème, on prendra $R_s = 0,025 \Omega$ et $X_s = 0,075 \Omega$.

Le transformateur, alimenté au primaire sous sa tension nominale, débite 100 A au secondaire avec un facteur de puissance égal à 0,9 (charge inductive).

6- Déterminer la tension secondaire du transformateur.

En déduire la puissance délivrée au secondaire.

7- Déterminer la puissance absorbée au primaire (au préalable calculer les pertes globales).

En déduire le facteur de puissance au primaire et le rendement.

Solution EX 09:

Les essais d'un transformateur monophasé ont donné:

A vide : $U_1 = 220 \text{ V}$, 50 Hz (tension nominale primaire) ; $U_{2v} = 44 \text{ V}$; $P_{1v} = 80 \text{ W}$; $I_{1v} = 1 \text{ A}$.

En court-circuit : $U_{1cc} = 40 \text{ V}$; $P_{1cc} = 250 \text{ W}$; $I_{2cc} = 100 \text{ A}$ (courant nominal secondaire).

En courant continu au primaire : $I_1 = 10 \text{ A}$; $U_1 = 5 \text{ V}$.

Le transformateur est considéré comme parfait pour les courants lorsque ceux-ci ont leurs valeurs nominales.

exercices corrigés sur le transformateur

1- Déterminer le rapport de transformation à vide m_v et le nombre de spires au secondaire, si l'on en compte 500 au primaire.

$$m_v = 44 / 220 = 0,2$$

$$N_2 = 500 \times 0,2 = 100 \text{ spires}$$

2- Calculer la résistance de l'enroulement primaire R_1 .

$$R_1 = 5 / 10 = 0,5 \Omega$$

3- Vérifier que l'on peut négliger les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide (pour cela, calculer les pertes Joule au primaire).

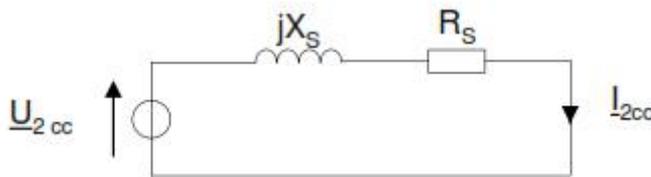
$$\text{Pertes Joule au primaire} = R_1 I_v^2 = 0,5 \text{ W} \ll 80 \text{ W} \text{ donc négligeables.}$$

4- En admettant que les pertes dans le fer sont proportionnelles au carré de la tension primaire, montrer qu'elles sont négligeables dans l'essai en court-circuit. Faire l'application numérique.

$$80 \times (40 / 220)^2 = 2,6 \text{ W}$$

$$2,6 \text{ W} \ll 250 \text{ W} \text{ donc négligeables.}$$

5- Représenter le schéma équivalent du transformateur en court-circuit vu du secondaire. En déduire les valeurs R_s et X_s caractérisant l'impédance interne.



$$R_s = 250 / 100^2 = 0,025 \Omega$$

$$Z_s = m_v U_{1cc} / I_{2cc} = 0,080 \Omega$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = 0,076 \Omega$$

Quels que soient les résultats obtenus précédemment, pour la suite du problème, on prendra $R_s = 0,025 \Omega$ et $X_s = 0,075 \Omega$.

Le transformateur, alimenté au primaire sous sa tension nominale, débite 100 A au secondaire avec un facteur de puissance égal à 0,9 (charge inductive).

exercices corrigés sur le transformateur

6- Déterminer la tension secondaire du transformateur.

En déduire la puissance délivrée au secondaire.

$$\Delta U_2 = (R_S \cos \varphi_2 + X_S \sin \varphi_2) I_2 = 5,5 \text{ V}$$

$$U_2 = 44 - 5,5 = 38,5 \text{ V}$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 3460 \text{ W}$$

7- Déterminer la puissance absorbée au primaire (au préalable calculer les pertes globales). En déduire le facteur de puissance au primaire et le rendement.

$$\text{Pertes globales} = 80 + 250 = 330 \text{ W}$$

$$P_1 = 3460 + 330 = 3790 \text{ W}$$

$$\text{Rendement} : 3460 / 3790 = 91 \%$$

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_1 m_v I_2 \cos \varphi_1$$

$$\text{D'où} : \cos \varphi_1 = 0,86$$

Exercice 10 :

La puissance apparente d'un transformateur monophasé

5,0 kV / 230 V ; 50 Hz est $S = 21 \text{ kVA}$. La section du circuit magnétique est

$s = 60 \text{ cm}$ et la valeur maximale du champ

L'essai à vide a donné les résultats suivants :

$$U_1 = 5000 \text{ V} ; U_{20} = 230 \text{ V} ; I_{10} = 0,50 \text{ A} \text{ et } P_{10} = 250 \text{ W}.$$

L'essai en court-circuit avec $I_{2CC} = I_{2n}$ a donné les résultats suivants :

$$P_{1CC} = 300 \text{ W} \text{ et } U_{1CC} = 200 \text{ V}.$$

1-Calculer le nombre de spires N_1 au primaire.

2-Calculer le rapport de transformation m et le nombre N_2 de spires au secondaire.

3-Quel est le facteur de puissance à vide de ce transformateur ?

4-Quelle est l'intensité efficace du courant secondaire I_{2n} ?

5-Déterminer les éléments sR ; Z_S et X_S de ce transformateur.

6-Calculer le rendement de ce transformateur lorsqu'il débite un courant

d'intensité nominale dans une charge inductive de facteur de puissance 0,83.

Solution EX 10:

1- En utilisant le théorème de Boucherot : $U_1 = 4,44 N_1 s f \dot{B}$, on en déduit :

$$N_1 = \frac{U_1}{4,44 s f \dot{B}} = \frac{5000}{4,44 \times 60 \cdot (10^{-2})^2 \times 50 \times 1,1} = 3413 \text{ spires}$$

2- $m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{230}{5000} = 0,046$ et $m = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow N_2 = m \cdot N_1 = 0,046 \times 3413 = 157 \text{ spires}$.

3- $P_{10} = P_F$ et $\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_1 \cdot I_{10}} = \frac{250}{5000 \times 0,5} = 0,1$

4- $S = U_{1n} \cdot I_{1n} = U_{20} \cdot I_{2n}$ soit $I_{2n} = \frac{S}{U_{20}} = \frac{21 \cdot 10^3}{230} = 91,3 \text{ A}$.

5- $R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} = \frac{300}{91,3^2} = 36 \text{ m}\Omega$

$$Z_s = \frac{m \cdot U_{1cc}}{I_{2cc}} = 0,1 \Omega$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{0,1^2 - 0,036^2} = 94 \text{ m}\Omega$$

7- Pour déterminer le rendement, il faut déjà déterminer la tension U_2 aux bornes de la charge soit en utilisant la méthode graphique ($\underline{U}_{2V} = R_s \cdot \underline{I}_2 + jX_s \cdot \underline{I}_2 + \underline{U}_2$) soit en utilisant l'expression approchée de la chute de tension :

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = R_s \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X_s \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 \text{ soit}$$

$$\Delta U_2 = 36 \cdot 10^{-3} \times 91,3 \times 0,83 + 94 \cdot 10^{-3} \times 91,3 \times \sin(\cos^{-1} 0,83) = 7,51 \text{ V} . \text{ On en déduit } U_2 :$$

$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 = 230 - 7,51 = 222,5 \text{ V}$. On calcule ensuite P_2 et P_1 :

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 222,5 \times 91,3 \times 0,83 = 16,86 \text{ kW} ;$$

$$P_1 = P_2 + P_F + P_C = 16,86 \cdot 10^3 + 250 + 300 = 17,41 \text{ kW} \text{ et } \eta = \frac{P_2}{P_1} = 96,8\%$$

I) Présentation

I.1) Constitution :

Un transformateur triphasé comporte un primaire et un secondaire qui peuvent être couplés de diverses manières.

I.2) Plaque signalétique :

La plaque signalétique nous renseigne sur :

Nom du constructeur et numéro de fabrication

La fréquence d'utilisation.

La puissance apparente $S = 3V_1I_{1N} = 3V_{20}I_{2N}$

La tension primaire nominale U_1

La tension secondaire à vide U_{2V} .

Les courants nominaux $I_{2N} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{2n}}$ et $I_{1N} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{1N}}$

Type	XXXXX	
KVA	0,8	puissance apparente
Ph	1	mono ou triphasé
P	230	tension primaire
S	48	tension secondaire
Hz	50-60	fréquence
IP	22	indice de protection
Cl	F	classe d'isolation thermique
S fus	32A gG	fusible au secondaire

I.3) Couplages :

Le rapport de transformation d'un transformateur triphasé est le quotient $m = \frac{U_{20}}{U_1}$.

A la différence du transformateur monophasé ce rapport n'est pas toujours égal à $\frac{N_2}{N_1}$ car il dépend du mode de couplage.

I.3.1) Notations :

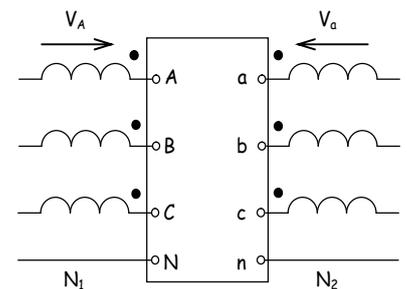
Une ligne correspond aux enroulements sur un noyau.

A,B,C sont les bornes hautes tension et a,b,c les bornes basses tension.

Ces bornes correspondent aux bornes homologues.

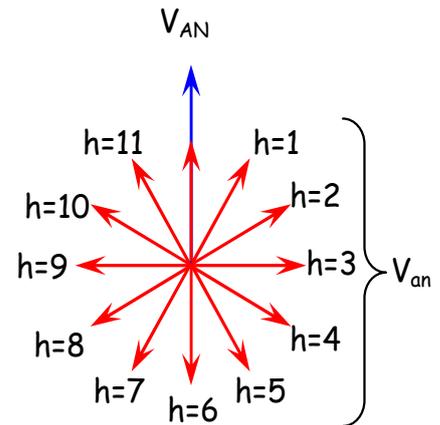
On suppose les enroulements bobinés dans le même sens.

Ainsi les tensions V_A et V_a sont en phases



I.3.2) Indice horaire h:

L'indice horaire est un nombre h multiplié par $\frac{f}{6}$ qui indique le déphasage φ compté en sens horaire d'une tension simple ou composée du secondaire \vec{V}_{an} ou \vec{U}_{ab} par rapport à une tension simple ou composée du primaire \vec{V}_{AN} ou \vec{U}_{AB}



I.3.3) Choix des couplages :

- La présence du neutre dans les installations basse tension permet d'obtenir 2 types de tension : simple pour les usages domestiques usuels ou composée pour l'alimentation des petits moteurs.
- Il est intéressant en haute tension d'avoir un couplage qui fait apparaître le neutre. Le neutre, les parties métalliques et magnétiques sont mises au potentiel de la terre ce qui réduit l'isolement des bobines haute tension.
- On évite d'avoir le même couplage au primaire et au secondaire pour ne pas transmettre intégralement le déséquilibre éventuel des courants. Si le neutre est nécessaire des deux côtés alors le montage Yz ou Zy est alors communément employé.

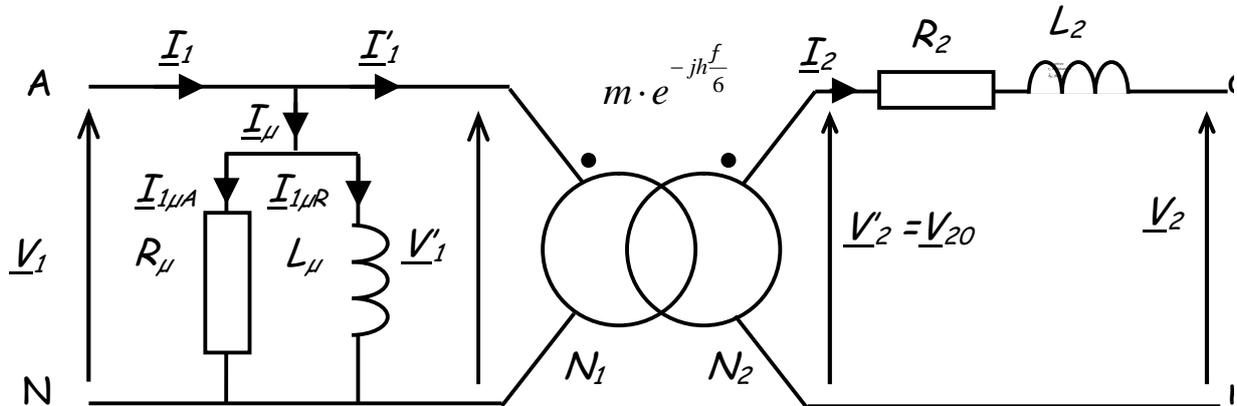
TRANSFORMATEURS TRIPHASES

I.3.4) Couplages courants :

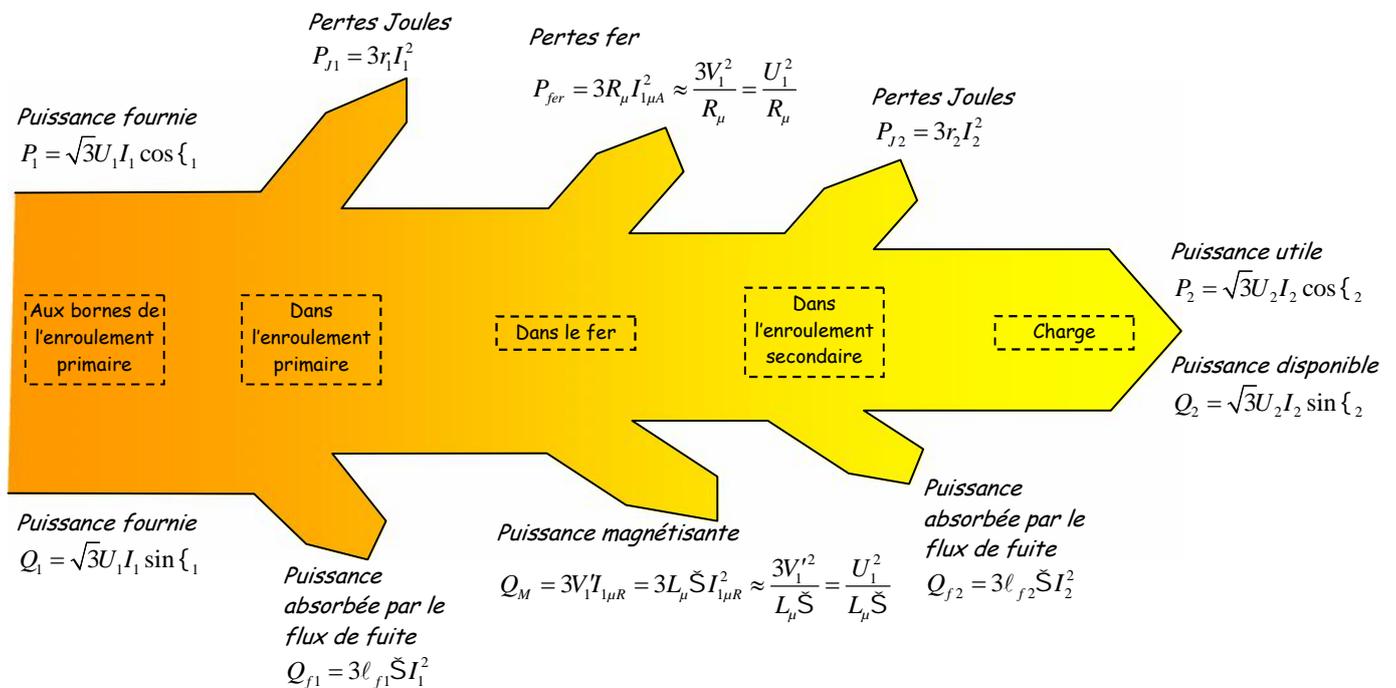
Symbole	Van/VAN	Montage	Diagramme Vectoriel
Yy 0	$\frac{N_2}{N_1}$		
Yd 1	$\frac{N_2}{\sqrt{3}N_1}$		
Yz 11	$\frac{\sqrt{3} N_2}{2 N_1}$		
Dy 11	$\sqrt{3} \frac{N_2}{N_1}$		
Dd 0	$\frac{N_2}{N_1}$		
Zy 1	$\frac{2 N_2}{\sqrt{3} N_1}$		

II) Modélisation

II.1) Modèle équivalent par phase:



II.2) Bilan des puissances :



III) Essais

III.1) Détermination du modèle : essais

III.1.1) Essai à vide sous tension nominale

Les pertes fer $P_{fer} = P_{10} - \underbrace{P_{j10}}_{3r_1 I_{10}^2}$ et donc R_μ car

$$P_{fer} \approx \frac{3V_1^2}{R_\mu} = \frac{U_1^2}{R_\mu}$$

De même la puissance réactive » nécessaire à l'installation flux »

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{(\sqrt{3} U_1 I_{10})^2 - P_{10}^2} = 3\ell_{f1} \check{S} I_{10}^2 + \frac{3V_1^2}{L_\mu \check{S}} \approx \frac{3V_1^2}{L_\mu \check{S}} = \frac{U_1^2}{L_\mu \check{S}} \text{ soit } Q_{10} = \frac{3V_1^2}{L_\mu \check{S}} = \frac{U_1^2}{L_\mu \check{S}} \text{ et ainsi } L_\mu$$

Essai en court circuit à courant nominal sous tension réduite

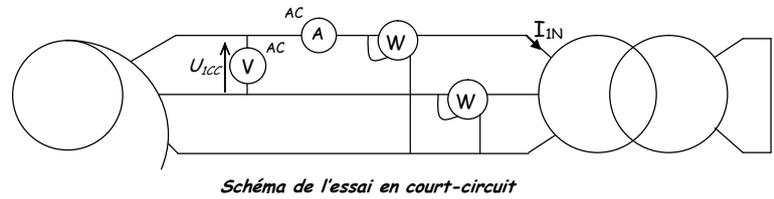
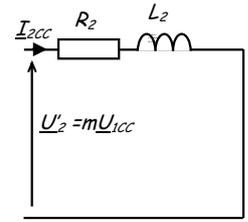
Les pertes Joule permettent de déterminer R_2

$$R_2 = \frac{P_{1CC}}{3 \times I_{2CC}^2}$$

On en déduit aisément

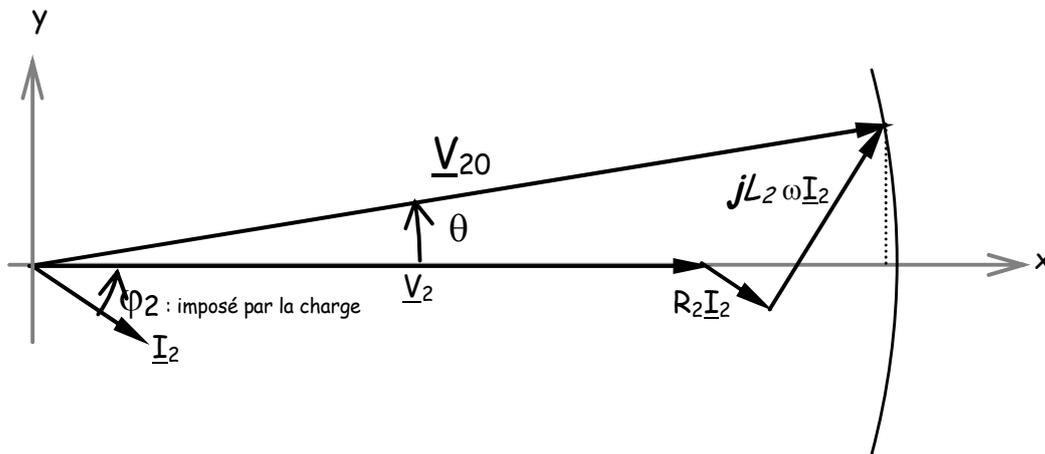
$$Z_2 = \frac{mV_{1CC}}{I_{2CC}} = \sqrt{R_2^2 + (L_2\check{S})_2^2} \text{ donc}$$

$$X_2 = L_2\check{S} = \sqrt{\left(\frac{mV_{1CC}}{I_{2CC}}\right)^2 - R_2^2} = \frac{Q_{1CC}}{3I_{2CC}^2}$$



III.2) Diagramme de Kapp :

Comme en monophasé on obtient



III.3) Rendement :

$$\Delta V_2 \approx V_{20} - V_2 = R_2 I_2 \cos \{ \}_2 + X_2 I_2 \sin \{ \}_2 \text{ donc } \Delta U_2 \approx \sqrt{3} \Delta V_2 = \sqrt{3} (R_2 I_2 \cos \{ \}_2 + X_2 I_2 \sin \{ \}_2)$$

Le rendement est déterminé soit :

- par la méthode des pertes séparées : essai à vide et en court circuit.
- par la méthode directe par un essai en charge.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_J + P_{fer}}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \{ \}_2}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \{ \}_2 + 3 R_2 I_2^2 + P_{fer}} = \frac{U_2 \cos \{ \}_2}{U_2 \cos \{ \}_2 + 3 R_2 I_2 + \frac{P_{fer}}{I_2}}$$

Exercice 1 :

Un courant triphasé équilibré alimente un transformateur triphasé dont le primaire est couplé en étoile. On veut mesurer le courant à vide donne:

-tension primaire $U_{10}=380\text{v}$

-indications des wattmètres : $P_1=93\text{w}$, $P_2=-53\text{w}$

1) Représenter un schéma du montage permettant la mesure de la puissance par la méthode de

s deux wattmètres .

2) Déterminer:

- la puissance active absorbée

- la puissance réactive consommée

- La facteur de puissance

- Le courant dans un fil de ligne et dans un enroulement

3) la résistance entre phases au primaire est : $R=0.8$; calculer:

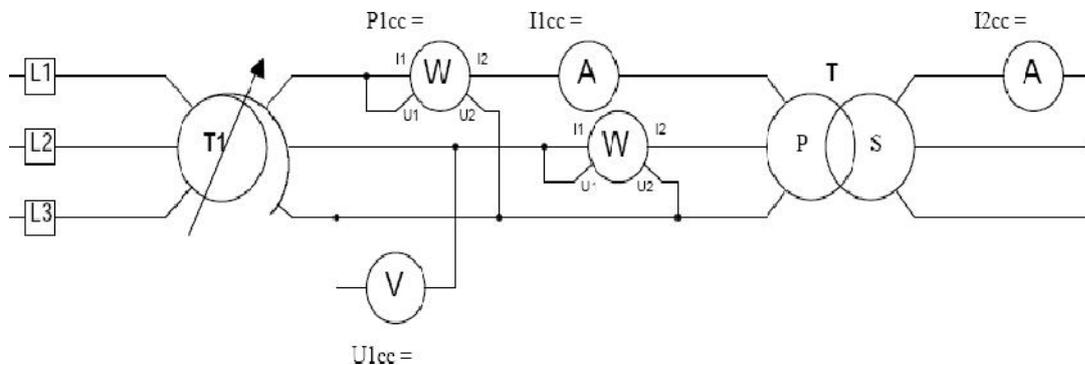
- la résistance d'un enroulement

- la puissance perdue par effet joule lors de l'essai à vide pour le système triphasé.

4) Déduire des questions précédentes les pertes dans le fer.

Solution EX 01:

1: Représenter un schéma du montage permettant la mesure de la puissance par la méthode des deux wattmètres:



2-la puissance active absorbée:

$$P_T = p_1 + p_2 = 93 - 53 = 40\text{w}$$

la puissance réactive consommée:

$$Q_T = 3 (p_1 - p_2) = 3 (93 - (-53)) = 251.88 \text{ var}$$

La facteur de puissance:

$$FP = P_T / S_T = P_T / (P_T^2 + Q_T^2) = 40 / (40^2 + 251.88^2) = 0.00061$$

Le courant dans un fil de ligne et dans un enroulement:

$$P_T = 3 u i \cos \beta$$

$$i = P_T / 3 u \cos \beta = 40 / 3((380)(0.00061)) = 0.40 \text{ A}$$

$$3 \cdot r = R / 2 = 0.8 / 2 = 0.4 \text{ A}$$

$$P_{j0} = 3 r j^2 = 3(0.4)(0.38)^2 = 0.17 \text{ w}$$

$$P_{10} = p_j + p_{\text{fer}}: \quad P_{\text{fer}} = p_{10} - p_j = 40 - 0.192 = 39.808 \text{ w.}$$

Exercice 2 :

Son couplage est triangle étoile Dy. Chaque colonne du transformateur porte un enroulement primaire de N_1 spires et un enroulement secondaire de N_2 spires.

1. Compléter le document la figure pour satisfaire ce couplage.

2. On effectue un essai à vide sous tension nominale. La puissance absorbée, mesurée par la méthode des deux wattmètres donne les résultats suivants : l'un indique $p_1 = 8.8 \text{ w}$; l'autre $p_2 = 2.4 \text{ w}$.

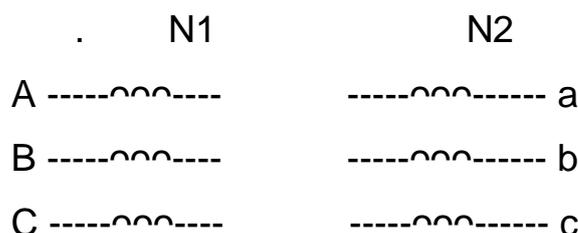
a) quelle est la puissance active absorbée à vide ? que représente-t-elle ?

b) calculer la puissance réactive absorbée.

c) quel le facteur de puissance à vide ?

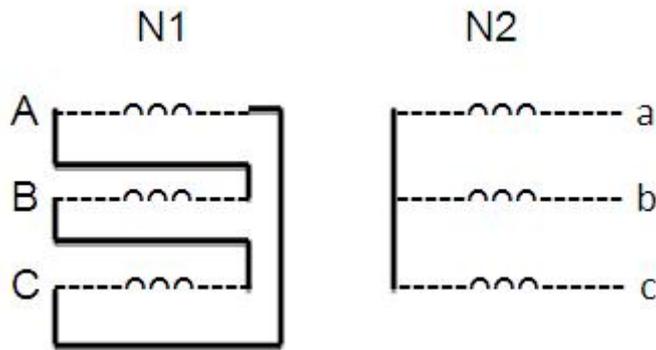
d) donner le schéma de montage : éléments utilisés et appareils de mesure nécessaires.

3. Quel essai reste-t-il à faire (identique à celui effectué dans le cas d'un transformateur monophasé) pour pouvoir déterminer le rendement de ce transformateur par la méthode des pertes séparées ?



Solution EX 02:

1-couplage est triangle étoile Dy:



2- a- la puissance active absorbée à vide:

$$P_{10} = p_1 + p_2 = 8.8 + 2.4 = 11.2 \text{ w}$$

$$P_{10} = p_{fer} = 11.2 \text{ w}$$

b -la puissance réactive absorbée:

$$Q_t = \sqrt{3}(p_1 - p_2) = \sqrt{3}(8.8 - 2.4)$$

$$Q_t = 11.08 \text{ VAR}$$

c- le facteur de puissance:

$$FP = p_{10} / S$$

$$S = (p_{10}^2 + Q^2)^{0.5} = (11.2^2 + 11.08^2)^{0.5} = 15.75 \text{ VA}$$

$$FP = 11.2 / 15.75 = 0.71$$

Exercice 3 :

On dispose d'un transformateur triphasé dont le rapport de transformation par colonne est $m = N_1 / N_2 = 1/87$.

Le primaire est alimenté par un réseau triphasé 20kV, le secondaire alimente un réseau 230/400 V, Le transformateur a une puissance apparente nominale de 20 KVA.

a) Quel est le couplage du transformateur ?

b) Quel sont les courants nominaux en ligne primaire et secondaire?

Le transformateur (supposé parfait) alimente une charge triphasée qui consomme 15KVA avec un $\cos(\phi) = 0.7$ AR.

- c) En prenant, la tension simple secondaire de la phase 1 comme référence, donner la valeur du courant secondaire (module et argument) débité par le transformateur?
- d) Même question pour le courant de ligne primaire.

Solution EX 03:

a) le couplage du transformateur est:

$$u_2 = u_1 \cdot m = 20000 \cdot 1/87 = 230 \text{v.} \quad \text{couplage D/Y}$$

b) les courants nominaux:

$$s_n = 3u_1 i_{1n} = 3u_2 i_{2n}$$

$$i_{1n} = s_n / 3u_1 = 20000 / 3 \cdot 230 = 5.8 \text{A}$$

$$i_{2n} = s_n / 3u_2 = 20000 / 3 \cdot 400 = 28.86 \text{A}$$

C) le Courant secondaire débité par le transformateur:

$$P = s \cos \beta = 15000 \cdot 0.7 = 10500$$

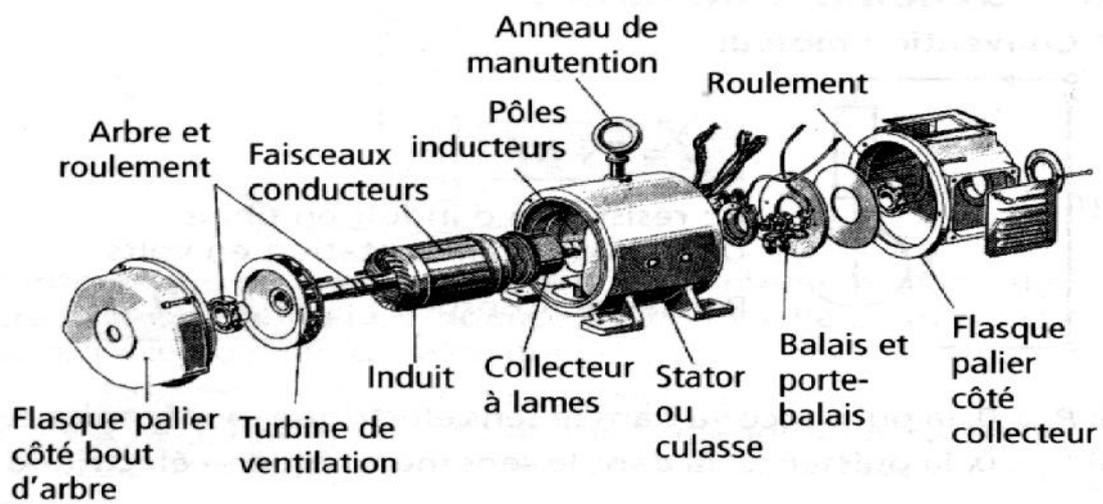
$$P = 3 u_2 i_2 \cos \beta$$

$$i_2 = P / 3 u_2 \cos \beta = 10500 / 3 \cdot 230 \cdot 0.7 = 37.65 \text{A}$$

D) le Courant de ligne primaire:

$$m = i_1 / i_2 \quad i_1 = m i_2 = 1/87 \cdot 37.65 = 0.43 \text{A}$$

Machine à courant continue



Machine à courant continu

introduction :

Les moteurs à courant continu sont encore utilisés assez largement pour l'entraînement à vitesse variable des machines.

Leur vitesse de rotation nominale est adaptable aisément par construction à toutes les applications, car elle n'est pas liée à la fréquence du réseau. Les moteurs à courant continu sont de plus en plus remplacés par les moteurs asynchrones car ils sont moins robustes que ces derniers et nécessitent un entretien régulier du collecteur et des balais. La machine à courant continu est réversible c'est à dire qu'elle peut fonctionner aussi bien en **moteur** qu'en **génératrice**

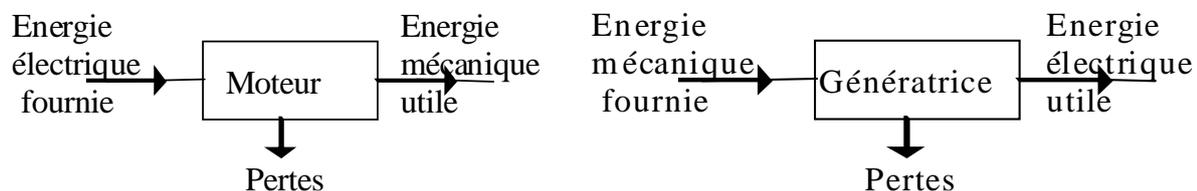
I- 1 Constitution générale d'une machine à courant continu

L'étude de l'électromagnétisme a mis en évidence, le principe de fonctionnement des machines à courant continu:

- fonctionnement en moteur, par déplacement d'un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique, sous l'action des forces de Laplace.

- fonctionnement en génératrice, par l'apparition d'une f.é.m induite aux bornes d'un conducteur qui se déplace dans un champ magnétique.

Une machine à courant continu est un convertisseur d'énergie réversible.

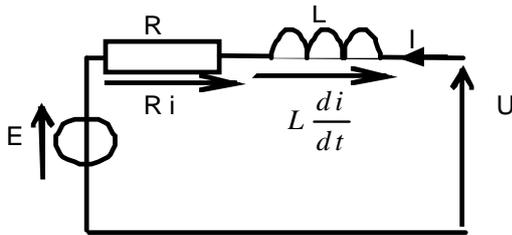


I-2 Modèle équivalent En fonctionnement générateur ,en moteur

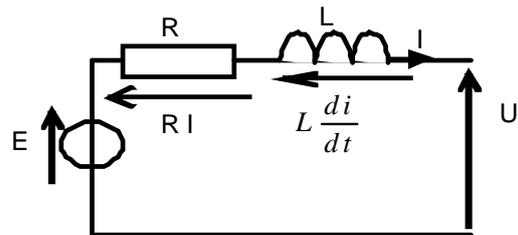
❖ Inducteur :

Bien que bobiné, l'inducteur est soumis à une tension continue donc le caractère inductif n'apparaît pas et peut donc être modélisé par une résistance.

❖ Induit :



Fonctionnement en **moteur**



Fonctionnement en **génératrice**

En régime quelconque $U = E + Ri + L \frac{di}{dt}$

$U = E - Ri - L \frac{di}{dt}$

En régime permanent $U = E + Ri$

$U = E - Ri$

Avec R résistance de l'enroulement de l'induit et L inductance de l'induit

I-3 CARACTERISTIQUES DU MOTEUR

1)- **LA VITESSE DE ROTATION** : D'après ce qui précède:

- $U = E + rI$
- $E = k.n.\Phi$ avec $k = pN/a$

En supposant le flux Φ constant on peut admettre que la force contre-électromotrice est proportionnelle à la vitesse de rotation. $E = K.h$

- Ω : vitesse de rotation en rad/s; $\Omega = n/2\pi$
- $K = pN2\pi/a$ $h = (U - rI)/K$

Donc si l'on néglige la chute de tension due à la résistance de l'enroulement rI on peut admettre que la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu est proportionnelle à sa tension d'alimentation d'induit. $U = E + rI = K.\Omega$ donc: $h = U/K$

2)- LA PUISSANCE ELECTROMOTRICE

La puissance électromotrice notée P_{em} en Watts: $P_{em} = E \cdot I$

3)- LE COUPLE ELECTROMOTEUR

Le couple électromoteur notée T_{em} en N.m: $T_{em} = K \cdot I$

$T_{em} = P_{em} / \Omega = E \cdot I / \Omega = K \Omega \cdot I / \Omega = K \cdot I$ donc $T_{em} = K \cdot I$

4)- LA PUISSANCE ABSORBEE

- par l'induit $P = U \cdot I$
- par l'inducteur $P = u \cdot i$

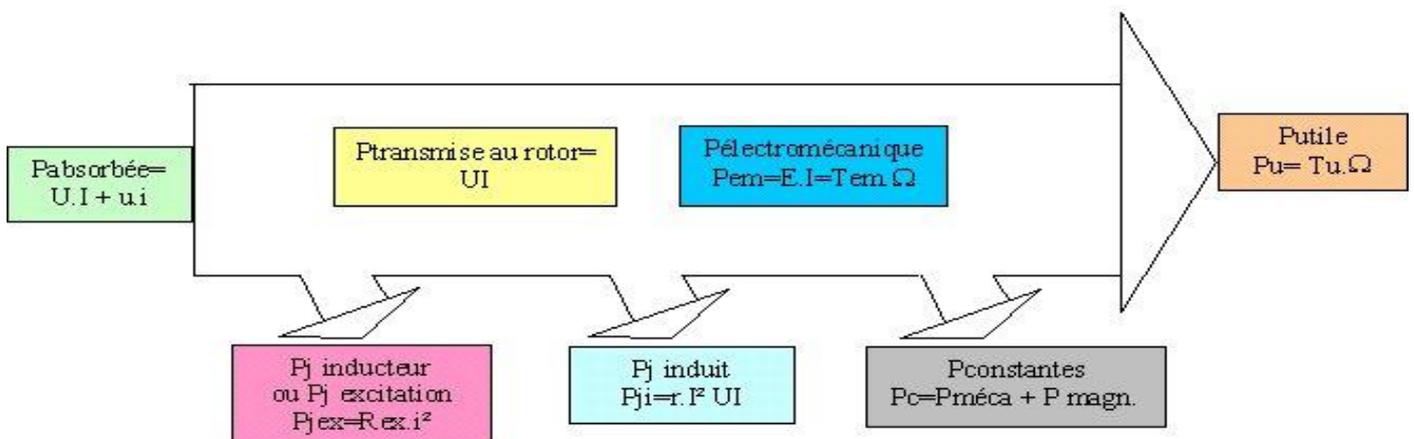
La puissance absorbée totale par le moteur en Watts: $P_a = P + p = U \cdot I + u \cdot i$

- U, I : tension et courant d'induit
- u, i : tension et courant de l'inducteur

5)- PUISSANCE UTILE (MECANIQUE)

La puissance mécanique notée P_u : $P_u = T_u \cdot h$

- T_u : couple utile disponible sur l'arbre moteur en N.m
- Ω : vitesse de rotation en rad/s



II-GENERALITE SUR LE MOTEUR A COURANT CONTINU:

II-1-Définition du moteur courant continu:

Les moteurs courant continus sont des convertisseurs de puissance :

Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur.

- En mode « moteur », l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique.

II-2-Constitution

Le moteur à courant continu comprend trois parties essentielles :

- A. Partie électrique
- B. Partie magnétique
- C. Partie mécanique

1) l'inducteur:

Se compose de trois parties:

✓ La carcasse

elle assure à la fois des fonctions magnétiques et mécaniques. Elle est généralement en acier moulé ou coulé, quelque fois en fonte. On utilise le plus souvent la forme circulaire cuirassée.

✓ Les pôles inducteurs

Sont constitués par un assemblage de tôles en acier au silicium d'une épaisseur (+ 0,5 mm) isolées entre elle par une oxydation naturelle. on peut toutefois rencontrer des pôles massifs.

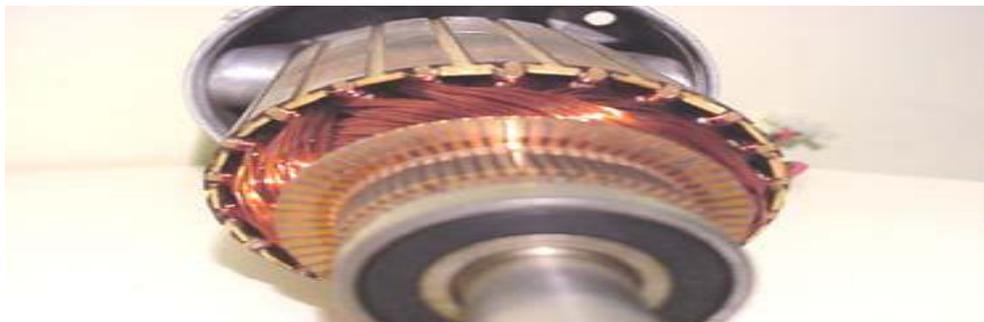
✓ Les bobines

Sont réalisées avec du fil de cuivre isolé (vernis isolant) qui est enroulé autour du noyau polaire de telle sorte à réaliser un électro-aimant.



2) L'induit:

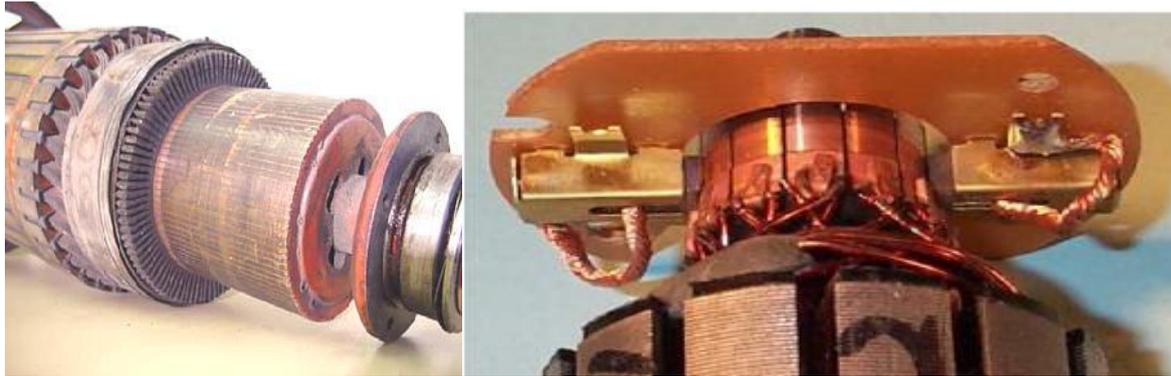
Celui-ci est feuilleté et il a la forme d'un tambour dans lequel sont pratiquées des encoches. Les tôles, en acier au silicium sont isolées entre elles par oxydation ou au vernis. Elles sont montées sur l'arbre de la machine. Dans les encoches sont placés des conducteurs actifs. En résumé, l'induit complète le circuit magnétique et supporte les enroulements induits. Entre l'inducteur et l'induit existe ce que l'on appelle un entre fer, que l'on essaie de diminuer le plus possible pour éviter les pertes magnétiques. génératrice (dynamo) devient alors une machine qui produit de la tension



• Le collecteur et les balais

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement les unes des autres, réunies aux conducteurs de l'induit en certains points.

Les balais, portés par le stator, frottent sur les lames du collecteur, et permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit qui tourne et l'extérieur de la machine.

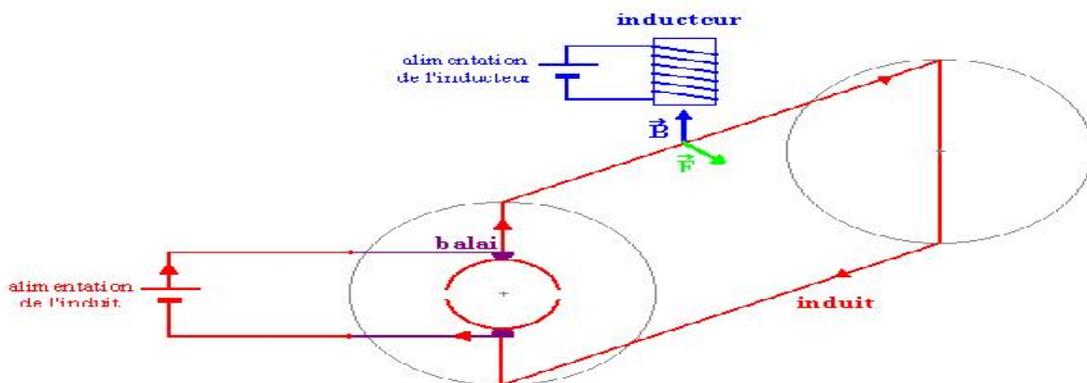


II-3-Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu.

Lorsque l'on place une spire parcourue par un courant (grâce aux balais et au collecteur) dans un champ magnétique, il apparaît un couple de forces. Ce couple de forces crée un couple de rotation qui fait dévier la spire de plus ou moins 90 degrés par rapport au plan vertical, le sens du courant restant inchangé dans la spire, au cours de ce déplacement, le couple de rotation diminue constamment jusqu'à s'annuler après rotation de la bobine de plus ou moins 90 degrés (zone neutre, la spire se trouve à l'horizontale et perpendiculaire aux aimants naturels).

Afin d'obtenir une rotation sans à coup, l'enroulement d'induit doit être constitué d'un nombre élevé de spires similaires. Celles-ci seront réparties de façon régulières sur le pourtour du rotor (induit), de manière à obtenir un couple indépendant de l'angle de rotation. Après le passage de la zone neutre, le sens du courant doit être inversé simultanément dans chacune de ces spires.

Voici un exemple de moteur ultra-simplifié :



Machine à courant continu

Pour alimenter les conducteurs, on ne peut pas utiliser de simples câbles électriques, qui se tordraient rapidement.

Un système de collecteurs et de balais assure un contact électrique glissant, entre ces conducteurs et l'extérieur de la machine. De plus, ce dispositif inverse à chaque demi-tour du rotor le sens de parcours du courant, ce qui inverse le sens de la force.

Dans la réalité, il y a un très grand nombre de conducteurs, et le champ magnétique est généré par plusieurs bobines, ou plusieurs aimants.

II-4-Les caractéristiques du moteur courant continu

Le moteur courant continu (DC) est caractérisé par une constante de vitesse, et une pente vitesse/couple. Le courant est proportionnel à la charge ; et la vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation.

Le moteur courant continu sans fer ne présente pas de couple magnétique résiduel et les agitations électromagnétiques sont dérisoires. Son rendement, qui atteint 90%, surpasse celui des autres technologies de moteurs.

Son rotor en forme de cloche donne la possibilité d'accélération très importantes et d'un couple de retenue inexistant.

Cela permet d'obtenir des positionnements précis et des vitesses faibles.

Le rotor est traditionnellement composé d'un stator à aimant permanent en terre rare de type Al-nico, samarium cobalt ou néodyme fer bore qui expliquent les caractéristiques dynamiques très élevées.

II-5-Les avantages et les inconvénients du moteur courant continu

A. Les avantages:

L'avantage principal des moteurs à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation : les variateurs de vitesse, voire leur raccordement direct à la source d'énergie : batteries d'accumulateur, piles, etc. Ils ne nécessitent pas d'électronique pour les piloter, et peuvent être branchés directement sur une alimentation, des batteries, un variateur de vitesse, ou une carte de positionnement associée à un signal de copie.

- possibilité d'entraîner de très fortes inerties
- forte constant de temps mécanique

B. forte capacité à entraîner des surcharges élevées imprévisibles ralentissant le

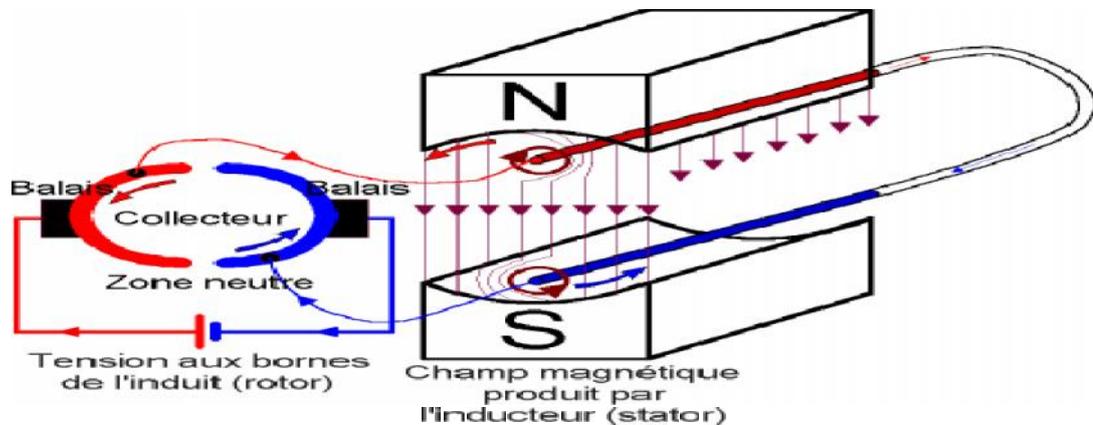
Inconvénients:

La commutation du moteur à balais nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de pièces mécaniques pour faire la liaison par frottement entre les charbons et le collecteur. Il en découle que :

- plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important ;
- aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés très régulièrement ;
- le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, ainsi que par rayonnement électromagnétique (réduit dans le cas des moteurs maxon par le système CLL (long life capacitor).

III-Moteur à excitation indépendante ou séparée:

III-1 principe:



Pour le schéma ci-dessous, l'aimant naturel est remplacé par un électro-aimant (bobine alimentée par une tension continue) qui représente l'inducteur du moteur et qui correspond à la partie fixe (stator). Le rotor qui est la parties mobile du moteur et que l'on appelle induit est regalement aliment par une tension continue (au travers des balais et du collecteur).

Pour inverse le sens de rotation du moteur, il soffite simplement d'inverser les polarités d'alimentation soit à l'induit soit à l'inducteur. Une inversion des polarities à l'induit et à l'inducteur ne modifier en rien le sens de rotation du moteur.

-2-avantages

. Grande souplesse de commande. Large gamme de vitesse.. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement.

✚ Domaines d'emploi

- ❖ Machines spéciales
- ❖ moteur de broche, d'axe
- ❖ machines outils

Modèle équivalent

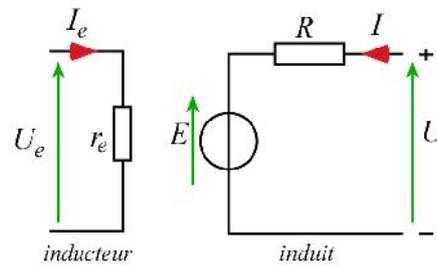
Caractéristiques :

$$E = K\Phi\Omega$$

$$T_{em} = K\Phi I$$

$$U = E + RI$$

Modèle équivalent :



L'induit est en convention récepteur

Il faut deux alimentations : une pour l'inducteur et l'autre pour l'induit.

Les quatre grandeurs qui déterminent le fonctionnement du moteur

sont : U , I et Φ .

IV-Vitesse de rotation d'un moteur à excitation séparé

Le sens de rotation dépend :

- du sens du flux, donc du sens du courant d'excitation I_e
- du sens du courant d'induit I .

Expression de la vitesse : $E = K\Phi\Omega = U - RI \Rightarrow \Omega = \frac{U - RI}{K\Phi}$

Ces moteurs sont utilisés lorsque on désire obtenir une plage de fréquences de rotation. On les rencontre dans les systèmes nécessitant des vitesses contrôlées (machines-outils, ligne de production industrielle...)

Au démarrage ($E=0$) ce type de moteur doit démarrer sous une tension d'induit progressive afin de limiter le courant de l'induit.

IV-1- Variation de vitesse des MCC à excitation séparé

Le MCC offre de grandes possibilités pour obtenir des vitesses de rotation variables.

En sachant que $U = E' + R_a I$, si on néglige $R_a I$, R_a très faible on a sensiblement :

$$U = E' = N_c n \cdot W$$

Machine à courant continu

D'ou

$$n = \frac{U}{N_c \Phi}$$

On pose

$$K = \frac{1}{N_c}$$

Alors on aura :

$$n = \frac{U}{K \Phi}$$

Donc on peut modifier la vitesse d'un moteur à courant continu en agissant

Sur la tension d'alimentation de l'induit ou sur le flux Φ

(par action sur le courant inducteur i_{ex})

❖ par action sur la tension d'alimentation :

La vitesse est directement proportionnelle à la tension d'alimentation de l'induit.

Le couple est proportionnel au courant d'excitation , comme il est constant, le couple constant.

Le fonctionnement est aloes dit à couple constant pour une vitesse entre 0 et n nominal

❖ par action sur le flux

Pour dépasser la vitesse nominale on ne peut plus agir sur la tension d'alimentation ($U = U_n$), on peut diminuer le flux Φ , si Φ diminue , la vitesse augmente.

Le couple moteur ($T = K \cdot \Phi \cdot I$) est proportionnel au flux donc si Φ diminue et si I est constant le couple moteur diminue.

Le fonctionnement est dit à puissance constante

❖ alimentation des moteurs :

pour obtenir un fonctionnement à vitesse variable, cela revient à alimenter un moteur à excitation indépendante avec une tension variable de 0 à U_n sur l'induit.

On peut obtenir une tension continue variable soit à partir d'une source continue

(utilisation d'un hacheur) soit à partir d'une source alternative (utilisation d'un redresseur).

• **utilisation d'un redresseur alimenté par une source monophasée :**

Un montage redresseur assure la conversion de type alternatif/continu-variable , sans pertes d'énergie .

Il est constitué essentiellement de composants à semi-conducteurs (thyristors ...)

IV-4-Réglage de la vitesse:

On peut régler la vitesse en agissant sur F , donc sur l'excitation, ou sur la tension U (alimentation de l'induit) :

❖ L'action sur l'excitation, avec un rhéostat de champ ou une tension U_e réglable, n'offre qu'une variation limitée, et n'est pas possible si l'inducteur est à aimants permanents.

❖ L'action sur la tension d'induit résout le problème du démarrage.

En conclusion, la souplesse de ces deux réglages indépendants confère à ce moteur une grande précision.

• **Risque d'emballement.** Si l'excitation s'annule alors que l'induit est encore alimenté,

❖ le moteur s'emballe et peut détruire l'induit. En conséquences :

❖ Il ne faut jamais couper le circuit d'excitation.

❖ Pour arrêter le moteur, il faut coupler l'induit avant l'inducteur.

V-Démarrage du moteur à excitation séparée:

V-1-Surintensité de démarrage :

- T_{dc} le couple de démarrage imposé par la charge (N.m);
- T_d le couple de démarrage du moteur (N.m);
- I_d le courant de démarrage (A);
- $U_n = 240$ V la tension d'alimentation nominale de l'induit ;
- $I_n = 20$ A le courant nominal dans l'induit ;
- $R=1$ la résistance de l'induit.

Au démarrage : $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0$ et donc $I_d = \frac{U_n - E}{R} = \frac{U_n}{R} = 240 A \gg I_n$

Dès que le moteur commence à tourner, E augmente et I_d diminue jusqu'à I_n .

- **Au démarrage en charge :**

il faut que $T_d > T_{dc}$ il faut donc **un courant de décollage** $I_d \approx \frac{T_d}{K\Phi} > \frac{T_{dc}}{K\Phi}$

On constate qu'étant donné la pointe de courant de démarrage, le moteur à excitation indépendante peut démarrer en charge.

V-2-Conditions de démarrage

– On alimente l'inducteur avant l'induit en réglant I_e à sa valeur nominale.

– Il faut limiter le courant d'induit ID au démarrage ($ID < 2I_n$ en général) en démarrant

sous tension réduite, grâce à un hacheur ou un redresseur commandé.

– On peut démarrer en charge si $ID > T_{RD}/(KF)$ où T_{RD} est le couple résistant opposé par la charge au démarrage. En conséquence le moteur possède un couple important au démarrage.

❖ Conséquences

La pointe de courant de 240 A va provoquer la détérioration de l'induit par échauffement excessif par effet joule.

Il faut limiter le courant de démarrage : en générale on accepte $I_d = 1,5I_n$

V-3-Solutions pour limiter le courant:

Solution 1 : on utilise des rhéostats de démarrage. Cette solution est peu économique.

Dans notre exemple $U_n = (R + R_h)I_d = (R + R_h)1,5I_n$

$$\text{Soit : } R_h = \frac{U_n}{1,5I_n} - R = 7 \Omega$$

Solution 2 : on démarre sous une tension d'alimentation réduite.

Dans notre exemple $U_d = RI_d = R \cdot 1,5 \cdot I_n = 30 V$

V-4Fonctionnement à vide

A vide la seule puissance absorbée sert à compenser les pertes. La puissance utile est nulle.

$$I_0 \ll I_n \Rightarrow RI_0 \ll U \text{ et finalement } \Omega_0 = \frac{U - RI_0}{K\Phi} \approx \frac{U}{K\Phi}.$$

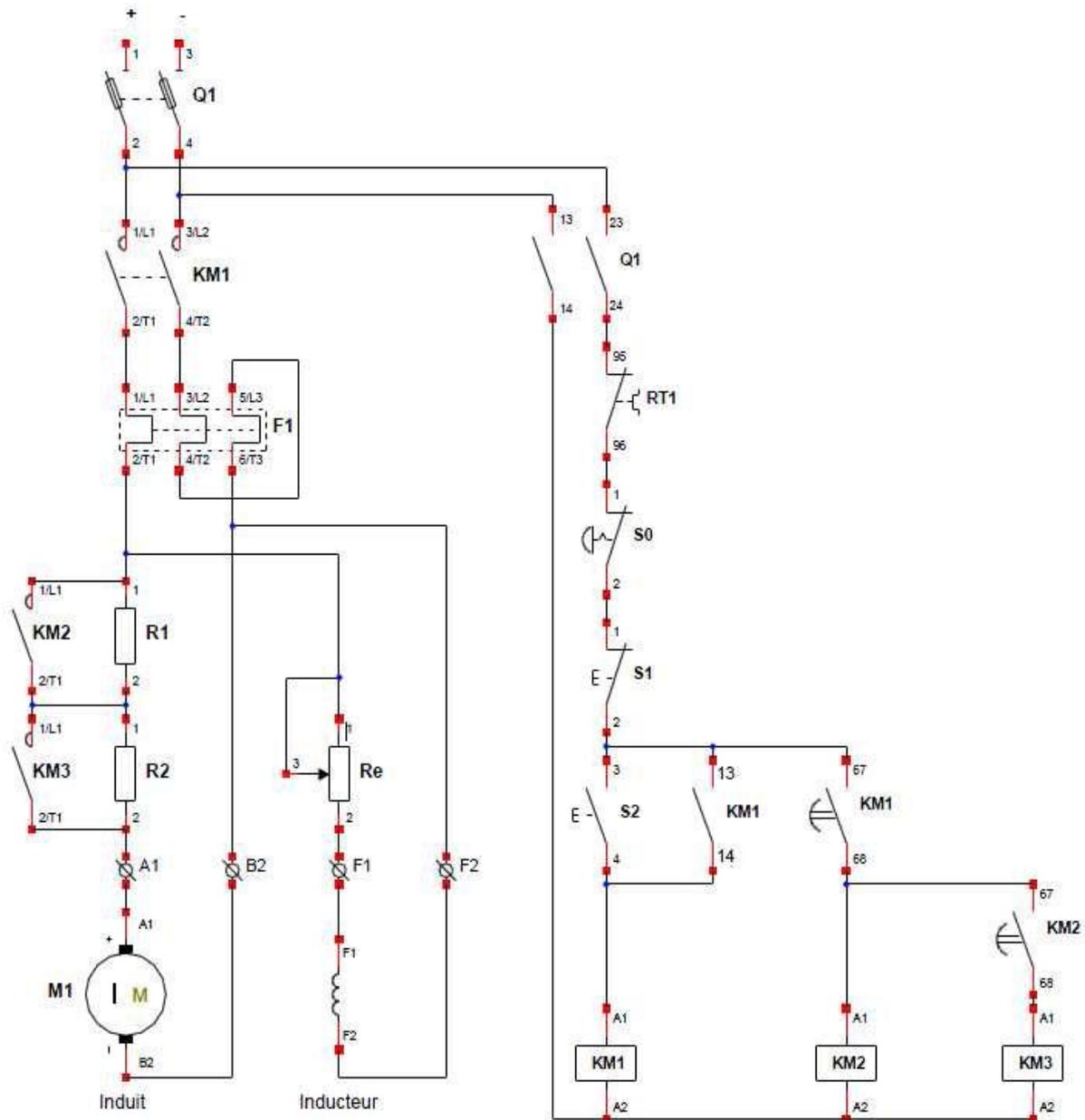
La vitesse à vide se règle en fonction de la tension d'alimentation ou du flux inducteur Φ .

Attention : à vide, il ne faut jamais alimenter l'induit d'un moteur a courant continu sans un courant d'excitation I_e lorsque l'induit est sous tension, car le moteur peut s'emballer.

En effet si $I_e \rightarrow 0$ alors $\Phi \rightarrow 0$ et $\Omega_0 \rightarrow \infty$.

Si Φ tend vers 0, le couple électromagnétique aussi et il arrivera un moment où le couple sera inférieur au couple résistant et la machine s'arrêtera.

VI Démarrage automatique d'un moteur a excitation separee, 1 sens de rotation



✓ Principe de fonctionnement du circuit :

L'action sur le bouton S2 entraine la mise sous tension de :

- ❖ L'inducteur au travers du rhéostat d'excitation Re (minimum de résistance au démarrage)
- ❖ L'induit au travers des résistance de démarrage R1 et R2.

Les résistance R1 puis R2 sont éliminées successivement après un temps prédéterminé

Machine à courant continu

VI-1 Inversion du sens de rotation :

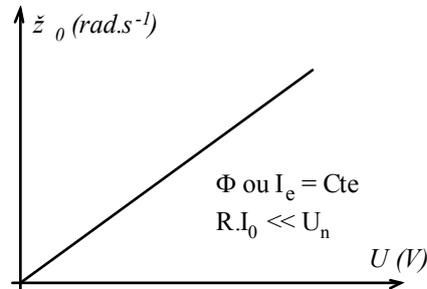
pour inverser le sens de rotation de ce moteur, on inverse soit

- ❖ le sens du courant dans l'induit
- ❖ le sens du courant dans l'inducteur.

VI-2 Fonctionnement à flux constant

$$\Omega = \frac{U - RI_0}{K\Phi} \approx \frac{U}{K\Phi} = K_2 U \quad \text{avec} \quad K_2 = \frac{1}{K\Phi}$$

La caractéristique passe approximativement par zéro.



VI-3 Fonctionnement en charge

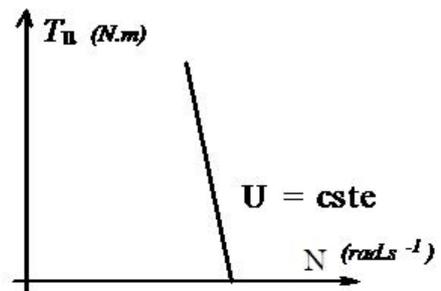
Exprimons la vitesse de rotation en fonction de la tension d'alimentation :

$$\Omega = \frac{E}{K\Phi} \quad \Rightarrow \quad \Omega = \frac{U - RI}{K\Phi} = K_2(U - RI) \quad \text{avec} \quad K_2 = \frac{1}{K\Phi} = \text{cte}$$

La vitesse dépend de :

- la tension d'alimentation U ;
- l'intensité du courant I imposée par le moment du couple résistant.

U reste tout de même grand devant $R.I$. En conséquence la vitesse de rotation est essentiellement fixée par la tension d'alimentation U et varie très peu en fonction du courant, c'est-à-dire de la charge.



Exprimons le courant en fonction du couple utile : $I = \frac{T_{em}}{K\Phi} = \frac{T_u - T_p}{K\Phi}$

Le couple de perte T_p reste constant et faible devant le couple de charge T_r .

VI-4 Mode de fonctionnement usuel

L'alimentation de l'induit sous tension réglable présente deux avantages :

- mise en vitesse progressive avec suppression de la surintensité ;
- vitesse largement variable.

Machine à courant continu

Conclusion :

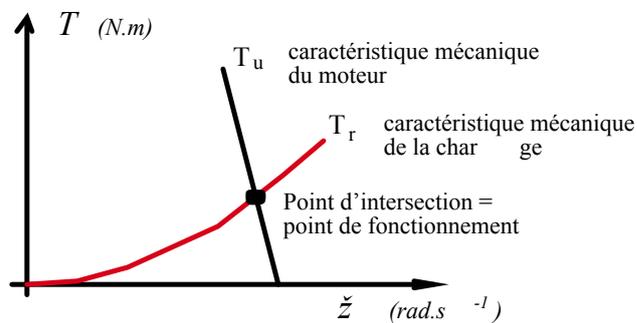
- La tension d'alimentation impose la vitesse de rotation $\Omega \approx \frac{U}{K\Phi}$.
- La charge impose la valeur du courant $I \approx \frac{T_r}{K\Phi}$.

VI-5 Point de fonctionnement

Une charge oppose au moteur un couple résistant T_r . Pour que le moteur puisse entraîner cette charge, le moteur doit fournir un couple utile T_u de telle sorte que :

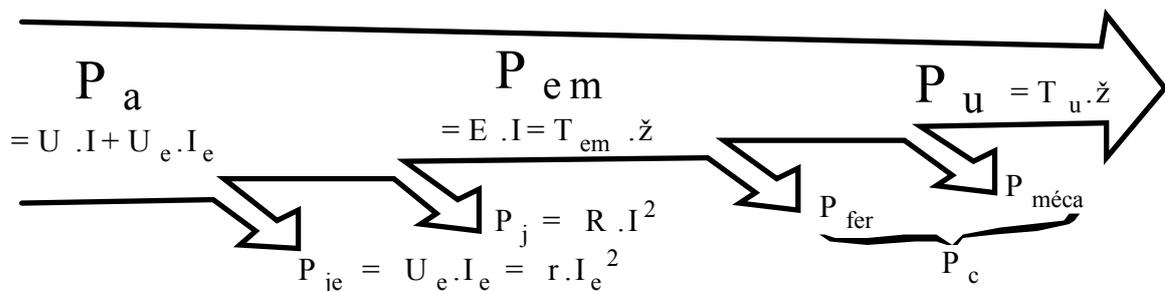
$$T_u = T_r$$

Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur.



VII-Bilan énergétique Soient :

- | | | | |
|------------|---------------------------------------|----------|---|
| P_a | la puissance absorbée (W) ; | U_e | la tension de l'inducteur (V) |
| P_{em} | la puissance électromagnétique (W) ; | I_e | le courant d'inducteur (A) |
| P_u | la puissance utile (W) ; | E | la f.é.m. (V) |
| P_{je} | les pertes joules à l'inducteur (W) ; | I | le courant d'induit (A) |
| P_j | les pertes joules à l'induit (W) ; | T_{em} | le couple électromagnétique (N.m) |
| P_{fer} | les pertes ferromagnétiques (W) ; | T_u | le couple utile (N.m) |
| $P_{méca}$ | les pertes mécaniques (W) ; | | la vitesse de rotation ($rad.s^{-1}$) |
| | | R | la résistance d'induit () |
| | | r | la résistance d'inducteur () |



Exploitation du diagramme :

par exemple : $P_{em} = P_a - P_{je} - P_j$; $P_C = P_{em} - P_u$

Remarques :

- Toute l'énergie absorbée à l'inducteur et dissipée par effet joule. On peut omettre l'inducteur dans le bilan des puissances et alors P_{je} n'apparaît pas et $P_a = U.I$.
- Les pertes fer et les pertes mécaniques sont rarement dissociées, la somme étant les pertes constantes P_C .
- Si le moteur est à aimants permanents, U_e , I_e et P_{je} n'existent pas.

VII-1--Couples Soient :

T_{em} le couple électromagnétique (N.m) ;

T_u le couple utile en sortie d'arbre (N.m).

A. Pertes constants D'après le diagramme des puissances, P_C est la différence entre la puissance électromagnétique et la puissance utile.

$$P_C = P_{em} - P_U$$

En effet : $P_C = P_{fer} + P_{méca} = P_{em} - P_U$

B. Couple de pertes T_P

$$T_P = \frac{P_C}{\Omega} = T_{em} - T_U$$

$$T_P = \frac{P_C}{\Omega} = \frac{P_{em} - P_U}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} - \frac{P_U}{\Omega} = T_{em} - T_U$$

VIII-Mesure du rendement

Il existe plusieurs méthodes:

- **méthode directe** (avec dynamo balance).

$$y = \frac{P_u}{P_a} = \frac{T_u \cdot \Omega}{U \cdot I + P_{je}}$$

Machine à courant continu

✓ Méthode des pertes séparées

détermination des pertes Joule nominales, dans l'induit et dans l'inducteur (après avoir déterminé par mesure voltampère métrique les résistances des deux enroulements), puis détermination des pertes mécanique et fer nominales (essai à vide avec n', n, E_N)

$$y = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \sum \text{pertes}}{P_a}$$

✓ Moteur à courant continu série

• Principe

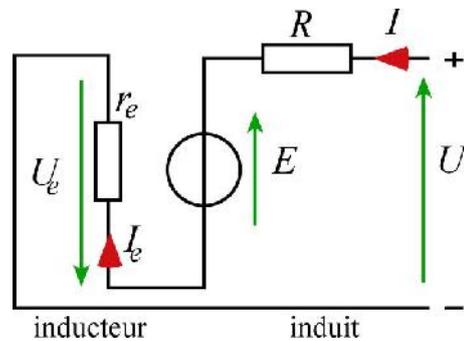
L'inducteur et l'induit sont reliés en série.

Conséquence : $I = I_e$

et comme $\Phi = Cste \cdot I_e$ (hors saturation)

$$E = K\Phi\Omega = k\Omega I$$

$$\text{et } T_{em} = K\Phi I = kI^2$$



• Modèle équivalent et caractéristiques

Caractéristiques :

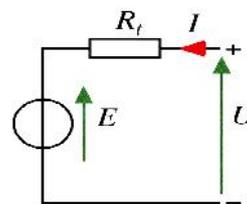
$$U = E + R_t I$$

$$E = k\Omega I$$

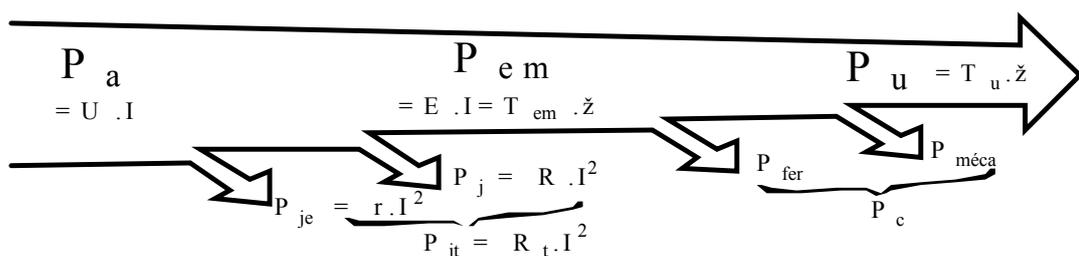
$$T_{em} = kI^2$$

$$\Omega = \frac{U - R_t I}{kI}$$

Schéma équivalent : $R_t = r + R$



• Bilan énergétique

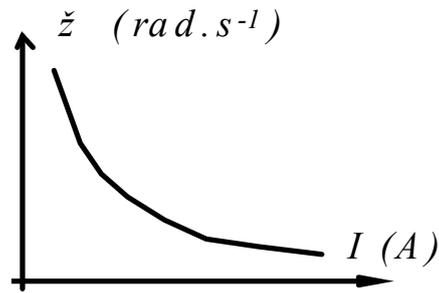


Machine à courant continu

Fonctionnement à vide

La charge impose le courant : $I = \sqrt{\frac{T_{em}}{k}}$

Si T_{em} tend vers 0, I tend aussi vers 0 et tend vers l'infini (si l'on ne tient pas compte des frottements).



Alimenté sous tension nominale, le moteur série ne doit jamais fonctionner à vide au risque de s'emballer.

Démarrage Tension de démarrage :

Comme pour le moteur à excitation indépendante, il est préférable de démarrer sous tension d'induit réduite.

En effet au démarrage : $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0 \Rightarrow I = \frac{U}{R_t}$

Couple de démarrage :

Le moteur série peut démarrer en charge.

Supposons que l'on limite le courant de démarrage I_d à 1,5 fois le courant nominal I_n .

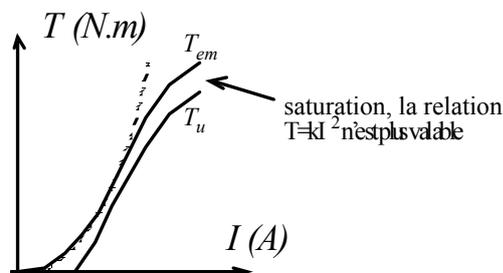
Excitation indépendante : $T_d = K\Phi I_d = 1,5K\Phi I_n = 1,5T_n$

Excitation série : $T_d = kI_d^2 = k(1,5I_n)^2 = 2,25kI_n^2 = 2,25T_n$

Caractéristique $T=f(I)$

$$T_{em} = kI^2$$

$$T_u = T_{em} - T_p$$



Machine à courant continu

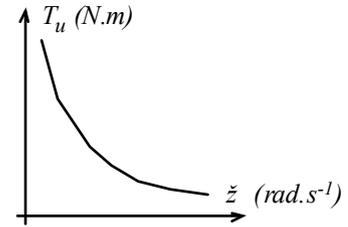
Caractéristique mécanique $T=f(\Omega)$

Fonctionnement sous tension nominale

Si nous négligeons les différentes pertes :

$$E = U \quad ; \quad I = \frac{U}{k\Omega} \quad \text{et} \quad T_u = kI^2 = \frac{U^2}{k\Omega^2}$$

Finalement : $T_u \Omega^2 = C^{te}$

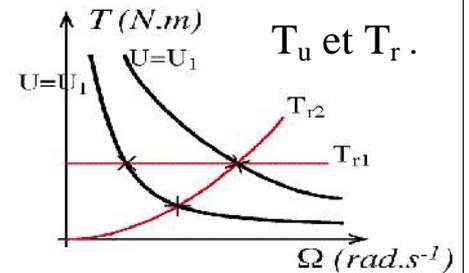


Sous tension nominale, le moteur à excitation en série ne peut pas fonctionner à faible charge car la vitesse dépasserait largement la limite admise.

Fonctionnement sous tension variable

La diminution de la tension d'alimentation permet d'obtenir un déplacement de la caractéristique mécanique.

T_3 et T_{r2} sont les caractéristiques de deux charges différentes.

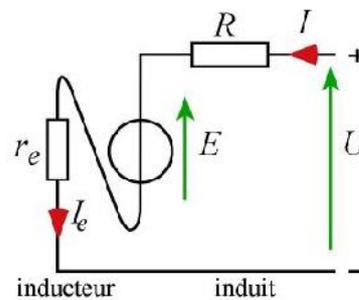
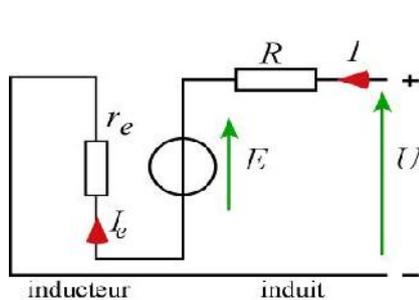


Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des deux caractéristiques.

Sense de rotation

Rappel : pour changer le sens de rotation d'un moteur à courant continu, il faut inverser soit I , soit I_e .

Comme pour le moteur à excitation série $I=I_e$, pour changer son sens de rotation il faut inverser la connexion entre l'inducteur et l'induit.

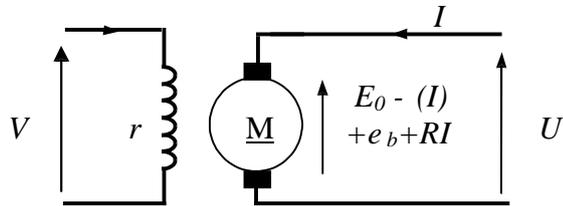


Machine à courant continu

✓ Excitation séparée

On dispose d'un moteur à courant continu dont l'excitation est indépendante comme le montre la figure suivante où l'induit et l'inducteur sont alimentés séparément par deux sources de tensions différentes.

Fig.7.1. Moteur à excitation séparée

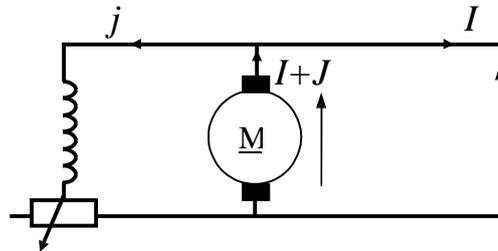


$$P_{em} = C_{em} \Omega = E_{ch} I$$

✓ Excitation shunt

Soit une moteur à courant continu a excitation shunt comme le montre la figure suivante où l'induit et l'inducteur sont alimentés par la même source de tension.

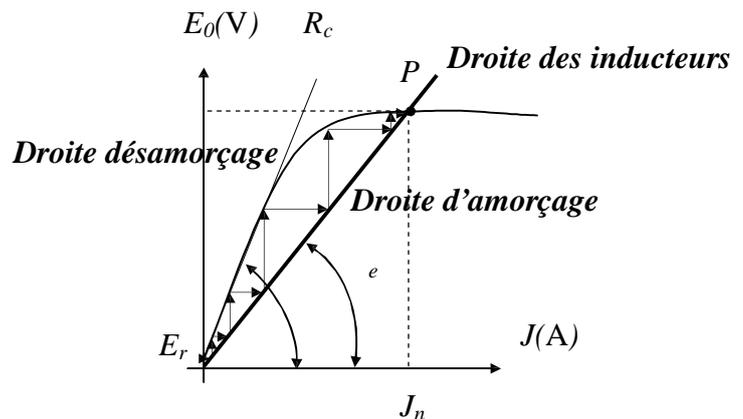
Fig.7.5. moteur à excitation shunt



Phénomène d'amorçage R_h

Un entraînement de la machine fait naître une f.e.m induite rémanente E_r , fait à son tour circuler un petit courant J qui augmente la f.e.m d'où l'augmentation de J jusqu'à égalité de $(r+R_h)J$ et E_0 .

Fig.7.6. Caractéristique à vide d'une moteur à excitation shunt



Droite des inducteurs

A vide la moteur ne débite par un courant de charge $I=0$ d'où les relations suivantes

$$E_0(J)=U \quad (1) \quad \text{et} \quad (r+R_h)J = U \quad (2).$$

On a alors $E_0(J) = (r+R_h)J$ et $U = (r+R_h)J$ donnent un point de fonctionnement P qui est le point de fonctionnement nominal de la génératrice en charge.

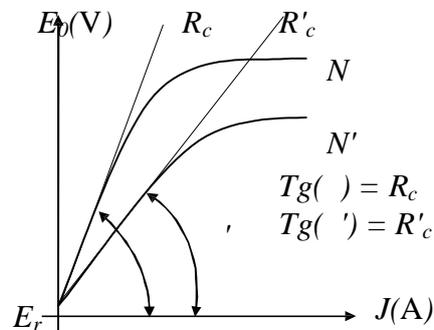
$$\text{La relation } R_h + r = \frac{U}{J}$$

Machine à courant continu

est appelée droite des inducteurs, c'est la droite d'amorçage de la machine en courant continu.

Le désamorçage est assuré par l'équivalence de la droite des inducteurs à celui de la résistance critique.

Fig.7.7. Caractéristique à vide pour différentes vitesses



Pour un même courant d'excitation J , on peut établir proportionnalités suivantes :

- Les courbes à vide par l'exploitation de la relation $E_0 = KN$, telle que $E_0 = E'_0 \frac{N}{N'}$.
- Le couple électromagnétique par l'exploitation de la relation $C_{em} = KI$.

Bilan des puissances cas d'une moteur

- Les pertes joules dans l'inducteur : $= (r + R_h) J^2$;
- Les pertes joules dans induits $= R(I + J)^2$;
- La puissance utile $P_u = UI$;
- La puissance absorbée $P_a = P_u + \sum \text{pertes}$;
- Le rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_a}$.

✓ Excitation composée "Compound"

Phénomène d'amorçage

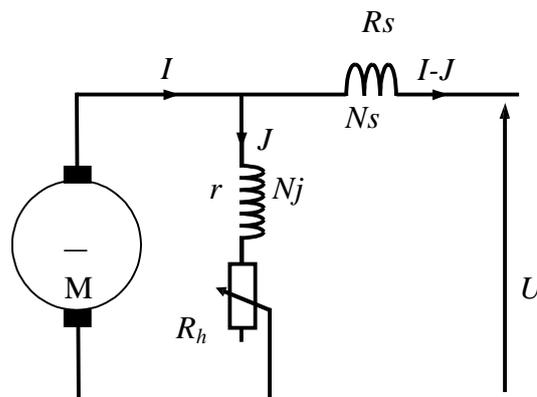
La moteur à excitation composée porte dans son inducteur deux enroulements, le premier à excitation shunt de N_j spires "beaucoup de spires et de fil fin", le second à excitation série de N_s spires "Quelques spires et de gros fil".

Mode de branchement On distingue deux modes de branchement :

A. Courte dérivation

L'enroulement N_j est shunté directement avec l'induit de la moteur fig.7.10.

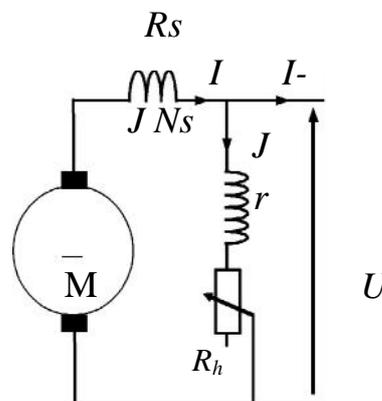
Fig.7.10. moteur à excitation composée de courte dérivation



B. Longue dérivation

L'enroulement N_j est shunté en série avec N_s , et tous les deux sont montés en parallèle avec l'induit de la moteur fig.7.11.

Fig.7.11. moteur à excitation composée de longue dérivation



Concernant les deux modes de branchement, on peut réaliser un compound à somme additive ou un compound à somme soustractive suivant le sens d'orientation du flux de l'enroulement série par rapport au flux de l'enroulement inducteur.

EXERCICE DE LA MACHINES A COURANT CONTINUA

LES MACHINES A COURANT CONTINU A

Exercice N°1:**GENERATRICE A EXCITATION INDEPENDANTE**

On donne quelques points de la caractéristique à vide à $N=1200$ tr/mn d'une génératrice à excitation indépendante:

$J(A)$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$E_o(V)$	60	120	180	219	243	261	273	282	291

Les résistances de l'induit et de l'inducteur sont respectivement $R=1,2$ et $r=120$.

L'inducteur est alimenté par une source indépendante donnant une tension constante de 210V. La réaction de l'induit est supposée négligeable.

1. Tracer la caractéristique à vide. On déduire R_c critique (R_c).
2. Quel est le courant d'excitation qui donne $U=250V$. Calculer la résistance correspondante du rhéostat d'excitation.
3. En conservant le courant d'excitation précédent. Tracer la caractéristique en charge pour un courant d'induit I variant de 0 à 30A.
4. On veut avoir une tension $U=250V$ constante quel que soit le débit. Quelles valeurs faut-il donner au courant d'excitation pour avoir les débits suivants: 10, 20 et 30A.
Calculer les résistances correspondantes du rhéostat d'excitation. Quel est le débit maximal possible pour conserver la tension $U=250V$?

Solution EX 01:**GENERATRICE A EXCITATION INDEPENDANTE**

- la courbe de caractéristique à vide ; $E = f(j)$:

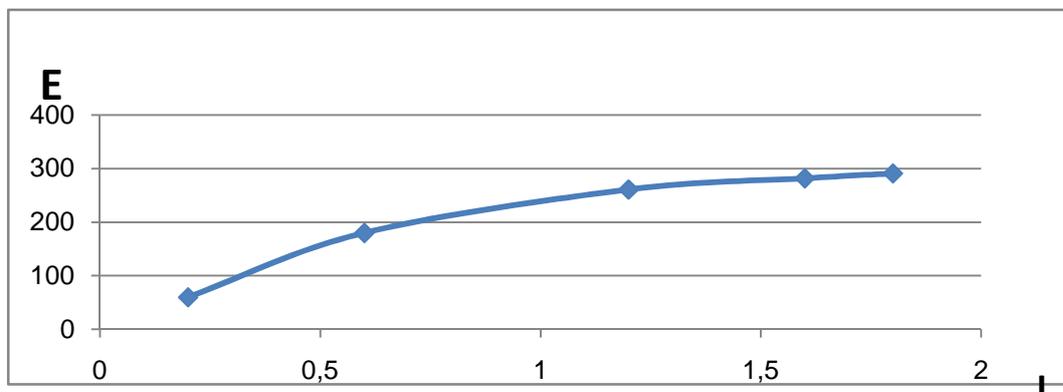
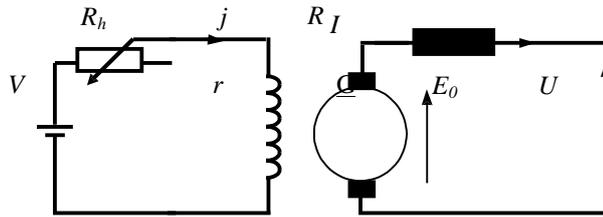


Figure 1: la caractéristique à vide

$N=1200\text{tr/min}$, $R=1,2$, $r=120$.

$\Rightarrow E_{ch}=E_0$

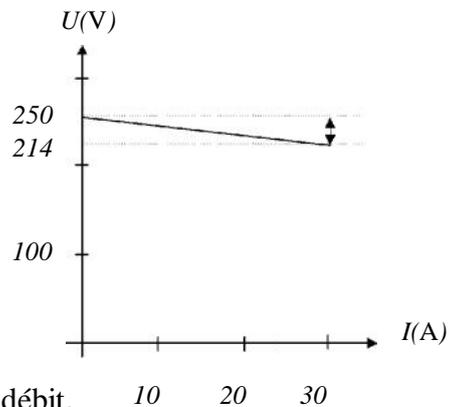


2. $E_0=U+(R_i a)$ et $I=0\text{A}$ à vide $\Rightarrow E_{ch}=U=250\text{V} \Rightarrow J=1,07\text{A}$,

Alors $V=(r+R_h)J \Rightarrow R_h= \frac{V}{J} -r \Rightarrow R_h=76$.

3. Pour $J=1,07\text{A}$ et I de 0 à 30A, la tension $U=E_0+RI$.

214	226	238	250	$U(\text{V})$
30	20	10	0	$I(\text{A})$



La péneste $-\frac{\Delta U}{\Delta I} = -1,2$.

4. La tension $U=250\text{V}$ est constante quelque soit le débit.

Le courant est maximal pour une f.é.m maximale lorsque le rhéostat est nul, on a

$J=\frac{V}{R} = 1,75\text{A}$ implique $E_0=289\text{V}$, d'où un courant maximal $I_{\max}=\frac{E_0-U}{R}=32,5\text{A}$.

$I_a(\text{A})$	10	20	30
$E_0(\text{V})$	262	274	286
$J(\text{A})$	1,2	1,4	1,68
$R_h(\text{ })$	55	30	5

Exercice 2 : Moteur à excitation indépendante

On alimente un moteur à courant continu en excitation indépendante par une tension nominale constante $U_n=120V$. La résistance d'induit $R=0.5 \Omega$

_ A vide, l'induit absorbe le courant $I_0=2A$.

_ En charge pendant le fonctionnement nominal, l'induit absorbe un courant $I=20A$ pour une fréquence de rotation de 1500 tr/min .

On négligera le long de l'exercice la rotation magnétique de l'induit et la chute de la tension collecteur-balais ($e_b = (I)=0$).

1. Le couple de démarrage étant 2 fois plus que le couple électromagnétique nominale.

Evaluer la résistance de démarrage R_d à mettre en série avec l'induit.

2. Calculer, pour le fonctionnement en charge :

2.1. La force contre électromotrice du moteur.

2.2. Le couple électromagnétique C_{em} .

2.3. Le couple porte C_p est supposé constant, quel que soit la vitesse N .

2.4. La puissance utile P_u .

3. déterminer la vitesse de rotation du moteur :

3.1. A vide.

3.2. Lorsque le couple résistant vaut 10 Nm

Solution EX 02:

Le moteur est alimenté sous sa tension nominale $U_n=120v$; la résistance de l'induit vaut $R=0.5$

_ A vide, l'induit absorbe le courant $I_0=2A$.

_ En charge $I=20A$ pour $N=1500 \text{ tr/ mn}$.

1. $I_d=2I_n$ au démarrage $E_v=0v$ puisque $N=0 \text{ tr/mn}$, ce qui implique

$$U=(R+R_d)I_d=(R+R_d)2I_n \quad \Leftrightarrow \quad R_d=(U/2I_n)-R = 2.5 \quad .$$

2. Pour le fonctionnement en charge :

$$2.1. E_v = E_{ch} = U - RI = 120 - 0.5 * 20 = 110 \text{v}$$

$$2.2. C_{em} = E_{ch} I / \omega = (E_{ch} I / 2 \pi \cdot 1500) / 60 = 14 \text{Nm}$$

$$2.3. C_p = [(U - RI_0) I_0 / 2 \pi \cdot 1500] / 60 = (110 * 2 / 2 \pi \cdot 1500) / 60 = 1.5 \text{Nm}$$

$$C_{em} / C_p = I_n / I_0 \Rightarrow C_p = (C_{em} / I_n) I_0 = 14 * 2 / 20 = 1.4 \text{Nm}$$

2.4. la puissance utile :

$$P_u = C_u \omega \Rightarrow C_u = C_{em} - C_p \Rightarrow 14 - 1.5 = 12.5 \text{Nm}$$

$$\Rightarrow (12.5 * 2 \pi \cdot 1500) / 60 = 1962.5 \text{w}$$

3. la vitesse du moteur :

3.1. à vide $E_0 = U - RI_0 = 120 - 0.5 * 2 = 119 \text{v}$, on a la vitesse est proportionnelle à la f.e.m d'où

$$N_0 = E_0 N / E_{ch} = 119 * 1500 / 110 = 1623 \text{tr/min}$$

3.2. à flux constant E proportionnelle à N et C proportionnel à I.

$$C_u = C_r = C_{em} - c_p \Rightarrow C_{em} = 10 + 1.5 = 11.5 \text{Nm}$$

$$\Rightarrow I = C_{em} * I_n / C_{em} = (20 * 11.5) / 14 = 16.43 \text{A},$$

$$\text{la f.e.m } E'_v = U - RI \Rightarrow E'_v = 120 - 0.5 * 16.43 = 112 \text{v}$$

$$\text{et } N = (N_n E'_v) / E_v = (1500 * 112) / 110 = 1527 \text{Nm}$$

Exercice 3 :

Une machine d'extraction est entraînée par un moteur à courant continu à excitation indépendante. L'inducteur est alimenté par une tension $u = 600$ V et parcouru par un courant d'excitation d'intensité constante : $i = 30$ A.

L'induit de résistance $R = 12$ m Ω est alimenté par une source fournissant une tension U réglable de 0 V à sa valeur nominale : $U_N = 600$ V.

L'intensité I du courant dans l'induit a une valeur nominale :

$I_n = 1,50$ kA. La fréquence de rotation nominale est $n = 30$ tr/min.

N.B. Les parties 1, 2, 3 sont indépendantes.

1- Démarrage

1-1- En notant Ω la vitesse angulaire du rotor, la fem du moteur a pour expression : $E = K\Omega$ avec Ω en rad/s.

Quelle est la valeur de E à l'arrêt ($n = 0$) ?

1-2- Dessiner le modèle équivalent de l'induit de ce moteur en indiquant sur le schéma les flèches associées à U et I .

1-3- Ecrire la relation entre U , E et I aux bornes de l'induit, en déduire la tension U_d à appliquer au démarrage pour que $I_d = 1,2 I_N$.

1-4- Citer un système de commande de la vitesse de ce moteur.

2- Fonctionnement nominal au cours d'une remontée en charge

2-1- Exprimer la puissance absorbée par l'induit du moteur et calculer sa valeur numérique.

2-2- Exprimer la puissance totale absorbée par le moteur et calculer sa valeur numérique.

2-3- Exprimer la puissance totale perdue par effet Joule et calculer sa valeur numérique.

2-4- Sachant que les autres pertes valent 27 kW, exprimer et calculer la puissance utile et le rendement du moteur.

2-5- Exprimer et calculer le moment du couple utile T_u et le moment du couple électromagnétique T_{em} .

3- Fonctionnement au cours d'une remontée à vide

3-1- Montrer que le moment du couple électromagnétique T_{em} de ce moteur est proportionnel à l'intensité I du courant dans l'induit : $T_{em} = KI$. On admet que dans le fonctionnement au cours d'une remontée à vide, le moment du couple électromagnétique a une valeur T_{em}' égale à 10 % de sa valeur nominale et garde cette valeur pendant toute la remontée.

3-2- Calculer l'intensité I' du courant dans l'induit pendant la remontée.

3-3- La tension U restant égale à U_n , exprimer puis calculer la fem E' du moteur.

3-4- Exprimer, en fonction de E' , I' et T_{em}' , la nouvelle fréquence de rotation n' . Calculer sa valeur numérique.

Solution EX 03:

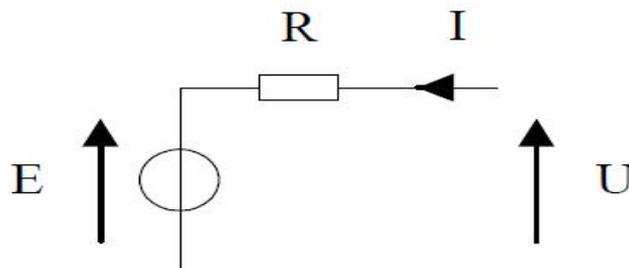
1- Démarrage

1-1- En notant Ω la vitesse angulaire du rotor, la fem du moteur a pour expression : $E = K\Omega$ avec Ω en rad/s.

Quelle est la valeur de E à l'arrêt ($n = 0$) ?

$E = 0 \text{ V}$

1-2- Dessiner le modèle équivalent de l'induit de ce moteur en indiquant sur le schéma les flèches associées à U et I .



1-3- Ecrire la relation entre U, E et I aux bornes de l'induit, en déduire la tension U_d à appliquer au démarrage pour que $I_d = 1,2 I_n$.

$$U = E + RI$$

$$U_d = R \cdot I_d = 1,2 R \cdot I_n = 1,2 \times 0,012 \times 1500 = 21,6 \text{ V}$$

1-4- Citer un système de commande de la vitesse de ce moteur.
Montage hacheur, montage redresseur.

2- Fonctionnement nominal au cours d'une remontée en charge

2-1- Exprimer la puissance absorbée par l'induit du moteur et calculer sa valeur numérique.

$$UI = U_n \cdot I_n = 600 \times 1500 = 900 \text{ kW}$$

2-2- Exprimer la puissance totale absorbée par le moteur et calculer sa valeur numérique.

$$UI + u_i = 900 \text{ kW} + 600 \times 30 = 900 \text{ kW} + 18 \text{ kW} = 918 \text{ kW}$$

2-3- Exprimer la puissance totale perdue par effet Joule et calculer sa valeur numérique.

$$RI^2 + u_i = 0,012 \times 1500^2 + 18 \text{ kW} = 27 \text{ kW} + 18 \text{ kW} = 45 \text{ kW}$$

2-4- Sachant que les autres pertes valent 27 kW, exprimer et calculer la puissance utile et le rendement du moteur.

$$\text{Pertes collectives} = 27 \text{ kW}$$

$$\text{Puissance utile} = 918 - (45 + 27) = 846 \text{ kW}$$

$$\text{Rendement} = 846 \text{ kW} / 918 \text{ kW} = 92,2 \%$$

2-5- Exprimer et calculer le moment du couple utile T_u et le moment du couple électromagnétique T_{em} .

$$T_u = P_u / \Omega = 846 \text{ kW} / 3,14 \text{ rad/s} = 269 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \text{Puissance électromagnétique} &= \text{Puissance utile} + \text{Pertes collectives} \\ &= 846 + 27 = 873 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$T_{em} = P_{em} / \Omega = 873 \text{ kW} / 3,14 \text{ rad/s} = 278 \text{ kNm}$$

3- Fonctionnement au cours d'une remontée à vide

3-1- Montrer que le moment du couple électromagnétique T_{em} de ce moteur est proportionnel à l'intensité I du courant dans l'induit :
 $T_{em} = KI$.

$$\text{Formule générale : } T_{em} = k\Phi I$$

Ici, le courant d'excitation est constant donc le flux magnétique est constant, donc le moment du couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit : $T_{em} = KI$

On admet que dans le fonctionnement au cours d'une remontée à vide, le moment du couple électromagnétique a une valeur T_{em}' égale à 10 % de sa valeur nominale et garde cette valeur pendant toute la remontée.

3-2- Calculer l'intensité I' du courant dans l'induit pendant la remontée.

$$T_{em} = KI$$

$$T_{em}' = KI'$$

$$I' = I \cdot T_{em}' / T_{em} = I/10 = 150 \text{ A}$$

3-3- La tension U restant égale à U_N , exprimer puis calculer la fem E' du moteur.

$$E' = U - RI' = 600 - 0,012 \times 150 = 598,2 \text{ V}$$

3-4- Exprimer, en fonction de E' , I' et T_{em}' , la nouvelle fréquence de rotation n' . Calculer sa valeur numérique.

$$E' = K\Omega'$$

$$E' = T_{em}'\Omega' / I'$$

$$\Omega' = E'I' / T_{em}'$$

$$n' = 60E'I' / 2\pi T_{em}' = 60 \cdot 598,2 \cdot 150 / 2\pi \cdot 27800 = 30,84 \text{ tr/min}$$

EXERCICE N°4 :

moteur à courant continu à excitation indépendante

Un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante a les caractéristiques suivantes :

- tension d'alimentation de l'induit : $U = 160 \text{ V}$ - résistance de l'induit : $R = 0,2$

1- La fem E du moteur vaut 150 V quand sa vitesse de rotation est $n = 1500 \text{ tr/min}$. En déduire la relation entre E et n .

2- Déterminer l'expression de I (courant d'induit en A) en fonction de E .

3- Déterminer l'expression de T_{em} (couple électromagnétique en Nm) en fonction de I .

4- En déduire que : $T_{em} = 764 - 0,477 \cdot n$

5- On néglige les pertes collectives du moteur. Justifier qu'alors :
 T_u (couple utile) = T_{em}

6- Calculer la vitesse de rotation du moteur à vide.

7- Le moteur entraîne maintenant une charge dont le couple résistant varie proportionnellement avec la vitesse de rotation (20 Nm à 1000 tr/min). Calculer la vitesse de rotation du moteur en charge :

- par une méthode graphique.
- par un calcul algébrique .

En déduire le courant d'induit et la puissance utile du moteur

Solution EX 04:

1- La fem E du moteur vaut 150 V quand sa vitesse de rotation est $n = 1500$ tr/min. En déduire la relation entre E et n .

$$E = 150V \quad n = 1500 \text{tr/min}$$

$$E = K * N \quad K = \frac{E}{N} = \frac{150}{1500} = 0.1$$

$$E = 0.1n .$$

2- Déterminer l'expression de I (courant d'induit en A) en fonction de E .

$$I = (U - E)/R$$

3- Déterminer l'expression de T_{em} (couple électromagnétique en Nm) en fonction de I .

$$C_{ém} = K * \Phi * I$$

$$E = K * \Phi * \Omega \quad E = 0.1N \rightarrow \frac{E}{N} = 0.1$$

$$K * \Phi = \frac{E}{\Omega} = \frac{E}{N * \frac{2\pi}{60}} = \frac{E * 60}{N * 2\pi}$$

$$K \cdot \emptyset = 0.1 * \frac{60}{2\pi} = 0.955 (\text{V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s})$$

$$C_{ém} (\text{en Nm}) = K \cdot \emptyset \cdot I = 0.955 I (\text{A}).$$

4- En déduire que : $C_{ém} = 764 - 0,477 \cdot n$

$$C_{ém} = 0.955 \cdot I \quad ; \quad I = (U - E) / R$$

$$C_{ém} = 0.955 * \frac{u - E}{R}$$

$$C_{ém} = 0.955 * ((U - 0.1N) / R)$$

$$C_{ém} = 0.955 * ((160 - 0.1N) / 0.2)$$

$$C_{ém} = 764 - 0.477N$$

5- On néglige les pertes collectives du moteur. Justifier qu'alors : C_u (couple utile) = $C_{ém}$

$$P_u = P_{ém} - P_c$$

$$P_c = 0$$

$$P_u = P_{ém} \quad \frac{P_u}{\Omega} = \frac{P_{ém}}{\Omega}$$

$$C_u = C_{ém}$$

6-Calculer la vitesse de rotation du moteur à vide

$$C_{ém} = 0 \text{ et } C_u = 0$$

$$C_{ém} = 764 - 0.477N$$

$$0 = 764 - 0.477N \quad N = \frac{764}{0.477} = 1600 \text{ tr/min}$$

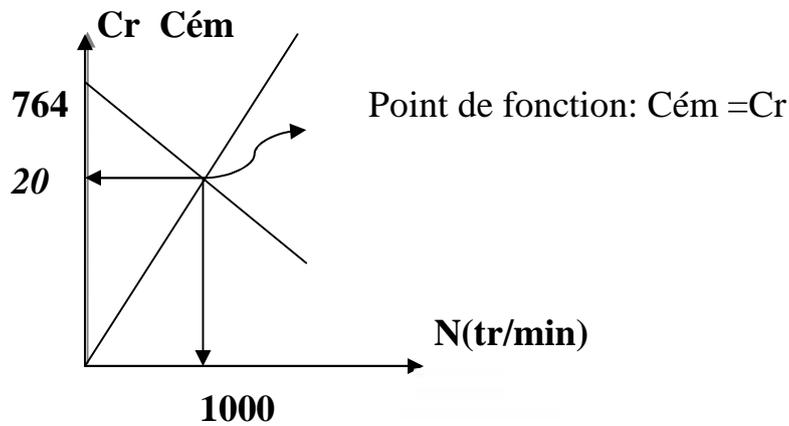
Autre méthode : $E = U$ (à vide, $I = 0$ si on néglige les pertes collectives).

$$n = 160 / 0,1 = 1600 \text{ tr/min}$$

7- Le moteur entraîne maintenant une charge dont le couple résistant varie proportionnellement avec la vitesse de rotation (20 Nm à 1000 tr/min). Calculer la vitesse de rotation du moteur en charge :

- par une méthode graphique:

Cr(20N.m 1000tr/min)



$$PF \Rightarrow Cr = K \cdot N \quad K = \frac{Cr}{N} = \frac{20}{1000} = 0.02$$

$$Cr = 0.02N$$

- par un calcul algébrique:

$$Cém = Cr = Cu \text{ (en charge)}$$

$$Cém = 764 - 0.477N$$

$$Cém = Cr$$

$$764 - 0.477N = 0.02N \quad 0.497N = 764 \quad N = \frac{764}{0.497} = 1537 \text{ tr/min}$$

En déduire le courant d'induit et la puissance utile du moteur.

$$I = \frac{U - E}{R} = \frac{160 - 0.1 \cdot 1537}{0.2} = 32.2 \text{ A}$$

$$Cém = 0.955I \quad I = \frac{(764 - 0.477 \cdot 1537)}{0.955} = 32.2 \text{ A}$$

La Puissance utile :

$$Pu = Pém - Pc$$

$$Pc = 0$$

$$Pu = Pém \quad Pu = EI \quad Pu = 0.1 \cdot N \cdot I$$

$$Pu = 0.1 \cdot 1537 \cdot 32.2 = 4.94 \text{ KW} \quad Pu = Pém = 4.94 \text{ KW.}$$

Exercice 5 :

Un moteur à courant continu est à excitation indépendante et constante. On néglige sa réaction l'induit. L'induit a une résistance $R = 0,20 \Omega$. il est alimenté sous une tension constante $U = 38 \text{ V}$.

1. A charge nominale, l'induit est parcouru par une intensité $I = 5 \text{ A}$ et il tourne à la fréquence de rotation de 1000 tr/min .

1.1 Représenter le modèle équivalent de l'induit, en fléchant la tension et le courant.

1.2 Calculer la force électromotrice E de l'induit.

1.3 Calculer le moment du couple électromagnétique C .

1.4 Montrer que l'on peut exprimer E en fonction de la fréquence de rotation n suivant la relation : $E = K.n$.

2. Par suite d'une variation de l'état de charge, l'intensité à travers l'induit devient $I' = 3,8 \text{ A}$,

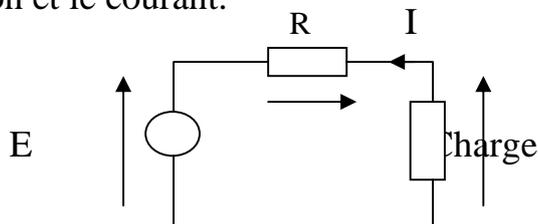
Calculer :

2.1 Le nouveau moment du couple électromagnétique C' ,

2.2 La nouvelle fréquence de rotation n' . comparer n et n' .

Solution EX 05:

1.1 Représenter le modèle équivalent de l'induit, en fléchant la tension et le courant.



1.2 Calculer la force électromotrice E de l'induit.

$$E = U - RI = 38 - 0,2 \cdot 5 = 37 \text{ V}$$

1.3 Calculer le moment du couple électromagnétique C .

$$C_u = P_{\text{ém}}/n = EI/n = (37 \cdot 5)/1000 \cdot (2\pi/60) = 1,76 \text{ N.m}$$

1.4 Montrer que l'on peut exprimer E en fonction de la fréquence de rotation n suivant la relation : $E = K.n$.

$$E = K^* \cdot n \quad \text{avec} \quad K = K^*$$

$$E = K^* \cdot n$$

2. Par suite d'une variation de l'état de charge, l'intensité à travers l'induit devient $I' = 3,8$ A,

Calculer :

2.1 Le nouveau moment du couple électromagnétique C' ,

$$E' = U - RI' = 38 - 0,2 \cdot 3,8 = 37,24 \text{ V}$$

$$C_u' = P_{ém}/n = E'I'/n = (37,24 \cdot 3,8)/1000 \cdot (2\pi/60) = 1,84 \text{ N.m}$$

2.2 La nouvelle fréquence de rotation n' .

$$E \rightarrow n$$

$$E' \rightarrow n'$$

$$n' = (n \cdot E')/E = (1000 \cdot 37,24)/37 = 1006,48 \text{ tr/min.}$$

comparer n et n' . $n < n'$

E Exercice 6 :

On dispose d'un moteur à courant continu à excitation indépendante. L'induit, de résistance $R = 0,50 \Omega$, est alimenté par une tension continue $U = 220$ V.

L'inducteur absorbe un courant d'excitation i constant.

1. Le moteur fonctionne en charge. L'induit absorbe un courant $I = 10$ A. le moteur fournit une puissance utile $P_u = 1,8$ KW. Il tourne à une fréquence de rotation de 1200 tr/min.

a. Calculer la f.é.m du moteur.

b. Calculer le moment du couple utile.

2. Le moteur fonctionne à couple constant. L'induit absorbe toujours $I = 10$ A. pour régler la vitesse, on modifie la tension U .

a. Citer un dispositif électronique qui permet de faire varier cette vitesse.

b. La tension U prend la valeur $U = 110 \text{ V}$: calculer la nouvelle f.é.m et la fréquence de rotation correspondante.

Solution EX 06:

a. Calculer la f.é.m du moteur.

$$E = U - RI = 220 - 0.5 * 10 = 115 \text{ v}$$

b. Calculer le moment du couple utile.

$$C_u = P_u/n = 1800/1200 * (2 / 60) = 14.3 \text{ N.m}$$

2. Le moteur fonctionne à couple constant. L'induit absorbe toujours $I = 10 \text{ A}$. pour régler la vitesse, on modifie la tension U .

a. Citer un dispositif électronique qui permet de faire varier cette vitesse.

Régulateur de vitesse ,varier résistance PD PID

b. La tension U prend la valeur $U = 110 \text{ V}$:

calculer la nouvelle f.é.m et la fréquence de rotation correspondante.

$$E' = U - RI = 110 - 0.5 * 10 = 105 \text{ v}$$

$$E \longrightarrow n$$

$$E' \longrightarrow n'$$

$$n' = E' * n / E = (105 * 1200) / 115 = 1095.6 \text{ tr/min.}$$

Exercice 7 :

1- Donner le schéma électrique équivalent d'un moteur à courant continu à excitation série.

2- On donne :

- tension d'alimentation du moteur : $U = 200 \text{ V}$
- résistance de l'inducteur : $r = 0,5$
- résistance de l'induit : $R = 0,2$
- courant consommé : $I = 20 \text{ A}$

- vitesse de rotation : $n = 1500 \text{ tr/min}$

Calculer :

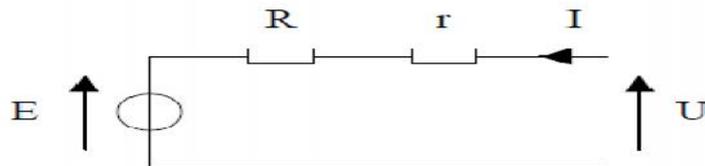
2-1- La f.e.m. du moteur.

2-2- La puissance absorbée, la puissance dissipée par effet Joule et la puissance utile si les pertes collectives sont de 100 W. En déduire le moment du couple utile et le rendement.

2-3- Au démarrage, le courant doit être limité à $I_d = 40 \text{ A}$. Calculer la valeur de la résistance du rhéostat à placer en série avec le moteur

Solution EX 07:

1) - le schéma électrique équivalent d'un moteur à courant continu à excitation série:



2) -

2-1)- La f.e.m. du moteur :

$$U = E + (R + r).I$$

$$E = U - (R + r).I = 200 - (0,2 + 0,5) \times 20 = 186 \text{ V}$$

2-2)- La puissance absorbée, la puissance dissipée par effet Joule et la puissance utile si les pertes collectives sont de 100 W.

En déduire le moment du couple utile et le rendement.

* Puissance absorbée :

$$P_a = UI = 200 \times 20 = 4000 \text{ W}$$

* Pertes Joules totales :

$$P_{\text{joule}} = (R + r)I^2$$

$$P_{\text{joule}} = (0,2 + 0,5) \times 20^2 = 280 \text{ W}$$

* Puissance utile :

$$P_u = 4000 - (280 + 100) = 3620 \text{ W}$$

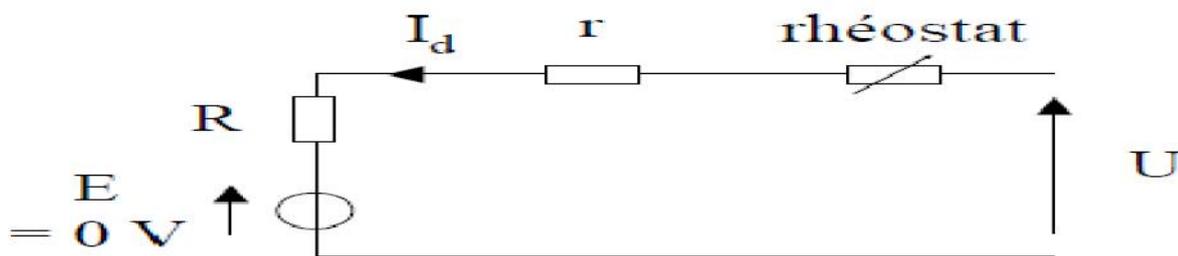
$$T_u = (P_u / \omega) = (3620 / (1500 \cdot 2\pi / 60)) = 3620 / 157 = 23 \text{ N.m}$$

* Rendement :

$$\eta = P_u / P_a = 3620 / 4000 = 0.905 = 90.5 \%$$

2-3)-

Au démarrage, le courant doit être limité à $I_d = 40 \text{ A}$ et $E = 0$:



Au démarrage, vitesse de rotation est égale (0). (fem $E=0$):

$$U = (R + r + R_h) i_d$$

$$R_h = (U / i_d) - (R + r)$$

$$R_h = (200 / 40) - (0,2 + 0,5) = 4,3$$

Exercice 8 : MOTEUR A EXCITATION INDEPENDANTE

On dispose d'un moteur à excitation indépendante est alimenté sous une tension variable U . Son inducteur est alimenté pou' tension constante (à flux constant). On suppose que la réaction magnétique de l'induit et la chute de la tension collecteur balais sont nulles ($e_b = \varepsilon(I) = 0$).

Pour le point de fonctionnement nominal. on a relevé:

$$U_n = 180\text{V}, I_n = 45 \text{ A}, C_{emn} = 36.76 \text{ Nm}, N_n = 2000 \text{ tr/min}$$

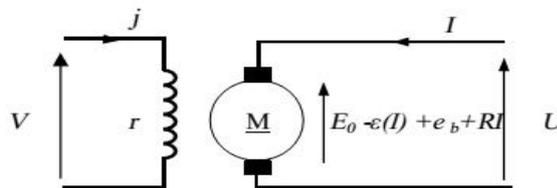
1. Déterminer la tension de démarrage afin que le couple électromagnétique de démarrage soit de 1,5 fois le couple électromagnétique nominal C_{emn} La résistance de l'induit $R = 0,2$.

2. Evaluer la vitesse de rotation du moteur ut le couple électromagnétique C_{em} lorsque le courant absorbé est de 30A sous une tension $U=150V$.

Solution EX 08:

Le point de fonctionnement nominal à pour coordonné :

$$U_n=180V, I_n=45A, C_{emn}=18Nm, N_n=2000 \text{ tr/mn.}$$



1. On a :

- $E_v = \left[\frac{p}{a} n N \left(\frac{\mu_a N_c}{l} \right) S \cos \theta \right] J \Rightarrow E_v = k N \phi$ ou $E_v = K N J$

avec $k = \frac{p}{a} n$ et $K = \frac{p}{a} n \left(\frac{\mu_a N_c}{l} \right) S \cos \theta$.

- $P_{em} = C \Omega = C \frac{2\pi N}{60} = E_{ch} I$ si $E_{ch} = E_v$ alors $C \frac{2\pi N}{60} = K N J I$ à flux constant

implique $C = \frac{60 K J}{2\pi} I = \beta I$ avec $\beta = \frac{60 K J}{2\pi}$.

Donc on peut établir la relation suivante $\frac{C_n}{C_d} = \frac{I_n}{I_d} \Rightarrow I_d = \frac{C_d I_n}{C_n}$, on sait qu'au démarrage $N=0$ tr/mn, ce qui implique $E_v=0V$, d'où $U_d = R I_d$

Alors $I_d = \frac{C_d I_n}{C_n} = \frac{1,5 C_n I_n}{C_n} = 1,5 I_n \Rightarrow I_d = 67,5A$ et $U_d = 13,5A$

2. Pour un courant d'excitation constant on aura $E_v = \alpha N$ avec $K = \frac{p}{a} n \left(\frac{\mu_a N_c}{l} \right) S \cos \theta J$.

Donc on peut établir la relation suivante $\frac{E_n}{E_{ch}} = \frac{N_n}{N_{ch}}$.

On a $E_{ch} = E_v$ alors $E_{ch} = U - R I = 150 - 0,2 \times 30 = 144V$,

$$E_n = U_n - R I_n = 180 - 0,2 \times 45 = 171V \Rightarrow N_{ch} = \frac{E_{ch} N_n}{E} = \frac{144 \times 2000}{171} = 1684 \text{ tr/mn.}$$

Le couple correspondant $C = \frac{C_n I}{I_n} = \frac{36,76 \times 30}{45} = 24,5Nm$.

ou bien $C = \frac{E_{ch} I}{\Omega} = \frac{144 \times 30}{2\pi 1684} = 24,5 \text{ Nm}$.

Exercice 9 :

La plaque signalétique d'un moteur à excitation indépendante porte les indications suivantes : $U = 240 \text{ V}$ $I = 35 \text{ A}$ $P = 7 \text{ kW}$ $n = 800 \text{ tr/min}$

Calculer (à la charge nominale) :

1. Le rendement du moteur sachant que les pertes Joule inducteur sont de 150 watts.
2. Les pertes Joule induit sachant que l'induit a une résistance de $0,5 \Omega$.
3. La puissance électromagnétique et les pertes « constantes ».
4. Le couple électromagnétique, le couple utile et le couple des pertes « constantes ».

Solution EX 09:

1- Le rendement du moteur sachant que les pertes Joule inducteur sont de 150 watts.

Puissance utile : 7 kW

Puissance absorbée par l'induit = $UI = 240 \times 35 = 8,4 \text{ kW}$

Puissance absorbée par l'inducteur = pertes Joule à l'inducteur = 150 W

Puissance absorbée = puissance absorbée par l'induit + puissance absorbée par l'inducteur = $8400 + 150 = 8,55 \text{ kW}$

Rendement = $7000/8550 = 81,9 \%$

2- Les pertes Joule induit sachant que l'induit a une résistance de $0,5 \Omega$.

$RI^2 = 0,5 \times 35^2 = 0,61 \text{ kW}$

3- La puissance électromagnétique et les pertes « constantes ».

Puissance électromagnétique = fem induite courant d'induit

Fem induite : $E = U - RI = 240 - 0,5 \times 35 = 222,5 \text{ V}$

$EI = 222,5 \times 35 = 7,79 \text{ kW}$

Autre méthode : bilan de puissance

Puissance électromagnétique = puissance absorbée – pertes Joule totales

$= 8,55 - (0,15 + 0,61) = 7,79 \text{ kW}$

Bilan de puissance :

Pertes « constantes » (ou pertes collectives) = puissance électromagnétique – puissance utile = $7,79 - 7 = 0,79$ kW

4- Le couple électromagnétique, le couple utile et le couple des pertes « constantes ».

Couple électromagnétique = $7790 / (800 \times 2\pi / 60) = 93$ Nm

Couple utile = $7000 / (800 \times 2\pi / 60) = 83,6$ Nm

Couple des pertes constantes = $790 / (800 \times 2\pi / 60) = 93 - 83,6 = 9,4$ Nm

Exercice 1 0:

Un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante a les caractéristiques suivantes :

- tension d'alimentation de l'induit : $U = 160$ V

- résistance de l'induit : $R = 0,2 \Omega$

La fem E du moteur vaut 150 V quand sa vitesse de rotation est $n = 1500$ tr/min.

En déduire la relation entre E et n.

Déterminer l'expression de I (courant d'induit en A) en fonction de E.

Déterminer l'expression de T_{em} (couple électromagnétique en Nm) en fonction de I.

En déduire que : $T_{em} = 764 - 0,477 \cdot n$

On néglige les pertes collectives du moteur. Justifier qu'alors :

T_u (couple utile) = T_{em}

1- Calculer la vitesse de rotation du moteur à vide.

2- Le moteur entraîne maintenant une charge dont le couple résistant varie proportionnellement avec la vitesse de rotation (20 Nm à 1000 tr/min).

Calculer la vitesse de rotation du moteur en charge :

3- - par une méthode graphique

4- - par un calcul algébrique

5- En déduire le courant d'induit et la puissance utile du moteur.

Solution EX 10:

1- La fem E du moteur vaut 150 V quand sa vitesse de rotation est $n = 1500$ tr/min.

L'excitation étant constante, E est proportionnelle à n :

$$E \text{ (en V)} = 0,1 \cdot n \text{ (tr/min)}$$

2- Déterminer l'expression de I (courant d'induit en A) en fonction de E .

$$I = (U - E)/R$$

3- Déterminer l'expression de T_{em} (couple électromagnétique) en fonction de I .

$$T_{em} = k\Phi I$$

$$E = k\Phi\Omega \text{ avec } \Omega \text{ en rad/s}$$

$$T_{em} \text{ (en Nm)} = 0,955 \cdot I \text{ (en A)}$$

4- En déduire que : $T_{em} = 764 - 0,477 \cdot n$

$$T_{em} = k\Phi I = k\Phi(U - E)/R = k\Phi(U - 0,1n)/R$$

$$T_{em} = 764 - 0,477 \cdot n$$

5- On néglige les pertes collectives du moteur. Justifier qu'alors :

$$T_u \text{ (couple utile)} = T_{em}$$

Le couple des pertes collectives est négligeable :

$$T_u = T_{em} - T_{\text{pertes collectives}} = T_{em}$$

6- Vitesse de rotation du moteur à vide.

$$T_u = 0 \quad \text{et} \quad T_{em} = 0$$

$$n = 764/0,477 = 1600 \text{ tr/min}$$

Autre méthode : $E = U$ (à vide, $I = 0$ si on néglige les pertes collectives).

$$n = 160/0,1 = 1600 \text{ tr/min}$$

7- T_r (en Nm) = $0,02 \cdot n$ (en tr/min)

- par méthode graphique :

On trace les droites $T_r(n)$ et $T_u(n)$.

L'intersection donne le point de fonctionnement.

- par un calcul algébrique

Au point de fonctionnement : $T_u = T_r$

$$764 - 0,477 \cdot n = 0,02 \cdot n \implies n = 1536 \text{ tr/min}$$

En déduire le courant d'induit et la puissance utile du moteur.

$$I = (U - E)/R = (U - 0,1n)/R = 32,2 \text{ A}$$

$$\text{Autre méthode : } I = T_{em}/0,955 = 0,02 \cdot n/0,955 = 32,2 \text{ A}$$

$$P_u = T_u \Omega = (30,7 \text{ Nm}) \times (160,8 \text{ rad/s}) = 4,94 \text{ kW}$$

$$\text{Autre méthode : } P_u = P_{ém}$$

$$(\text{pas de pertes collectives}) = EI = (153,6 \text{ V}) \times (32,2 \text{ A}) = 4,94 \text{ kW}$$

Machine synchrone

1 Constitution et principe de fonctionnement

Le rotor porte l'enroulement inducteur parcouru par un courant d'excitation I_e continu créant dans un champ magnétique $2p$ polaire.

Il possède donc p paires de pôles.

Le stator porte l'enroulement induit de courants alternatifs.

Fonctionnement en moteur :

Les courants alternatifs de fréquence f dans l'induit (stator) créent dans l'entrefer de la machine, un champ magnétique tournant à la vitesse n_s .

Le rotor, siège d'un champ magnétique constant, suit le champ tournant à la même vitesse n_s .

Fonctionnement en alternateur :

L'inducteur sur le rotor entraîné par une turbine tournant à la vitesse n_s , crée dans l'entrefer de la machine un champ tournant à la vitesse n_s .

Ce champ tournant induit aux bornes de l'induit (stator) une f.e.m. $e(t)$ de fréquence f .

La machine synchrone est réversible.

Rappel : toute variation de champs magnétique à travers une bobine créée aux bornes de la bobine une f.é.m. $e(t)$ induite. C'est la loi de Faraday.

Le rotor et le champ tournant ont la même vitesse n_s . On dit qu'ils sont synchrone (d'où l'indice s de n_s).

La fréquence f de la f.e.m. ou du courant de l'induit (stator) et la vitesse de synchronisme n_s sont liées par la relation :

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

n_s : vitesse de rotation du champs tournant en trs.s⁻¹ ;

f : fréquence des courants alternatifs en Hz ;

p : nombre de paires de pôles.

L'enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. $e(t)$ de valeur efficace E .

$$E = K\Phi n_s$$

E : f.é.m. induit (V)

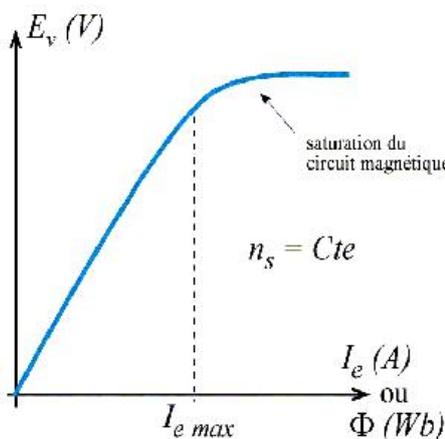
K : constante globale (caractéristique du moteur)

Φ : flux maximum à travers un enroulement (Wb)

machine synchrone

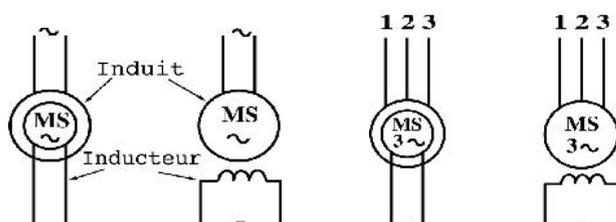
Remarque : l'enroulement du stator est disposé de telle façon que la f.é.m. $e(t)$ soit le plus possible de forme sinusoïdale.

Caractéristique en fonction du courant d'excitation I_e (caractéristique à vide)



Tant que le courant d'excitation dans l'inducteur I_e ne dépasse pas une certaine limite ($I_{e\max}$), la valeur efficace E de la f.e.m. est proportionnelle à ce courant.

C'est le courant I_e qui détermine le flux magnétique Φ dans l'entrefer de la machine.

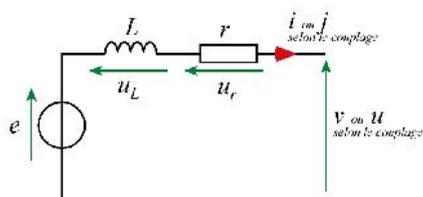


Schémas en monophasé et triphasé

2 Modélisation

Modèle d'un enroulement de l'induit (stator)

Alternateur



e : f.é.m. à vide (V)

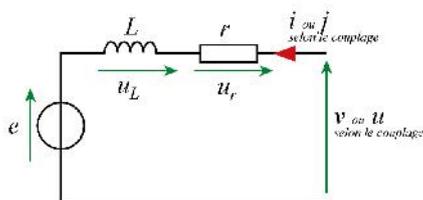
v : tension aux bornes d'un enroulement de la machine (V)

r : résistance de l'enroulement (Ω)

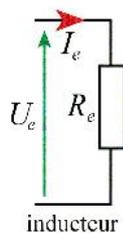
$X = L_s \omega$: réactance synchrone (Ω)

Le courant est orienté en convention générateur.

Moteur



Modèle de l'enroulement de l'inducteur (rotor)



I_e : courant d'excitation (A)

U_e : tension d'excitation (V)

R_e : résistance de l'enroulement (Ω)

L'inducteur est équivalent à une résistance

Toute l'énergie absorbée à l'inducteur est perdue par effet joule :

$$P_e = U_e I_e = R_e I_e^2 = p_{je}$$

machine synchrone

Loi des maille (exemple pour l'alternateur)

Loi des mailles avec les grandeurs instantanées :

Loi des mailles avec les grandeurs vectorielles :

avec :

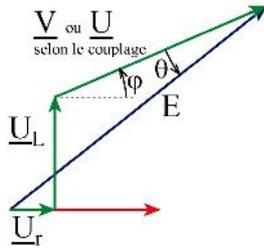
φ et I (ou J) dépendent de la charge.

Mono. ou étoile

triangle

$e=v+u_L+u_r$	$e=u+u_L+u_r$
$\vec{E}=\vec{V}+\vec{U}_L+\vec{U}_r$	$\vec{E}=\vec{U}+\vec{U}_L+\vec{U}_r$
$\vec{V} (V, \{)$	$\vec{U} (U, \{)$
$\vec{U}_L (L\dot{S}I, +f/2)$	$\vec{U}_L (L\dot{S}J, +f/2)$
$\vec{U}_r (rI, 0)$	$\vec{U}_r (rJ, 0)$

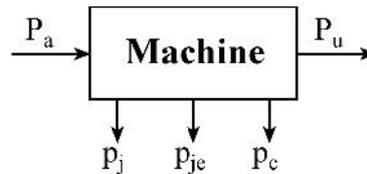
Diagrammes de Fresnel



Remarques :

- très souvent $r.I$ est négligé ;
- en traçant le diagramme à l'échelle, il est possible d'en déduire certaines grandeurs ;
- si la charge est résistive $\varphi = 0$.

3 Bilan des puissances



Moteur

Puissance absorbée

Puissance utile

Alternateur

Puissance absorbée

Puissance utile

Pertes pour le moteur et l'alternateur

Pertes joules

Pertes collectives

Monophasé

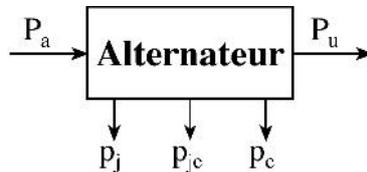
Triphasé

$P_a=VI \cos\{ +U_e I_e$	$P_a = \sqrt{3}UI \cos\{ + U_e I_e$
$P_u=\Omega_s T_u$	

$P_a = \Omega_s \cdot T_M + U_e I_e$ Alternateur à excitation indépendant :	
$P_a = \Omega_s \cdot T_M$ Alternateur auto-excité :	
$P_u=VI \cos\{$	$P_U = \sqrt{3}UI \cos\{$

$p_j=rI^2+R_e I_e^2$	$p_j=\frac{3}{2}RI^2+R_e I_e^2$
$p_c=p_{fer}+p_{méca}$	
Pas de formule ; elles peuvent s'estimer par un essai à vide	

4 Bilan des puissances d'un alternateur



Puissance mécanique

La turbine, ou le moteur à essence pour un groupe électrogène, entraîne l'arbre de l'alternateur avec un couple T_m . La puissance absorbée est mécanique.

$$P_{méca} = \Omega_S \cdot T_M = 2\pi n_S T_M$$

Ω_S : pulsation de rotation en rad.s^{-1}
 n_S : vitesse en trs.s^{-1}
 T_M : couple utile sur l'arbre en N.m

Puissance absorbée par le rotor

$P_e = U_e I_e$ Si l'alternateur est à excitation indépendante, il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor).

Si l'alternateur est auto-excité, la puissance reçue par l'inducteur (excitation) est fournie par le système d'entraînement et se trouve donc incluse dans le terme $P_{méca} = \Omega_S \cdot T_M$

Puissance absorbée totale

Alternateur à excitation indépendante : $P_a = \Omega_S \cdot T_M + U_e I_e$

Alternateur auto-excité : $P_a = \Omega_S \cdot T_M$

Alternateur à excitation à aimants permanents : $P_a = \Omega_S \cdot T_M$

Puissance utile

La charge reliée à l'alternateur absorbe un courant de valeur efficace I et présente un facteur de puissance $\cos \varphi$

$$P_u = VI \cos \varphi$$

Pertes par effet joule dans l'inducteur : $p_{je} = U_e I_e = R_e I_e^2$

Pertes par effet joule dans l'induit : $p_{ji} = r I^2$

machine synchrone

Pertes par effet joule dans l'induit :

$$p_j = rI^2 + R_e I_e^2$$

Pertes dites « collectives » p_c : pertes mécaniques et pertes fer qui ne dépendent pas de la charge.

Remarque :

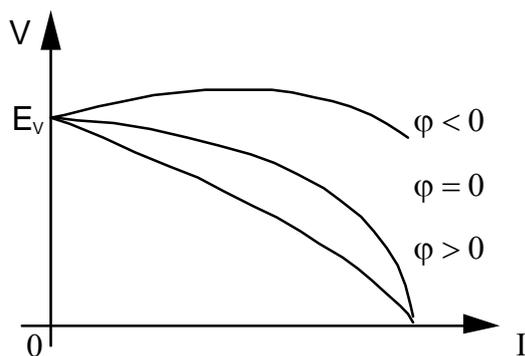
- comme les pertes mécaniques et les pertes fer dépendent de la fréquence et de la tension U , elles sont généralement constantes (50 Hz - 220V).

Rendement

$$\gamma = \frac{P_u}{P_a}$$

- b - **Caractéristique électrique $V = f(I)$:**

L'alternateur triphasé est entraîné à vitesse constante. Il alimente une charge équilibrée. L'intensité I_e du courant d'excitation est maintenue constante, le déphasage tension courant est imposé par la charge.



Nous remarquons l'effet démagnétisant (qui contraint d'augmenter I_e) d'une charge inductive et l'effet magnétisant d'une charge capacitive.

Les chutes de tension sont importantes (20 à 30 fois plus grandes que pour le transformateur) elles ne sont que très partiellement dues aux résistances des enroulements (1 % seulement), la cause principale de ces chutes de tension est l'existence du champ magnétique B_i , créée par le stator. Lorsque l'induit débite du courant, il crée un champ magnétique, appelé **Réaction Magnétique d'Induit, R.M.I**, qui vient modifier le champ issu de l'inducteur.

- c - **Etude de la R.M.I :**

L'inducteur, porté par le rotor, crée un flux, $\varphi(t)$, à l'origine d'une f.e.m induite E_v au stator (induit). Lorsque l'induit est fermé sur une charge, il est parcourue par des courants sinusoïdaux induits, i_1 , i_2 et i_3 qui vont à leurs tours créer un flux variable $i(t)$ qui va diminuer considérablement (cas d'une charge R/L) le flux $\varphi_{ch}(t)$ résultant,

machine synchrone

en charge, donc agir sur la f.e.m E_{ch} de la machine. Cette diminution de E_{ch} par rapport à E_v implique une diminution importante de la tension V .

Le flux φ crée par l'inducteur, induit : $\underline{E}_v = -j\omega\varphi$

La R.M.I introduit le flux φ_i qui induit : $\underline{E}_i = -j\omega\varphi_i$

Le flux résultant φ_{ch} s'exprime par la relation vectorielle :

$$\vec{\varphi}_{ch} = \vec{\varphi} + \vec{\varphi}_i$$

En charge, la f.e.m est donc donnée pour une machine non saturée par la relation :

$$\underline{E}_{ch} = \underline{E}_v + \underline{E}_i$$

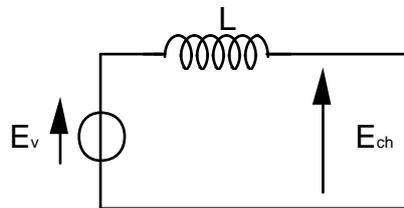
- B - MODELE EQUIVALENT D'UNE PHASE DE L'ALTERNATEUR :

- a - Représentation du modèle :

Les hypothèses simplificatrices suivantes seront respectées dans toute la suite de notre étude :

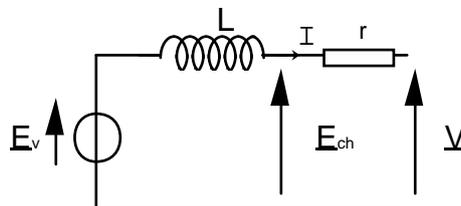
- Charge équilibrée - Régime permanent - Rotor à pôles lisses - Machine non saturée -

Pour tenir compte de la R.M.I, on la modélise électriquement par une bobine d'inductance L :



$X = L\omega$: appelée réactance synchrone.

Schéma, auquel il faut ajouter une résistance qui rendra compte des pertes par effet joule dans les enroulements. Soit, r , la résistance d'un enroulement, le modèle équivalent d'une phase de l'alternateur est :



$$v = e_v - L \frac{di}{dt} - r.i$$

$$\underline{V} = \underline{E}_v - j.L.\omega.\underline{I} - r.\underline{I}$$

Soit : $X = L\omega$: la réactance synchrone.

Soit : $Z = \sqrt{r^2 + L.\omega^2}$: l'impédance synchrone

EXERCICE DE LA MACHINE SYNCHRONE

Exercice 1 :

On considère un alternateur monophasé (circuit magnétique non saturé), ayant les caractéristiques suivantes:

- Tension d'induit $U=380\text{V}$;
- fréquence $F=60\text{ Hz}$;
- Vitesse de rotation $N=900\text{ tr/min}$;
- Résistance d'induit $r=0.02$.

Lorsque le courant d'excitation vaut 9 A , la tension à vide est égale à 420V . 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) Déterminer la réactance synchrone .

3) le facteur de puissance de l'installation étant de 0.9 , trouver la fém. à avion pour $U=380\text{V}$.

Et $I=120\text{ A}$ en utilisant le diagramme de Behn-Eshenbourg.

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

Le rotor consomme un courant de $i=5\text{A}$ sous une tension de 17V , et les pertes constantes sont égales à 700 w .

5) Calculer pour les conditions des questions 3/ et 4/, la puissance utile ainsi que son rendement.

Exercice de la machine synchrone

Solution EX 01:

1/le nombre de pôles de l'alternateur:

$$P=60.f/N =60.60/900=4 \qquad 2P=8\text{Pole}$$

2/la réactance synchrone :

$$E = J_{rs}+jX_s.J \qquad ; \quad r=0$$

$$X_s= (E_{cc}/ J_{cc})^2$$

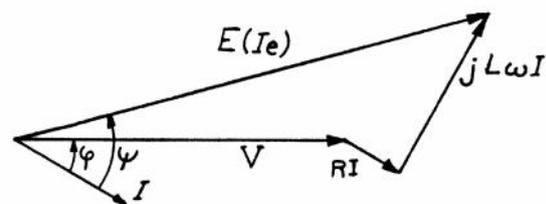
$$X_s= (233.33/307)^2-(0.02)^2=0.76 \quad .$$

3/la fem:

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_{AR})$$

$$E_x=380(0.9)+(0.02*120)=344.4V.$$

$$E_y=380(0.43)+(0.76*120)=256.6V.$$



$$\cos(\theta) = 0.9 \qquad , \quad \theta = 25.84.$$

$$\sin(\theta) = 0.43$$

$$E = 429.62 \text{ V.}$$

4/le courant d'excitation:

$$E = \sqrt{344.4^2 + 256^2}$$

$$I_{ex} = 9A \quad E_v = 420V$$

$$I_{ex} = x = E = 429.62V$$

$$I_{ex} = 429.6 * 9 / 420 = 9.2A$$

5)*la puissance utile:

$$P_u = U * I * \cos(\theta)$$

$$= 380 * 120 * 0.9 = 41040$$

*rendement:

$$= P_u / (P_u + P_c + P_{J_s} + P_{J_r})$$

$$P_{J_s} = 0.02 * (120)^2 = 288 \text{ w}$$

$$P_{J_r} = 17 * 5 = 85 \text{ w}$$

$$= 41040 / (41040 + 700 + 288 + 85) = 0.97 \qquad = 97\%$$

Exercice de la machine synchrone

Exercice 2 :

Un alternateur triphasé étoile a une tension (entre phase) $U=660V$.

Et débite un courant de $500A$ sous un $\cos\phi=0.8$

(indicatif) à la fréquence $f= 50Hz$

1. Calculer les puissances apparente active et réactive
2. Sachant que l'induit compte 372 conducteurs et flux sous un pôle est de $0.027 Wb$ Calculer le coefficient de Kapp en admettant que E est égale à la tension sur une phase à la sortie de l'alternateur

Solution EX 02:

1) les puissances apparente active et réactive:

$$\bullet S=\sqrt{3} \times UI=\sqrt{3} \times 660 \times 500$$

$$S=571,57676 \text{ KVA}$$

$$\bullet P=\sqrt{3} \times UI \times \cos\phi = S \cos\phi = 457,2614 \text{ KW}$$

2) le coefficient de Kapp

$$\bullet E=K\phi nF \quad n=372/3=124$$

$$\bullet K=e/\phi n f \quad E=660/\sqrt{3}=381 \text{ V}$$

$$\bullet K=381/(124 \times 50 \times 0.027) = 2,27$$

Exercice 3 :

Un alternateur triphasés étoile fournit un courant de **400 A** sous une tension composée de **420 v** et avec un facteur de puissance **de 0.9** (charge inductive). La résistance mesurée entre phases du stator est **R=0.03** et l'ensemble des pertes constantes et par effet joule au rotor est **P= 6KW**

- ✓ Calculer la Puissances utile de l'alternateur et son rendement
- ✓ Pour la même excitation on a relevé : **Eve =510 v** (entre phases) et **Icc =300A**

Exercice de la machine synchrone

- ✓ Calcule la réactance interne (**R** est ici négligée) et détermine la f.é.m. (E_{ve}) entre phases qui correspond à un débit de **400 A** sous **420 V** de tension composée

Solution EX 03:

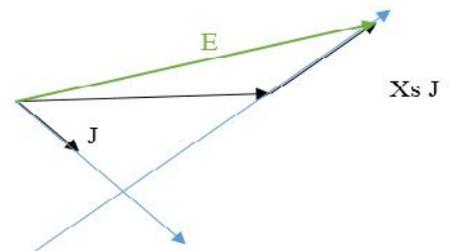
1) - la puissance utile P_u :

$$P_u = \sqrt{3} U I \cos \varphi = \sqrt{3} 420 \times 400 \times 0.9 = 261886 \text{ w}$$

$P_u = 261886 \text{ w}$

$$\begin{aligned} \frac{P_u}{P_a} &= \frac{P_u}{(P_u + \Delta P_c + \Delta P_s)} = \frac{261886}{261886 + 600 + \left(\frac{3}{2} \times 0.03 \times 400\right)} \\ &= 0.95 = 95\% \end{aligned}$$

$$2) X_s = \sqrt{\left[\left(\frac{E_{ve}}{\sqrt{3} I_{ex}}\right)^2 - r_s^2\right]} = \sqrt{\left(\frac{510}{\sqrt{3} \times 300}\right)^2} = 0.98$$



$$E_x = V \cos \varphi \quad E_x = 420 / \sqrt{3} \times 0.9 = 218. \text{v}$$

$$E_y = V \sin \varphi + X_s J \quad E_y = 420 / \sqrt{3} \times 0.43 + 0.98 \times 400 = 496.2 \text{ v}$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 542 \text{ v}$$

$E = 542 \text{ v}$

Exercice de la machine synchrone

Exercice 4 :

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 bores)

E (V)	0	40	80	120	160	200	240	260
I _e (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 $\cos\phi = 0.5$. l'intensité du courant d'excitations étant réglée à la valeur $I_e = 0.9 \text{ A}$. estimer la tension entre phases en justifiant votre estimation.
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.
 - a) donner le schéma du montage.
 - b) calculer les indications des wattmètres.

Exercice de la machine synchrone

Solution EX 04:

1/ Nombre des pôles du rotor :

$$\text{On a : } p = \frac{60 \times f}{N} = \frac{60 \times 50}{1500} = \frac{3000}{1500} = 2$$

Nombre des pôles = $2 \times p = 2 \times 2 = 4$ pôles

2/ l'intensité efficace du courant nominal que peut débiter l'alternateur :

$$S_n = \sqrt{3} U_n \times I_n \longrightarrow I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 220} = 8.4 \text{ A}$$

$$I_n = 8.4 \text{ A}$$

3/ la réactance synchrone X_s de l'alternateur :

$$X_s = \sqrt{\left(\frac{E_{cc}}{\sqrt{3} I_{cc}}\right)^2 - R_s^2} = \sqrt{\left(\frac{E_{cc}}{\sqrt{3} I_{cc}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{160}{8 \times \sqrt{3}}\right)^2} = 11.54$$

4/ .estimer la tension entre phases en justifiant vot

On a :

$$E_x = V \cdot \cos$$

$$E_y = V \cdot \sin + X_s \cdot j$$

$$E^2 = (V \cdot \cos)^2 + (V \cdot \sin + X_s \cdot j)^2$$

$$E^2 = V^2 + (X_s \cdot j)^2 + 2 \cdot X_s \cdot j \cdot \sin \cdot V$$

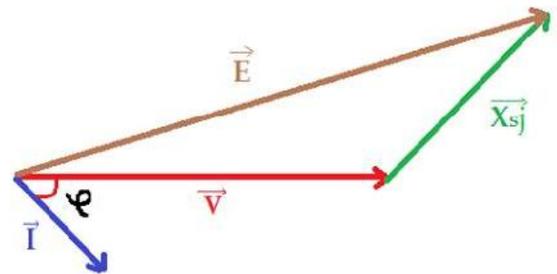


diagramme de Behn-Eschenburg

AN :

$$V^2 + 2 \times 11.54 \times 8.4 \times \sin(60) \times V + (11.54 \times 8.4)^2 - (260/\sqrt{3})^2 = 0$$

$$V^2 + 167.89 V - 13136.424 = 0$$

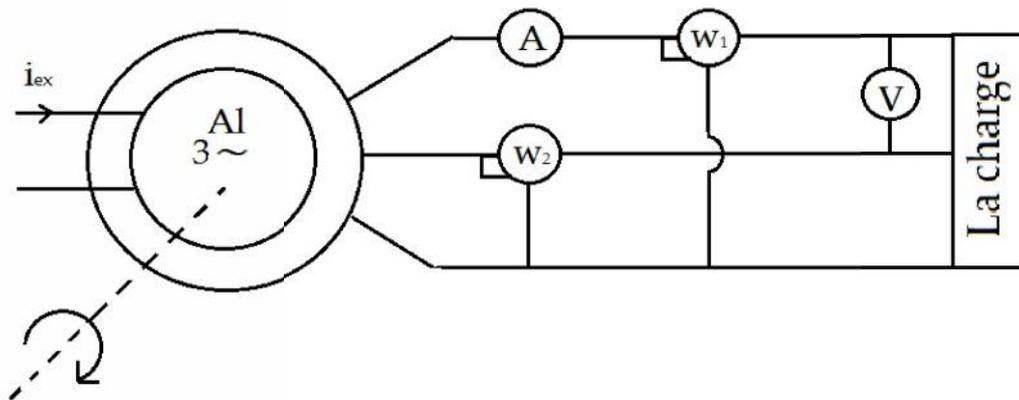
$$= 284$$

Exercice de la machine synchrone

$$V = (-167.89 + 284) / 2 = 58.12$$

$$\Rightarrow U = 58.12 \times 3 = 100.7 \text{ V}$$

5-a- Schéma équivalent :



b- Les puissance :

$$p_1 = \sqrt{3} U \times I \cos \varphi = \sqrt{3} \cos \varphi \times 8.4 \times 100.7 = 732.36 \text{ W}$$

$$p_2 = \sqrt{3} \cos (90) \times 8.4 \times 100.7 = 0 \text{ W}$$

Exercice de la machine synchrone

Exercice 5 :

Un alternateur à **12 pole** dont les enroulements sont couplés en étoile a une résistance d'inducteur de **$r=3$** et une résistance d'induit de **$R=0.1$**

On relevé, à vide, à **1000tr/min**, la tension entre phases suivante:

I(A)	0.5	0.75	1	1.3	1.5	1.8	2	2.3	2.5	3
Ev(V)	6.2	10.2	11	13.7	15.1	17.2	18.2	18.8	19.3	20

I étant le courant d'excitation. Au cours d'un essai en court-circuit, à

1000tr/min, on relevé: **$I_{cc}=16$ A Pour $i = 1$ A**

A) Fonctionnement au ralenti à 1000 tr/min, $I=20$ A et $\cos = 1$:

1) Calculer la fréquence de la tension ainsi que la réactance synchrone par phase. En déduire l'inductance synchrone par phase, supposée constante (alternateur non saturé).

2) Calculer le courant d'excitation pour la tension entre phases soit de **10.4V**

3) Calculer le rendement si l'on sait que pour cette excitation et à cette vitesse, les pertes mécaniques sont égales à **15 W** et les pertes fer à **30 W**.

B) Fonctionnement au régime nominal à 9000 tr/min avec $I=20$ et

$\cos = 1$:

1) Calculer la nouvelle fréquence de la tension et le nouveau courant d'excitation pour que la tension entre phases soit de **10.4V**.

2) Quelle serait, à cette vitesse, la tension entre phase de l'alternateur, si on fonctionnait avec l'excitation trouvée en A1.

Exercice de la machine synchrone

Solution EX 05:

✓ La fréquence :

$$f = p \times N / 60$$

$$f = 1000 \times 6 / 60 = 100 \text{ Hz}$$

✓ La réactance synchrone X_s

Dans l'essai de court circuit:

$$I_{cc} = 16 \text{ A}, \quad v = 0, \quad E_{cc} = 11 \text{ V}$$

Donc à la partie de schéma

$$E_{cc} = R \cdot I_{cc} + jX_s \cdot I_{cc}$$

$$E_{cc} = Z \cdot I_{cc} \quad \rightarrow \quad z = E_{cc} / I_{cc}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_s^2}$$

$$= E_{cc} / I_{cc}$$

$$X_s = \sqrt{(E_{cc} / I_{cc})^2 - R^2}$$

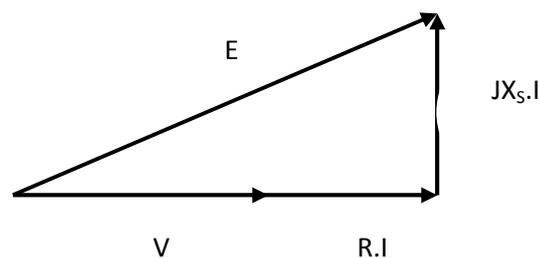
$$X_s = 0.680$$

L'inductance synchrone:

$$X_s = L \omega \quad L = X_s / \omega = 0.68 / 2 \pi \cdot f$$

$$L = 1.08 \text{ mH}$$

La courant d'excitation: pour $V = 10.4 \text{ V}$



$$E^2 = (V + r_s)^2 + (X_s)^2$$

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

$$E = 18.4$$

Exercice de la machine synchrone

$$E_{cc}=11\text{V} \longrightarrow i_{ex}=1$$

$$E'=18.4 \longrightarrow i_{ex}=?$$

$$i_{ex}=(E' \cdot i_{ex\ cc})/E_{cc} = (1 \cdot 18.4)/11 = 1.67$$

$$i_{ex}=1.67\text{A}$$

✓ le rendement

$$=P_U/P_a = P_U/(P_U+P_{js}+P_{jr}+P_C)$$

P_{js} =pertes joule de l'induit

P_{jr} =pertes joule de l'inducteur

P_C =pertes mécanique+pertes fer

$$= (3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi) / (3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi + 3R \cdot I^2 + r \cdot I_e^2 + P_C)$$

$$= (3 \cdot 10,4 \cdot 20 \cdot 1) / [(3 \cdot 10,4 \cdot 20 \cdot 1) + (3 \cdot 0,1 \cdot 20^2) + (3 \cdot 1,67^2) + 15 + 30]$$

$$= 0,68 = 68\%$$

✓ nouvelle fréquence:

$$f = (P \cdot N) / 60 = 900\text{Hz}$$

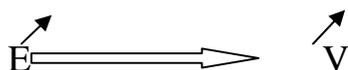
$$E = K \cdot i_{ex} \cdot \omega$$

$$K = E / (i_{ex} \cdot \omega) = E / (i_{ex} \cdot \omega')$$

$$\longrightarrow i'_{ex} = (i_{ex} \cdot \omega) / \omega' = (1,67 \cdot 2 \cdot 100) / (2 \cdot 90)$$

$$i'_{ex} = 0,18\text{A}$$

dans cette vitesse et courant d'excitation $i=1\text{A}$ La tension entre phases élève



Exercice 6 :

On admet que la réactance synchrone d'un alternateur triphasé, **tétra- polaire**, est égale à **49h** et qu'elle est constante. Les enroulements statoriques sont couplés en **étoile**.

A la fréquence de rotation nominale, dans sa zone utile, la caractéristique à vide $E_V(i_e)$ est assimilable à une droite passant par l'origine et le point $I_{ex} = 20 \text{ A} ; E_V = 15 \text{ kV}$ (I_{ex} : intensité du courant d'excitation ; E_V : tension efficace mesurée entre deux bornes).

La résistance de l'induit est négligeable.

1. Quelle est la fréquence de rotation de la roue polaire si la fréquence du courant débité par l'induit est égale à **50 Hz**?
2. L'alternateur débite dans une charge triphasé résistive. Les tensions entre phases sont équilibrées et chacune d'elles est égale à **10 kV**. La f.é.m. synchrone E_e par phase a pour valeur efficace **6,35 kV**.
 - a. Calculer l'intensité efficace du courant en ligne.
 - b. Quelle est la puissance utile de l'alternateur?
3. Dans un autre essai l'alternateur fournit une puissance de **1,0 MW**. Les tensions entre phases sont équilibrées et chacune d'elles est encore égale à **10 kV**. L'intensité du courant dans une phase est déphasé de $f/4$ en retard par rapport à la tension aux bornes de cette phase .
 - a. Quelle est la f.é.m. synchrone de l'alternateur?
 - b. Déterminer l'intensité du courant d'excitation.
4. Calculer le rendement de la machine pour les conditions de fonctionnement de la question 3, sachant que la puissance de l'excitation est égale à **1,0 kW** et que la puissance fournie par le moteur d'entraînement est de **20 kW** quand l'alternateur tourne à vide.

Exercice de la machine synchrone

Solution EX 06:

1-La vitesse de rotation de la roue polaire est :

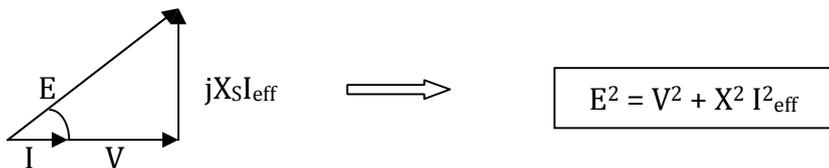
$$N = 60 \cdot f / p = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ tr/min} \longrightarrow \boxed{N = 1500 \text{ tr/min}}$$

2-L'alternateur débite dans une charge résistive

a)Le courant débité par l'alternateur est :

$$\text{charge résistive : } \cos \theta = 1 . V = 10 \text{ KV} \implies V_{\text{eff}} = V / \sqrt{3} = 5.77 \text{ KV}$$

diagramme :



$$\implies I_{\text{eff}} = \sqrt{E^2 - V^2} / X_s = \sqrt{6.35^2 + 5.77^2} / 49 = 54 \text{ A} \rightarrow \boxed{I_{\text{eff}} = 54 \text{ A}}$$

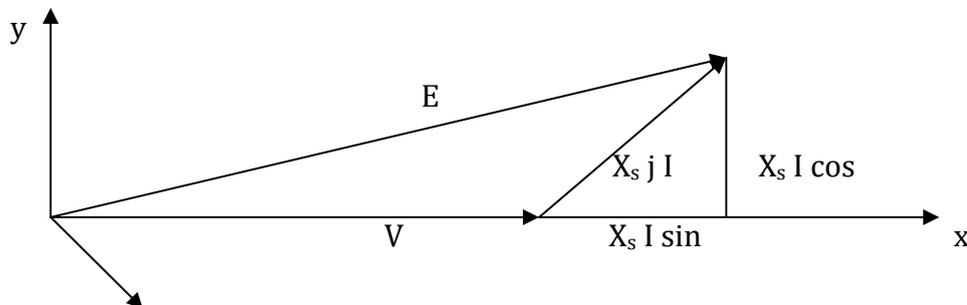
b)La puissance utile de l'alternateur est :

$$P = \sqrt{3} V \cdot I = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 54 = 935.3 \text{ KW} \longrightarrow \boxed{P = 935.3 \text{ KW}}$$

3-L'alternateur débite dans une charge à inductive

a)La f.e.m synchrone de l'alternateur est :

diagramme :



$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta \implies I = \frac{P}{V \cdot \cos \theta \cdot \sqrt{3}} = \frac{1000}{0.7 \cdot 10 \cdot \sqrt{3}} = 82.48 \text{ A}$$

Exercice de la machine synchrone

$$\begin{cases} E_x = V + I * X_s * \sin = 10000/\sqrt{3} + 0.7*82.48*49 = 8602.56 \text{ v} \\ E_y = I * X_s * \cos = 0.7*82.48*49 = 2829 \text{ v} \end{cases}$$

$$\Rightarrow E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{8602.56^2 + 2829^2} = 9055.2 \text{ v}$$

$$\Rightarrow \boxed{E = 9055.2 \text{ v}}$$

b) Le courant d'excitation est :

$$\begin{cases} E = 15 \text{ kv} \longrightarrow I_e = 20 \text{ A} \\ E = 9055.2 \longrightarrow I_e = ? \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_e = \frac{E * I_e}{E} = \frac{9055.2 * 20}{15000} = 12 \text{ A}$$

$$\Rightarrow \boxed{I_e = 12 \text{ A}}$$

4- Le rendement de l'alternateur est :

$$\eta = \frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3} = \frac{1000}{1000 + 20 + 1} = 0.9794$$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = 97.94 \%}$$

Exercice de la machine synchrone

Exercice 7 :

Un alternateur triphasé dont les enroulements sont couplés en étoile fournit, en charge normale, un courant d'intensité $I = 186,8 \text{ A}$, lorsque la charge est inductive ($\cos \phi = 0,6$). La résistance d'un enroulement du stator est $r = 0,2 \ \Omega$.

La fréquence de rotation est de 250 tr/min et la fréquence du courant est de 50 Hz . L'ensemble des pertes dites constantes et par effet Joule dans le rotor est de 30 W . Lors d'un essai à vide, on relève le tableau de mesures suivant :

$E_v(\text{V})$	0	510	1020	1530	2040	2550	3060	3570	4080	4590
$I(\text{A})$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90

E_v est la valeur efficace de la f.é.m. par phase, i est l'intensité du courant d'excitation.

Un essai en court-circuit a donné : $I_{cc} = 2000 \text{ A}$ pour $i = 40 \text{ A}$

- 1) Quel est le nombre de pôles du rotor ?
- 2) Calculer la réactance synchrone d'un enroulement du stator (elle sera supposée constante dans le reste du problème).
- 3) Le flux maximal sous un pôle étant de $19,9 \text{ mWb}$, le nombre de conducteurs actifs par phase étant de 1620 , et $i = 60 \text{ A}$, calculer le coefficient de KAPP.
- 4) En utilisant le diagramme de Behn-Eschenburg, trouver la tension entre deux phases qui est appliquée au récepteur pour $i = 60 \text{ A}$.
- 5) Calculer la puissance utile de l'alternateur, la puissance réactive ainsi que la puissance apparente.
- 6) Calculer les pertes et en déduire le rendement.

Solution EX 07:

1) le nombre de pôles du rotor :

$$P=60 f/N = 60 \times 50 / 250 = 12$$

$$2 \times p = 24$$

2) Calcul la réactance X_s :

$$Z_s^2 = E_{cc} / I_{cc}$$

$$\text{Si } I_e = 40 \text{ A et } E = 2040 / \sqrt{3} = 1177.7 \text{ V} \quad \longrightarrow$$

$$; E_{cc} = 1177.7 \times 2000 / 40 = 58889 \text{ V}$$

$$Z_s = E_{cc} / I_{cc} = 58889 / 2000 = 29.45$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

$$= \sqrt{(29.45^2 - 0.2^2)}$$

$$X_s = 29.44$$

3) le coefficient de KAPP :

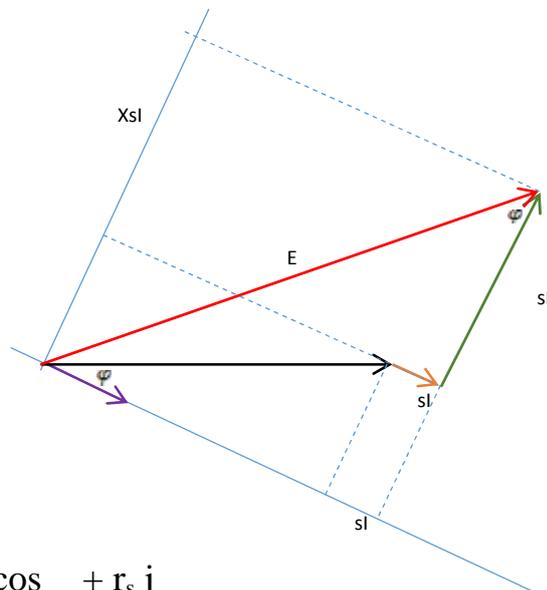
$$E = k \times \phi \times n \times f$$

$$K = E / (\phi \times n \times f) = (3060 / (0.0199 \times 50 \times (1620)))$$

$$K = 1.9$$

Exercice de la machine synchrone

4) la tension entre deux phases pour $i=60A$ en utilisant le diagramme de Behn-Eschenburg :



$$\begin{cases} E_x = V \cos \varphi + r_s i \\ E_y = V \sin \varphi + x_s i \\ E_x = 530 \times 0.6 + (0.3 \times 186.8) = 374.04 \text{ V} \\ E_y = 530 \times 0.8 + (0.59 \times 186.8) = 5923.4 \text{ V} \\ E = \sqrt{(374.04)^2 + (5923.4)^2} = \end{cases}$$

$$U = 5935 \text{ V}$$

5) la puissance utile :

$$P_u = 3 UI \cos \varphi = 3 \times 5499 \times 186.8 \times 0.6 =$$

$$P_u = 1067 \text{ KW}$$

La puissance réactive :

$$Q = 3 UI \sin \varphi = 3 \times 5499 \times 186.8 \times 0.8$$

$$Q = 1423 \text{ KVAR}$$

La puissance apparente :

$$S = 3 \times 5499 \times 186.8$$

$$S = 1779 \text{ KVA}$$

Exercice de la machine synchrone

6) les pertes :

$$P = P_{ab} - P_u$$

$$P_{ab} = p_u + p_{js} + p_{jr} + p_c$$

$$; P_{js} = R_s(I^2) = 0.2 \times 186.6^2 = 6987.8 \text{ W}$$

$$P_{jr} + P_c = 30130 \text{ W}$$

$$P = 37.1 \text{ k W}$$

Le rendement :

$$= P_u / P_{ab} = 1067 / (1067 + 37.1)$$

$$= 95 \%$$

Exercice 8 :

Soit une machine synchrone triphasée à **4 pôles**, supposée parfaitement linéaire (on considère que le circuit magnétique de la machine n' est saturé). La résistance interne sur phase est négligeable. Essai à vide:

$$N = 1500 \text{ tr/min} \quad i = 50 \text{ A} \quad E_v = 3000 \text{ V (tension composée)}$$

Essai en court-circuit: $i_{cc} = 25 \text{ A}$ $I_{cc} = 1000 \text{ A}$. la machine est couplée sur un réseau **3000 V** (entre deux phases)

Déterminer la réactance synchrone X d'une branche étoile équivalente.)

2) Déterminer le courant d'excitation à prévoir pour qu'elle débite **1200 A** sous un $\cos \phi = 0,8$:

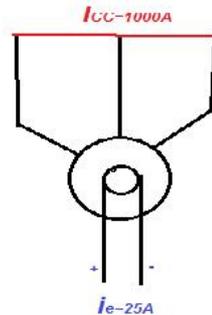
a) avec une charge inductive.

b) avec une charge capacitive.

Solution EX 08:

1- la réactance synchrone:

En c.c



$$0 = r_s J \quad E = r_s J + j X_s J$$

$$E^2 = (X_s J)^2 \Rightarrow E^2 = X_s^2 J^2$$

$$\Rightarrow X_s = \frac{E}{J} = \frac{3000}{3/1000} = 1,73$$

2- la courant d'excitation :

a)- avec une charge inductive ($\cos \phi = 0 \Rightarrow \phi = 90^\circ$)



$$E = V + r_s J + j X_s J$$

$$E = V + X_s J$$

$$E = 3000 + 1,73 \cdot 1200$$

$$E = 5100 \text{ v}$$

$$i_{ex} = \frac{E}{k \cdot \omega} = \frac{5100}{3} / \left(\frac{3}{5} \cdot 100 \right) = 49,07 \text{ A}$$

$$N = 60 f / p \Rightarrow f = N \cdot p / 60$$

$$f = 1500 \cdot 2 / 60 = 50 \text{ Hz}$$

$$E = k \cdot i_{ex} \cdot \omega$$

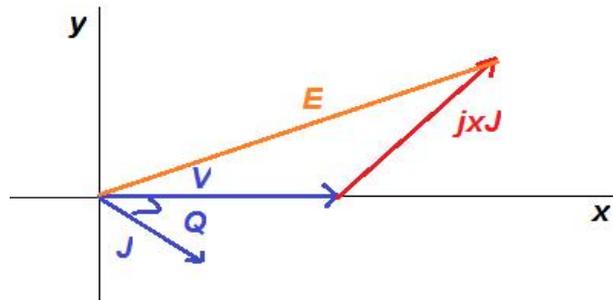
$$K = E / i_{ex} \cdot \omega$$

$$K = 3000 / (50 \cdot 2 \cdot 50)$$

$$K = 3/5$$

Exercice de la machine synchrone

b)- avec une charge capacitive:



$$i=1200A \quad \cos \phi = 0.8$$

$$E=V+R_s J+jX_s J$$

$$E_y = V+X_s j \sin \phi$$

$$E = 3000+1.73*1200*0.6$$

$$E=4245,6v$$

$$i_{ex} = E/K * W + 4245,6 / (3/5 * 100) = 70,76 A$$

Exercice 9 :

Un alternateur triphasé dont les enroulements du stator sont couplés en étoile fournit, en charge nominale, un courant d'intensité $I = 200$ A sous une tension efficace entre phases $U = 5000$ V lorsque la charge est inductive ($\cos \phi = 0,87$). La résistance d'un enroulement du stator est $r = 0,02 \Omega$. La fréquence du courant est 50 Hz, la fréquence de rotation est 250 tr/min. L'ensemble des pertes dites "constantes" et par effet Joule dans le rotor est 220 kW.

J (A)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E (V)	0	1050	210	3150	4200	5200	5950	6550	7000	7300	7500

E est la valeur efficace de la f.é.m entre phases et J est l'intensité du courant d'excitation.

Un essai en court-circuit a donné, pour un courant d'excitation d'intensité $J = 40$ A, un courant dans les enroulements du stator d'intensité $I = 2500$ A.

Exercice de la machine synchrone

- 1) Quel est le nombre de pôles du rotor ?
- 2) Calculer la réactance synchrone d'un enroulement du stator (elle sera supposée constante dans le reste du problème).
- 3) Le flux maximum sous un pôle étant de 0,025 Wb, le coefficient de Kapp valant 2,08 et le nombre de conducteurs actifs par phase est 1620, calculer la f.é.m entre phases.
- 4) En utilisant le diagramme à réactance synchrone, retrouver cette f.é.m entre phases.
- Quelle est alors l'intensité du courant d'excitation ?
- 5) Calculer la puissance nominale de l'alternateur et son rendement.

Solution EX 09:

1) Le nombre de pôles du rotor

$$p = \frac{60f}{N_s} \rightarrow p = \frac{60 \times 50}{250} = 12 \rightarrow \boxed{24 \text{ pôles}}$$

2) Réactance synchrone d'un enroulement

Depuis le tableau la fém qui correspond au courant d'excitation $I_e=40A$

$$\text{est } E_e = \frac{4200}{\sqrt{3}} = 2424.87V$$

Essai en court-circuit $V=0$ l'équation de tension sera

$$E = R_s I + j X_s I \rightarrow |E|^2 = (R_s I)^2 + (X_s I)^2$$

$$\begin{aligned} X_s &= \sqrt{-R_s^2 + \frac{E_e^2}{I_{cc}^2}} \rightarrow X_s = \sqrt{-(0.02)^2 + \frac{(2424.87)^2}{2500^2}} \\ &= \sqrt{-0.004 + (0.9408)} = 0.9697\Omega \end{aligned}$$

$$\boxed{X_s = 0.97\Omega}$$

Exercice de la machine synchrone

3) Fém entre phases

$$E = K_{app} \cdot N \cdot f \cdot \phi_m$$

$$E_{simple} = 2.08 \times 1620 \times 50 \times 0.025 = 4212 \text{ V}$$

$$E_{composé} = \sqrt{3} \times 4212 \text{ V}$$

$$\boxed{E_{composé} = 7295.4 \text{ V}}$$

F.é.m entre phases depuis le diagramme

$$E = (V \cos \varphi + R_s I) + j(V \sin \varphi + X_s I)$$

$$E^2 = (V \cos \varphi + R_s I)^2 + (V \sin \varphi + X_s I)^2$$

$$E^2 = (2886.75 \times 0.87 + 0.02 \times 200)^2 + (0.97 \times 200 + 2886.75 \times 0.493)^2$$

$$E^2 = (2515.4725)^2 + (1617.16775)^2 = 8942833.43$$

$$E_{simple} = \sqrt{8942833.43} = 2990.457 \text{ V}$$

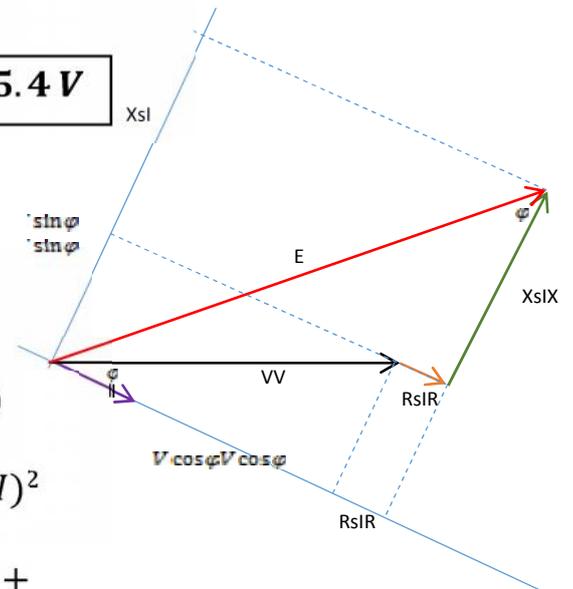
$$E_{composé} = \sqrt{3} \cdot 2990.457 \text{ V}$$

$$\boxed{E_{composé} = 5179.6 \text{ V}}$$

Le courant d'excitation I_e qui correspond à cette tension

$$E_e = \alpha \cdot I_e \rightarrow \alpha = \frac{5200}{50} = 104 \rightarrow E_e = 104 I_e$$

$$I_e = \frac{E_e}{104} = \frac{5179.6}{104} = 49.8 \text{ A} \rightarrow \boxed{I_e = 49.8 \text{ A}}$$



Exercice de la machine synchrone

4) Puissance nominale de l'alternateur

$$P_u = \sqrt{3} \cdot U_n I_n \cos \varphi \quad P_u = \sqrt{3} \times 5000 \times 200 \times 0.87 \\ = 1506884.203 \text{ W}$$

$$P_u = 1.5 \text{ MW}$$

Pertes par effet joule dans les enroulements du stator

$$P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I^2 \rightarrow \Delta P_{js} = 3 \times 0.02 \times 200^2 = 2400 \text{ W} - P_{js} \\ = 2.4 \text{ kW}$$

Le rendement de l'alternateur

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{js} + P_{je}} = \frac{1.5068842 \times 10^6}{1.5068842 \times 10^6 + 2.4 \times 10^3 + 220 \times 10^3} = 0.87$$

$$\eta = 87 \%$$

Exercice 10 :

Une machine synchrone triphasée présente les caractéristiques suivantes
23 kVA, 127/220 V, 50Hz, 1500 tr/min.

La résistance d'un enroulement du stator est **R=0,19 Ω**.

La caractéristique à vide relevée à **1500tr/min** :

E (V)	86,6	160	214	220	234	260	268	278	291
J(A)	1	2	3,5	3,8	4,5	7	8	10	15

La caractéristique en court-circuit donne pour **J_{cc}=6 A** un courant d'induit **I_{cc}=60 A**.

Dans un fonctionnement en alternateur à **1500tr/min** avec une charge triphasée équilibrée purement inductive, on a mesuré
U_d=216,5 V ; I_d=50 A ; J_d=11,5 A.

I- Fonctionnement en alternateur isolé:

- 1) Déterminer les paramètres r et X du modèle de potier (controuvent $r=0,09$ et $X=0,5$ Ω).
- 2) Déterminer le courant d'excitation permettant un débit de **60A** avec **U=220 V** et $\cos \varphi = 0,8$ AR.

Exercice de la machine synchrone

II- Fonctionnement en moteur synchrone:

On néglige pour la suite la résistance R d'un enroulement d'induit de vant la réactance synchrone.

1) Déterminer la réactance synchrone X_s correspondant à une excitation $J=10$

A. On garde cette valeur pour la suite du problème.

2) La machine fonctionne en compensateur synchrone à vide ($P=0$). Déterminer le courant débité par le réseau lorsque l'excitation est réglée à 10 A.

3) Calculer la capacité de l'un des trois condensateurs identiques, qui branchés en triangle sur le même réseau, fournit la même puissance réactive Q .

4) L'excitation reste toujours réglée à 10 A. Le moteur entraîne maintenant un compresseur qui lui oppose un couple résistant $C_r=72$ Nm.

On admet que le rendement du moteur synchrone est de $0,95$;

Déterminer alors le courant absorbé par le moteur.

5) Quelle valeur faudrait-il donner à l'excitation pour que le moteur entraînant le compresseur fournisse la même puissance réactive que dans la question II-3).

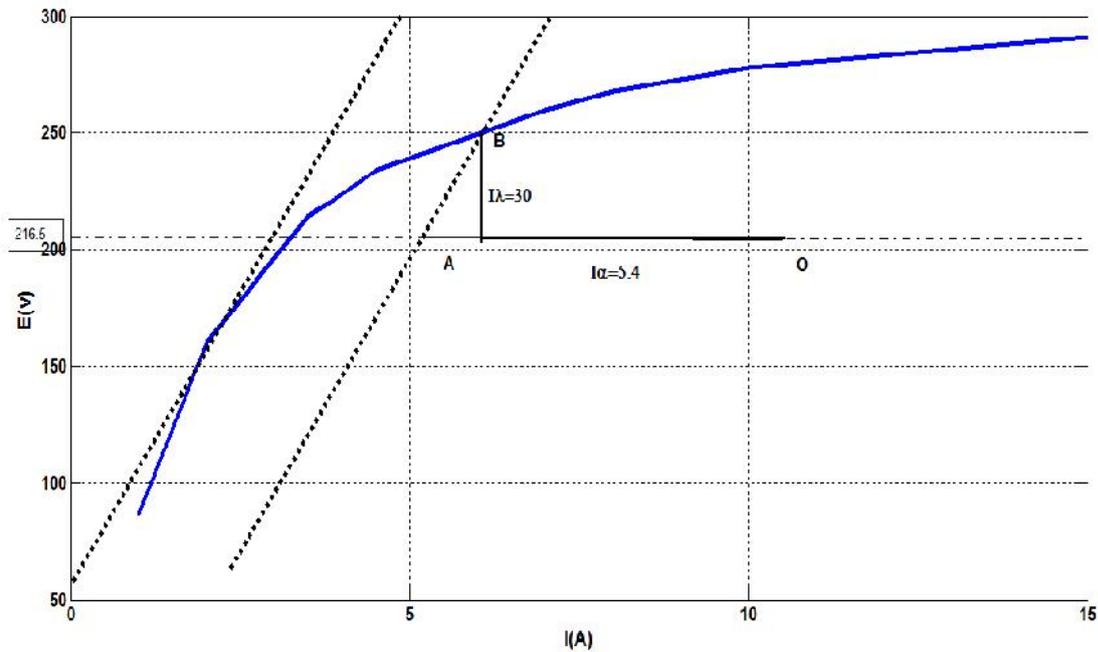
6) Le couple résistant du compresseur augmente de 60% de sa valeur précédente. On règle l'excitation pour que le moteur ne mette en jeu aucune puissance réactive. Déterminer la valeur du courant d'excitation ainsi que le courant débité par le réseau.

Exercice de la machine synchrone

Solution EX 10:

I- Fonctionnement en alternateur isolé:

1) Trouver les paramètres r et λ du modèle de Potier:



• En charge : $U_d=216.5V$; $I_d=50A$; $J_d=11.5A$

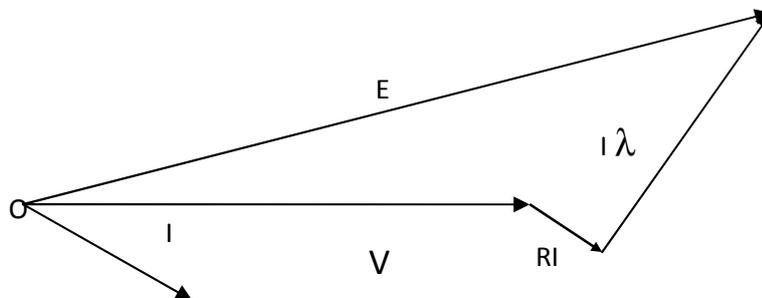
• En court circuit : $J_{cc}=6A$; $I_{cc}=60A$

$$\alpha I = 5.4 \implies \alpha = 5.4/60 = 0.09$$

$$\lambda I = 30V \implies \lambda = 30/60 = 0.5\Omega$$

C: Trouver le courant

d'excitation :



Exercice de la machine synchrone

Pour : $U=220\text{ v}$ $V=127\text{v}$ et $\cos\varphi = 0.8$; $I=60\text{A}$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

$$E_x = V \cdot \cos\varphi + R I = 127 \cdot 0.8 + 0.19 \cdot 60$$

$$E_y = V \cdot \sin\varphi + \lambda I = 127 \cdot 0.6 + 30$$

$$E = \sqrt{113^2 + 106.2^2} = \sqrt{12769 + 11278.44}$$

$$E_s = 155.07\text{v} \quad \Rightarrow \quad E_c = \sqrt{3} \cdot 155.07 = 268.6\text{ v} \quad \Rightarrow \quad I_{ex} = 8\text{ A}$$

II- Fonctionnement en moteur synchrone:

1) Trouver la réactance synchrone x_s :

Pour: $R=0$ $I_{ex}=10\text{A}$

$$E_c = 278\text{V} \quad E_s = \frac{278\text{V}}{\sqrt{3}} = 160.5\text{V}$$

$X_s = ?$

$$E_{cc} = \sqrt{(R_s \cdot I_{cc})^2 + (X_s \cdot I_{cc})^2}$$

$$X_s = \sqrt{\left(\frac{E_{cc}}{I_{cc}}\right)^2 - R_s^2}$$

$$X_s = E_{cc} / I_{cc} = 160.5 / 60 = 2.675\Omega$$

1

2) Trouver le courant débité par le réseau :

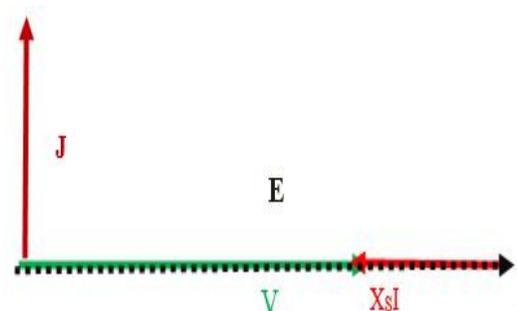
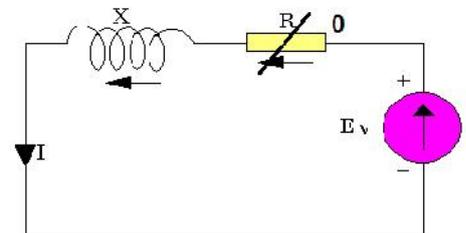
Pour : $P=0$ $P = \sqrt{3} U I \cos\varphi$

$$\cos\varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi = +90^\circ$$

$$I_{ex} = 10\text{A} \quad \Rightarrow \quad E_s = 160.5\text{v}$$

$$V = E + X_s \cdot I$$

$$I = \left| \frac{V - E}{X_s} \right| = \left| \frac{127 - 160.5}{2.675} \right| = 12.5\text{A}$$



Exercice de la machine synchrone

3) Calculer la valeur de capacité de condensateurs :

Pour : $S = \sqrt{P^2 + Q^2} \Rightarrow P=0$

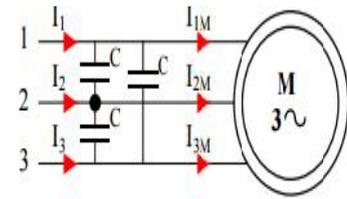
$S = Q = \sqrt{3} U^2 C \omega = 23000 \text{ F} \Rightarrow$

$S = 23000 \text{ VA} \Rightarrow Q = 23000 \text{ VAR}$

$Q = 23000 = \sqrt{3} * (220)^2 C * (2 * 3.14 * 50)$

$$C = \frac{23000}{\sqrt{3} * (220)^2 * 2 * 3.14 * 50}$$

$C = 0.874 * 10^{-3} \text{ F}$



4) Calculer la valeur de courant absorbé par le moteur :

- Pour charge triphasée équilibrée : $C_r = C_u$

- Alors : $C_u = C_r = 72 \text{ Nm} = 0.95$

- $P_u = C_u * N^2 / 60 \Rightarrow$

- $P_u = 72 * 1500^2 * 2 * 3.14 / 60$
 $= 11304 \text{ w}$

- $= P_u / P_{ab}$

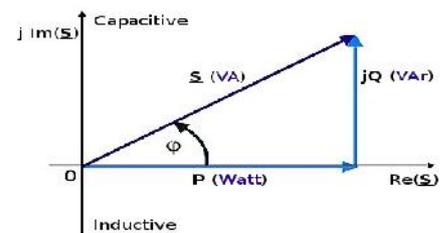
- $P_{ab} = P_u / \eta \Rightarrow P_{ab} = 11304 / 0.95 \quad P_{ab} = 11898.95 \text{ w}$

- $P_{ab} = \sqrt{3} U I \cos \varphi \Rightarrow Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi$

- $S = \sqrt{P_{ab}^2 + Q^2} \Rightarrow S = \sqrt{11898.95^2 + 23000^2} = 25895.65 \text{ VA}$

- $\cos \varphi = P_{ab} / S \cos \varphi = 11898.95 / 25895.65 \quad \cos \varphi = 0.46$

- $I = P_{ab} / \sqrt{3} U \cos \varphi \Rightarrow I = 11898.95 / (\sqrt{3} * 220 * 0.46) = 67.88 \text{ A}$



Exercice de la machine synchrone

5) Calculer la valeur de courant Excitation par le moteur :

- Pour charge capacitive

$$\varphi = 62.6 \quad \Rightarrow \quad \sin\varphi = 0.89$$

$$E_x = V - jX_s I \sin\varphi \quad \Rightarrow \quad = 127 - (2.675 * 67.88 * 0.89)$$

$$E_y = jX_s I \cos\varphi \quad \Rightarrow \quad = 2.675 * 67.88 * 0.46$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{(-34.60531)^2 + (83.52634)^2} = 90.41V$$

$$E_c = 90.41V \quad \Rightarrow \quad E_c = \sqrt{3} * 90.41 = 156.6V \quad \Rightarrow \quad I_{ex} = 1.9A$$

6) Calculer la valeur de courant Excitation par le moteur et courant débité par réseau:

- Pour : $C_r' = C_r + C_r * 60$

$$C_r' = 72 + (72 * 60 / 100) \quad \Rightarrow \quad C_r' = C_u' = 115.2Nm$$

$$P_u' = C_u' * \omega \quad \Rightarrow \quad P_u' = 115.2 * 1500 * 3.14 * 100 / 60$$

- Et : $Q = 0 \Rightarrow \sqrt{3}UI \sin\varphi$

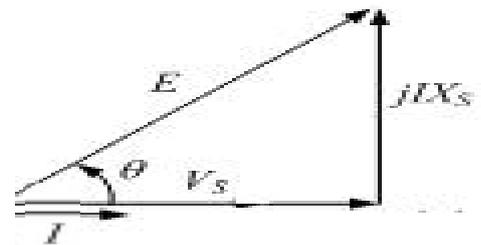
$$\sin\varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \cos\varphi = 1 \quad \Rightarrow \quad S = P_{ab}$$

$$\text{Alors} \quad \Rightarrow \quad P_{ab} = P_u / \cos\varphi \quad \Rightarrow \quad P_{ab} = 18086.4 / 0.95$$

$$P_{ab} = 19038.316w$$

$$P_{ab} = \sqrt{3}UI \cos\varphi \quad \Rightarrow \quad P_{ab} = \sqrt{3}UI$$

$$I = P_{ab} / \sqrt{3}U = 19038.316 / \sqrt{3} * 220 \quad I = 50A$$



$$E = \sqrt{V^2 + (IX_s)^2} = \sqrt{127^2 + (2.675 * 50)^2}$$

$$E_s = 184.44v \quad \Rightarrow \quad E_c = \sqrt{3} * 184.44 = 319.46v \quad I_{ex} = 17A$$

Exercice de la machine synchrone

Exercice 11 :

Un alternateur tétrapolaire (4 poles) triphasé est couplé en étoile ,on néglige sa résistance d'induit la machine est supposée non saturée que la f.e.m enter phase et neutre peut s'écrire $E=k.i_e$ avec k constante , i_e courant d'excitation et pulsation .au fonctionnement nominale $U=380V$ et $i=10A$.

1)caractéristiques de l'alternateur. Pour $n=1500tr/min$ et un courant d'excitation $i_e=1A$,la fem $E= 200V$ pour $n=1500tr/min$ et $i_e=1.5A$ le courant induit de court-circuit $i_{cc}=10A$.calculer la constante k et la réactance synchrone X_s .

2)fonctionnement en charge : l'induit débite sur 3 résistance R idantiques couplées en étoile .la vitesse n est constante et égale a $1500 tr/min$.on désire que l'alternateur débite son courant nominale pour sa tension nominale . calculer le courant d'excitation i_e , la résistance R , et la puissance P fournie par l'alternateur .

Solution EX 11:

1) a) cacule constant K :

D'aparét la relation $E=k.i_e$.

$$E=200V \quad i_e=1A \quad =2. \tau.f \quad f=?$$

D'aparét la relation $n=60 \cdot \frac{f}{p}$ $f = 1500/(60/2)=50 \text{ hz}$ $\omega = 2. \pi \cdot f$.

$$50=100 \cdot \pi \text{ rd/s}$$

$$K = \frac{E}{i_e \cdot \omega} = (200)/(1 \cdot 100 \cdot \pi) = 2/\pi$$

b)calcule la réactance synchrone:

$$E = r_s J + jx_s J + v; (r_s \text{ et négligable}) \quad \text{donc: } E = jx_s J + v$$

$$\text{dant cas court-circuit: } v=0 \quad E_{cc} = jx_s J$$

Exercice de la machine synchrone

donc: $|E_{cc}| = (x_s \cdot J_{cc}) \quad x_s = \frac{E_{cc}}{J_{cc}} \quad ; J_{cc} = 10A \quad E_{cc} = ?$

$i_e = 1A \longrightarrow E = 200V$

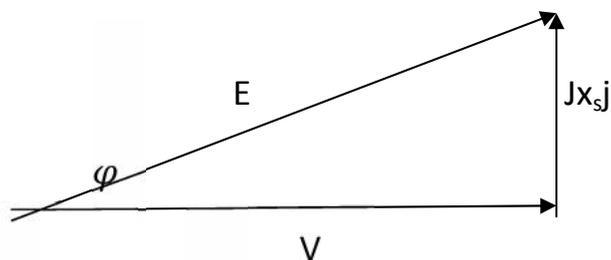
$i_e = 1.5A \longrightarrow E_{cc} = ?$

$E_{cc} = (1.5 \times 200) / (1) = 300V$

$X_s = 300 / 10 = 30$

2) a) calcule $i_e = ?$

calcule f.e.m. charge résistive $\cos \varphi = 1$



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

$X_s = 30\Omega \quad , \quad V = (380 / \sqrt{3}) \quad , \quad J = 10A$

$$E = \sqrt{((380 / \sqrt{3})^2 + (10 \times 30)^2)} = 371.66V$$

Diaprès la relation $E = k \cdot i_e$:

$$i_e = \frac{E}{\omega \times k} = 1.858 = 1.86A$$

b) calcule la résistance **R**:

la tension simple (par phase): $V = (380 / \sqrt{3}) = 219.4V$

$$V = R \times J \longrightarrow R = \frac{V}{J} = 21.9 = 22$$

c) la puissance fournie par l' alternateur:

$$p = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

$$p = \sqrt{3} \times (22 \times 10 \times \sqrt{3}) \times 10 \times 1 \quad p = 6600 \text{ w}$$

Exercice de la machine synchrone

Exercice 12 :

Un alternateur tétrapolaire (4 pôles) triphasé est couplé en étoile. On néglige sa résistance induit. La machine est supposée non saturée de sorte que la fem entre phase et neutre peut s'écrire $E = K.I_e.\omega$ avec K constante, I_e courant d'excitation et ω pulsation. Au fonctionnement nominal $U=380V$ et $I=10A$.

1/ Caractéristiques de l'alternateur. Pour $n = 1500 \text{tr/min}$ et un courant d'excitation $I_e = 1A$, la fem $E = 200V$. Pour $n = 1500 \text{tr/min}$ et $I_e = 1,5A$ le courant induit de court-circuit $I_{cc} = 10A$. Calculer la constante K et la réactance synchrone X_s .

2/ Fonctionnement en charge : l'induit débite sur 3 résistances R identiques couplées en étoile. La vitesse n est constante et égale à 1500tr/min . On désire que l'alternateur débite son courant nominal pour sa tension nominale. Calculer le courant d'excitation I_e , la résistance R , et la puissance P fournie par l'alternateur.

Solution EX 12:

$$1-E = K.I_e.\omega \Rightarrow K = E / I_e.\omega = 200/100.\pi = 2/\pi \quad K=2/\pi$$

$$*- E = Z * I_{cc} \quad \text{en cc } I_e = 1.5A \quad I_{cc} = 10A$$

$$I_e = 1A \Rightarrow \text{FEM} \rightarrow E = 200V$$

$$I_e = 1.5A \Rightarrow \text{FEM} \rightarrow E = ?$$

$$E_{cc} = 200 * 1.5 / 1 = 300V$$

$$E_{cc} = Z * I_{cc} \Rightarrow Z = E_{cc} / I_{cc} = 300 / 10 = 30 \Omega$$

$$Z = (R_s^2 + X_s^2)^{1/2} \Rightarrow Z = X_s = 30 \Omega$$

$$2- I_e = ?$$

$$\cos\phi = 1 \Rightarrow \phi = 0$$

$$E = V + R_s I + j X_s I \Rightarrow E = (V^2 + X_s I^2)^{1/2} \Rightarrow E = ((380 / \sqrt{3})^2 + (30 + 10)^2)^{1/2}$$

$$E = 371V$$

Exercice de la machine synchrone

$$E = K.I_e.\omega \Rightarrow I_e = E / K.\omega = 371 / ((2/\pi) * 100 * \pi) \Rightarrow I_e = 1.86A$$

$$* - R = ? \quad V = R * J \Rightarrow R = V / J = 220 / 10 = 22\Omega$$

$$* - P_U = ? \Rightarrow P_U = \sqrt{3} * 380 * 10 \Rightarrow P_U = 6600w$$

Exercice 13 :

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 50hz. 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 du flux embrassé à vide par une spire, varie linéairement en fonction du courant d'excitation I_e . la courbe représentative de la fonction (I_e) est une portion de droite passant par l'origine et le point de coordonnées : $I_e = 15.4A$; $\Phi = 0.085Wb$.

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 $I_e = 15.4 A$, intensité efficace du courant dans l'induit $I = 150 A$.

- 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 $I_e = 15.4$?
- 3/ Calculer la réactance synchrone X_s de l'alternateur .
- 4/ l'alternateur débite un courant d'intensité $I = 80 A$ dans un charge de nature inductive dont facteur de puissance vaut 0.8 . l'intensité du courant

Exercice de la machine synchrone

d'excitation reste égale à 15.4 . calculer la tension entre bornes de l'alternateur . Quelle est la puissance fournie à la charge ?

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

Solution EX 13:

1/ $P = ?$

$$N = 60f / P \quad P = 60f / N$$

$$= (60.50) / 750$$

$$P = 4 \quad 2P = 8$$

2 / $V_{\text{eff}} = E = ?$

$$E = k \cdot N \cdot \omega \cdot F$$

$$= 2,14 \cdot 160 \cdot 0,085 \cdot 50 \quad \boxed{1455,2 \text{ V}}$$

$$N = 120 \cdot 4 = 480$$

$$N/3 = 480/3 = \boxed{160 \text{ par phase}}$$

$$E_{\text{composé}} = \sqrt{3} \cdot 1455,2 = \boxed{2520,5 \text{ V}}$$

3/ $X_s = ?$

$$E = V + R_s J + j X_s J$$

$$\angle = 90^\circ$$

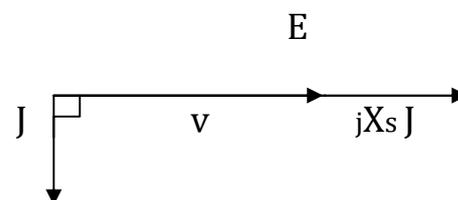
$$E = V + X_s J \quad X_s = (E - V) / J$$

$$= (2520 - 962) / 150$$

$$\boxed{X_s = 10,4}$$

4/

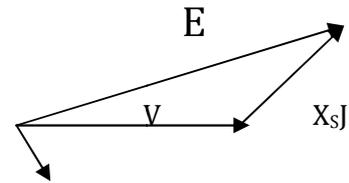
$$E_x = V + X_s J \sin(\delta) \quad E \cos(\delta) = V + X_s J \sin(\delta)$$



Exercice de la machine synchrone

$$V = E \cos(\delta) - X_s J \sin(\delta)$$

$$= 1455,2 \cdot 0,89 - 10,4 \cdot 80 \cdot 0,6$$



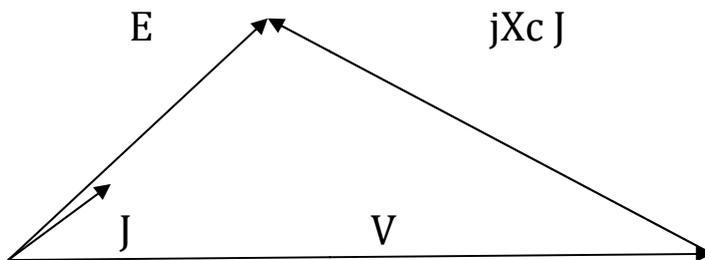
5/ $P_u = ?$

$$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\phi) = \sqrt{3} \cdot 1376,73 \cdot 80 \cdot 0,8$$

$$P_u = 152612,24 \text{ W}$$

$$P_u = 152,612 \text{ KW}$$

❖ Model de bern-Eschenburg.



$$\begin{cases} E_x = V + r_s J \cdot \cos(\delta) - X_s J \sin(\delta) \\ E_y = r_s J \sin(\delta) + X_s J \cos(\delta) \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_x = V - X_s J \sin(\delta) \\ E_y = X_s J \cos(\delta) \end{cases}$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{(V - X_s J \sin(\delta))^2 + (X_s J \cos(\delta))^2}$$

$$E^2 = (V - X_s J \sin(\delta))^2 + (X_s J \cos(\delta))^2$$

$$(V - X_s J \sin(\delta))^2 = E^2 - (X_s J \cos(\delta))^2$$

Exercice de la machine synchrone

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

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

$$V = \sqrt{(1455,2)^2 - (10,4 \cdot 80 \cdot 0,6)^2} + (10,4 \cdot 80 \cdot 0,6)$$

$$V = 1793,25 \cdot (\sqrt{3}) \longrightarrow \boxed{U = 3106,03 \text{ V}}$$

❖ $P_u = ?$

$$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 344307,31 \text{ W} \longrightarrow \boxed{P_u = 344,3 \text{ Kw}}$$

Exercice 14 :

Un alternateur triphasé dont les enroulements du stator sont couplés en étoile, fournit en charge normale, un courant d'intensité efficace $I = 200$ A sous une tension efficace entre phases $U = 5,0$ 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 $n' = 750$ tr/mn. Le courant et la tension ont pour fréquence $f = 50$ 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 (A)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E (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 $i_e = 40$ A, un courant dans les enroulements du stator d'intensité $I_{cc} = 2,5$ kA.

Exercice de la machine synchrone

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.

Solution EX 14:

1/ le nombre de pôles du rotor

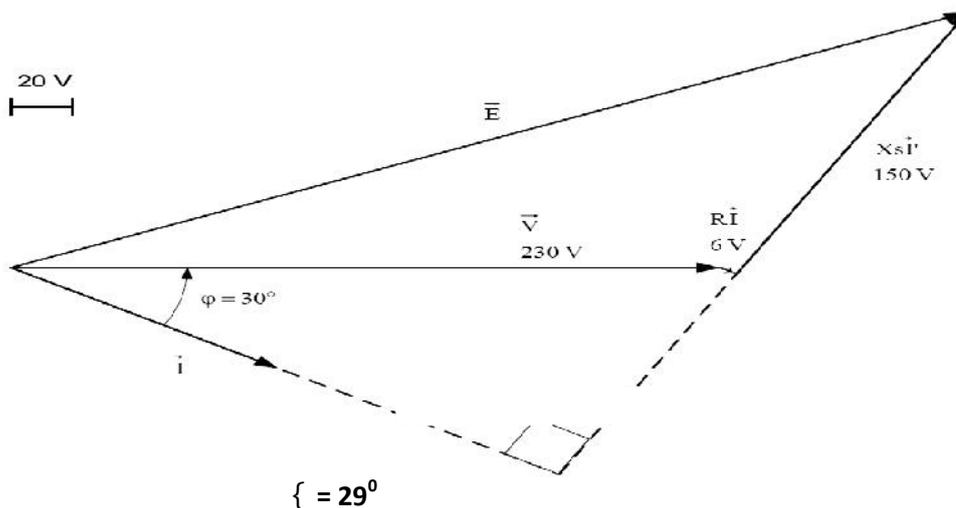
$$N = (60 \cdot f) / p \rightarrow P = (f \cdot 60) / N \quad P = (60 \cdot 50) / 750 = 4 \quad 2P = 8$$

2/ Calcul la réactance X_s

$$E = \sqrt{(r_s j)^2 + (x_s j)^2} \rightarrow (x_s j)^2 = E^2 - (r_s j)^2 \rightarrow x_s j = \sqrt{(E^2 - (r_s j)^2) / j}$$

$$X_s = \sqrt{((E/j)^2 - r_s^2)} \rightarrow x_s = \sqrt{((4200/40)^2 - (0.20)^2)} = 0.95 \Omega \rightarrow X_s = 0.95 \Omega$$

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



$$\cos \phi = 0.87 \quad \sin \phi = 0.49$$

$$\text{couplés en étoile} \quad R = (3/2)r \quad R = 1.5 \cdot 0.2 \quad R = 0.3$$

$$\{E_x = v \cos(\phi) + RI \quad \{E_x = 5000 \cdot 0.87 + 0.3 \cdot 200 \quad \{E_x = 4410 \text{ V}$$

Exercice de la machine synchrone

$$\{E_y = v \sin(\) + x_s I \quad \{E_y = 5000 * 0.49 + 0.95 * 200 \quad \{E_y = 2640 \text{v}$$

$$\{E_{fem} = (E_x^2 + E_y^2) \quad \{E = (4410^2 + 2640^2) = 5227.6 \text{v} \quad E_{fem} = 5227.6 \text{v}$$

4/ Quelle est la puissance nominale de l'alternateur

$$P_u = 3 * u * I * \cos(\) = 0.87 * 3 * 5000 * 200 = 15060.88 \text{w} \quad P_u = 1506.88 \text{w}$$

5/ Déterminer le rendement au point de fonctionnement nominal

$$\eta = P_u / P_{ab}$$

$$P_{ab} = P_u + P_{js} + P_r + P_c$$

$$P_{js} = 3rI^2 = 3 * 0.20 * (200)^2 = 24 \text{kw}$$

$$P_{jr} + P_c = 55 \text{kw}$$

$$P_{ab} = 1506.88 + 24 + 55 = 1585.88 \text{kw}$$

$$P_U = 15060.88 \text{W}$$

$$\eta = 1506.88 / 1585.88 = 0.95$$

$$\eta = 95\%$$

Exercice 15 :

Un alternateur triphasé connecté en étoile fonctionne à tension constante (entre phases) $U = 5000 \text{V}$, 50HZ . On connaît sa caractéristique à vide (rectiligne entre 0 et 3100V).

$i(\text{A})$	0	40	70	100	150	200
$E_v(\text{V})$	0	3100	5000	6200	7000	7500

i : courant d'excitation

E_v : tension à vide entre phase

D'autre part, un essai en court-circuit a donné $I = 1550 \text{A}$ pour $i = 40 \text{A}$.

1) Déterminer par la méthode de Behn-Eschenburg, et en négligeant la chute Ohmique, la valeur à donner au courant d'excitation pour obtenir une tension de 5000V avec un $\cos \phi$ de $0,85$ (charge inductive) pour chacun des courants: 500 ; 1000 ; 1500A .

Exercice de la machine synchrone

2) La résistance entre deux phases du stator étant $R=0,04\Omega$ et celle de l'inducteur $r'=2\Omega$, calculer le rendement correspondant à chaque débit en tenant compte de 200KW de pertes constantes.

Solution EX 15:

1) les valeurs des courants d'excitations pour chaque courant:

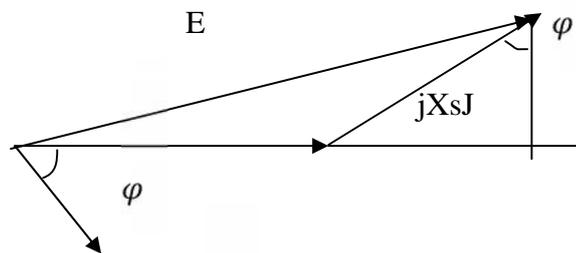
$$40 \text{ A} \longrightarrow 3100 \text{ V}$$

$$40 \text{ A} \longrightarrow E =$$

$$E_{cc} = I_{cc} \cdot Z \implies Z = \frac{E_{cc}}{I_{cc}} = 3100 / 1550 = 2$$

$$E = K \cdot i_{ex} \cdot w \implies K = \frac{E}{i_{ex} \cdot w} = 3100 / (40 \cdot 314) = 0.25$$

$$E = V + R_s J + jX_s J$$



$$E_x = V + JX_s \sin \varphi \quad E_y = X_s \cos \varphi$$

$$E = \sqrt{(E_x^2 + E_y^2)} = \sqrt{((V + JX_s \sin \varphi)^2 + (X_s \cos \varphi)^2)}$$

1-Pour I=500 A

$$E_{x1} = 2886 + (2 \cdot 500 \cdot 0.526) = 3412 \text{ V}$$

$$E_{y1} = 2 \cdot 500 \cdot 0.85 = 850 \text{ V}$$

$$E_1 = \sqrt{(3412^2 + 850^2)} = 3516.3 \text{ V}$$

$$i_{ex1} = E_1 / (K \cdot w) = 3516.3 / (0.25 \cdot 314) = 44.79 \text{ A}$$

$$i_{ex1} = 44.79 \text{ A}$$

Exercice de la machine synchrone

2-Pour I=1000 A

$$E_{x2}=2886+(2*1000*0.526)=3938 \text{ V}$$

$$E_{y2}=2*1000*0.85=1700 \text{ V}$$

$$E_2=4289.27 \text{ V}$$

$$i_{ex2}=4289.27/(0.25*314)=54.64 \text{ A}$$

$$i_{ex2}=54.65 \text{ A}$$

3-Pour I=1500

$$E_{x3}=2886+(2*1500*0.526)=4464 \text{ V}$$

$$E_{y3}=2*1500*0.85=2550 \text{ V}$$

$$E_3=5141 \text{ V}$$

$$I_{ex3}=5141/(0.25*314)=65.5 \text{ A}$$

$$i_{ex3}=65.5 \text{ A}$$

2) les rendements:

1-

$$P_u=3 UI \cos\varphi = 3*5000*500*0.85 = 3680608 \text{ W}$$

$$P_{js}=3/2(r*I^2)=3/2(0.04*500^2)=15000 \text{ W}$$

$$P_{jr}=U_e I_e=5000*44.79=223950 \text{ W}$$

$$P_{ab}=P_u+P_{jT}+P_c=3680608+15000+223950+200000=4119558 \text{ W}$$

$$\eta=P_u/P_{ab}=3680608/4119558=0.893=89.3\%$$

$$\underline{\underline{\eta=89.3\%}}$$

2-

$$P_u=3 UI \cos\varphi = 3*5000*1000*0.85 = 7.36 \text{ MW}$$

$$P_{js}=3/2(r*I^2)=3/2(0.04*1000^2)=60000 \text{ W}$$

$$P_{jr}=U_e I_e=5000*54.65=273250 \text{ W}$$

$$P_{ab}=P_u+P_{jT}+P_c=7360000+60000+273250+200000=7893250 \text{ W}$$

$$\eta=P_u/P_{ab}=7360000/7893250=0.9324=93.24\%$$

$$\underline{\underline{\eta=93.24\%}}$$

Exercice de la machine synchrone

3-

$$P_u = 3 UI \cos \varphi = 3 * 5000 * 1500 * 0.85 = 11 \text{ MW}$$

$$P_{j_s} = 3/2(r * I^2) = 3/2(0.04 * 1500^2) = 135000 \text{ W}$$

$$P_{j_r} = U_e I_e = 5000 * 65.5 = 327500 \text{ W}$$

$$P_{ab} = P_u + P_{j_T} + P_c = 11000000 + 327500 + 135000 + 200000 = 11662500 \text{ W}$$

$$\eta = P_u / P_{ab} = 11000000 / 11662500 = 0.943 = 94.3\%$$

$$\underline{\underline{\eta = 94.3\%}}$$

Exercice 16:

Les essais à vide et en court-circuit d'un alternateur triphasé étoile à 24 pôles ont donné les résultats suivants:

i(A)	0	40	70	100	150	180
EV (v)	0	1800	2900	3500	4000	4100

E est la valeur efficace de la force électromotrice à vide entre deux bornes de phase, i est l'intensité du courant d'excitation.

Pour $i=150\text{A}$, l'intensité du courant d'induit de court-circuit est $I_{CC}=2650\text{A}$. la résistance d'induit est négligeable.

- 1) Calculer la fréquence de rotation du rotor ($f=50\text{Hz}$).
- 2) Calculer l'impédance interne de l'enroulement d'une phase.
- 3) pour un courant d'excitation $i=150\text{A}$, et une charge inductive équilibrée de facteur de puissance $\cos(\varphi)=0.87$, déterminer graphiquement la tension U entre deux bornes de phase pour les intensités suivantes du courant : 2000A , 1500A , 1000A , 500A .
tracer la caractéristique externe de l'alternateur.

Exercice de la machine synchrone

Solution EX 16:

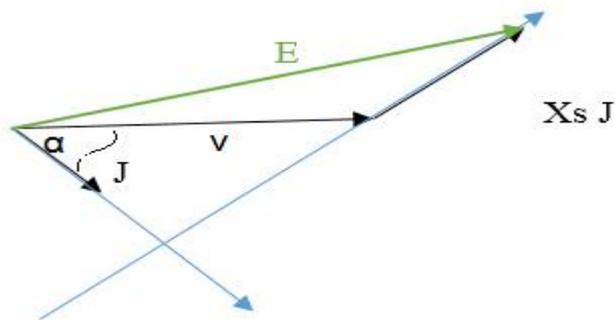
$$1) N = \frac{60 \times f}{p}$$

$$P = \frac{24}{2} = 12 \text{ pôle}$$

$$N = \frac{60 \times 50}{12} = 250 \text{ tr/min}$$

$$2) E = \sqrt{3} I_{cc} \times Z \quad Z = \frac{E}{\sqrt{3} I_{cc}} = \frac{400}{2650 \sqrt{3}} = 0.87$$

$$3) U = ?$$



$$E_x = v \cos(\alpha) = v \times 0.87.$$

$$E_y = v \sin(\alpha) + J \cos(\alpha) = v \times 0.49 + 2000 \times 0.87$$

$$E^2 = (v \cos(\alpha))^2 + (v \sin(\alpha) + J \cos(\alpha))^2$$

$$\left(\frac{4000}{\sqrt{3}}\right)^2 = (v \cdot 0.87)^2 + (v \cdot 0.49 + 1740)^2$$

$$5.33 \times 10^6 = v^2 \cdot 0.75 + v^2 \cdot 0.24 + 3.02 \times 10^6 + v \cdot 1750.2$$

$$5.33 \times 10^6 - 3.02 \times 10^6 = v^2 \cdot 0.99 + v \cdot 1750.2$$

$$v^2 \cdot 0.99 + v \cdot 1750.2 - 2.31 \times 10^6$$

$$\bar{\quad} = 34 + 2.07$$

$$V1 = 892.35v$$

$$N = V \sqrt{3} = 892.35 \sqrt{3} = 1545.6v$$

Exercice 17 :

SUR MACHINE SYNCHRONE (ALTERNATEUR TRIPHASEE)

Un alternateur triphasé dont les enroulements sont couplés en étoile fournit, en charge normale, un courant d'intensité $I = 186,8$ A, lorsque la charge est inductive ($\cos=0,6$). La résistance d'un enroulement du stator est $r = 0,2 \Omega$. La fréquence de rotation est de 250 tr/min et la fréquence du courant est de 50 Hz. L'ensemble des pertes dites constantes et par effet Joule dans le rotor est de 30 130 W. Lors d'un essai à vide, on relève le tableau de mesures suivant :

E_v (V)	0	510	1020	1530	2040	2550	3060	3570	4080	4590
i (A)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90

E_v est la valeur efficace de la f.é.m. par phase, i est l'intensité du courant d'excitation.

Un essai en court-circuit a donné : $I_{cc} = 2000$ A pour $i = 40$ A

- 1) Quel est le nombre de pôles du rotor ?
- 2) Calculer la réactance synchrone d'un enroulement du stator (elle sera supposée constante dans le reste du problème).
- 3) Le flux maximal sous un pôle étant de 19,9 mWb, le nombre de conducteurs actifs par phase étant de 1620, et $i = 60$ A, calculer le coefficient de KAPP.
- 4) En utilisant le diagramme de Behn-Eschenburg, trouver la tension entre deux phases qui est appliquée au récepteur pour $i = 60$ A.
- 5) Calculer la puissance utile de l'alternateur, la puissance réactive ainsi que la puissance apparente.
- 6) Calculer les pertes et en déduire le rendement.

Exercice de la machine synchrone

Solution EX 17:

-1) le nombre de pôles du rotor :

$$N = (60 * f) / p$$

$$P = (60 * f) / N$$

$$P = (60 * 50) / 250 \quad P = 12 \quad 2 p = 24$$

-2) la réactance synchrone d'un enroulement du stator :

$$Z = E / I_{cc}$$

$$Z = 2040 / 2000 = 1,02$$

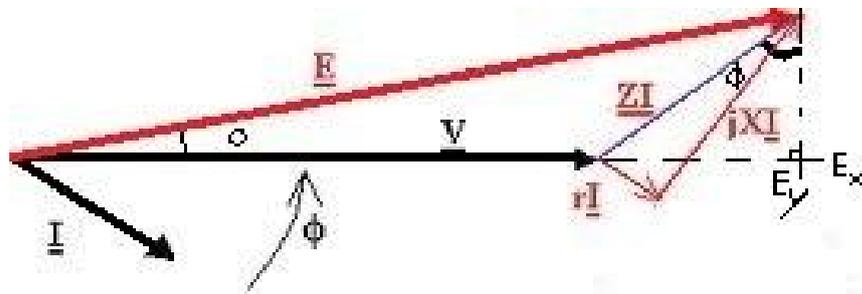
$$X_s = (Z^2 - R^2) = (1,02^2 - 0,2^2) \quad X_s = 1,00019$$

-3) le coefficient de KAPP :

$$E = K * N * f * \phi \quad K = E / (n * f * \phi)$$

$$K = 3060 / (24 * 19 * 10^{-3} * 1620 * 50) \quad K = 0.08$$

-4) le diagramme de Behn-Eschenburg :



-la tension entre deux phases :

$$E = V + (Z * I)$$

$$E_x = V + (Z * I) * \sin$$

$$\sin O = (Z * I) / E = (1,02 * 186,6) / 3060 = 0.06$$

$$E * \cos O = V + (Z * I) * \sin$$

$$V = E * \cos O - (Z * I) * \sin$$

Exercice de la machine synchrone

$$V = (3060 * 0.998) - (1,02 * 186,6) * 0.8 = 2877,1 \text{ v}$$

-5)

- la puissance utile :

$$P_u = 3 v * i * \cos$$

$$P_u = 3 * 2877,1 * 186,6 * 0.6 = 557935,07 \text{ w}$$

- la puissance réactive :

$$Q = 3 v * i * \sin$$

$$Q = 3 * 2877,1 * 186,6 * 0.8 = 743904.5 \text{ VAR}$$

- la puissance apparente :

$$S = (P^2 + Q^2)^{1/2} = 3 v * i = 929884,6 \text{ VA}$$

-6) les pertes :

$$P_{\text{joule stator}} = 3 * r * I^2 = 3 * 0,2 * (186,6)^2 = 20891,736 \text{ w}$$

le rendement n :

$$n = p_u / p_{ab}$$

$$n = 557935,07 / (557935,07 + 20891,736 + 30130)$$

$$n = 0.916 = 92 \%$$

Machine ASYNCHRONE



Moteur asynchrone triphasé

1. Constitution et principe de fonctionnement

Stator

Il est constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paires de pôles.

Champ tournant

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme :

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

n_s : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en trs.s^{-1} .

f : pulsation des courants alternatifs en rad.s^{-1} . $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

p : nombre de paires de pôles.

Rotor

Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il est constitué d'une masse métallique dont de l'aluminium pour l'alléger. On parle souvent de rotor à cage d'écureuil. On dit aussi qu'il est en court-circuit.

Il tourne à la vitesse de rotation $n < n_s$

Entrefer

L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.

Glissement

Le rotor tourne à la vitesse n plus petite que la vitesse de synchronisme n_s .

On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant.

Ce glissement g va dépendre de la charge.

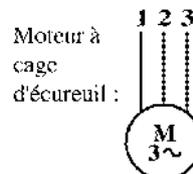
$$g = \frac{n_s - n}{n_s}$$

n_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr.s^{-1}).

n : vitesse de rotation du rotor (tr.s^{-1}).

$\Omega_s = 2\pi n_s$ (rad.s^{-1}) et $\Omega = 2\pi n$ (rad.s^{-1})

Symboles



2. Caractéristiques

2.1. Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

Conséquence : le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

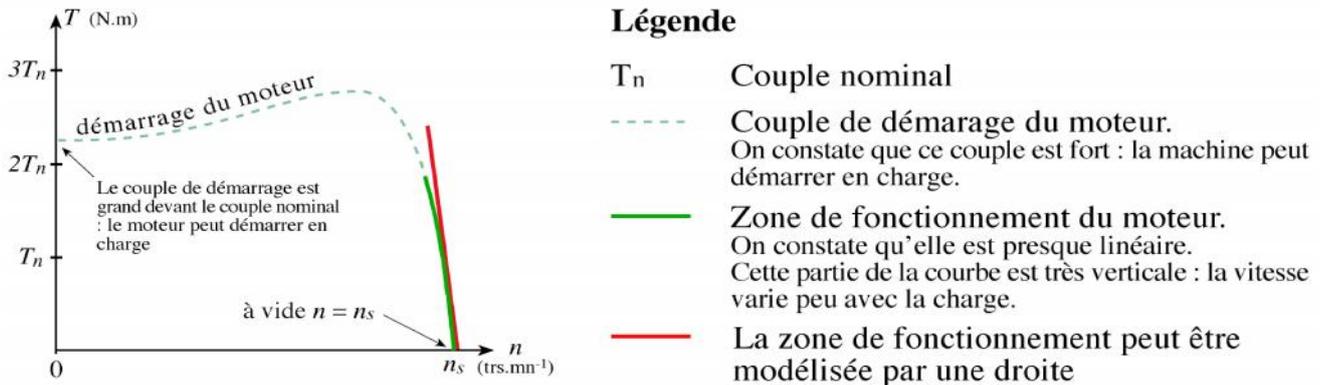
A vide : $g = 0$ et donc $n_0 = n_s$

2.2. Fonctionnement en charge

Le moteur fournit maintenant de la puissance active, le stator appelle un **courant actif**.

Remarque : le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge.

2.3. Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$



2.4. Modélisation de la partie utile de la courbe

On veut déterminer l'équation de la droite qui modélise la partie utile de la caractéristique mécanique.

Il faut deux points :

- 1^{er} point évident : $A_1(n_s; 0)$

- 2^e point : il faut un essai de la machine $A_2(n_2; T_2)$

Equation d'une droite : $y = ax + b$ soit $T_u = a.n + b$

Coefficient directeur (pente) : $a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ soit $a = \frac{T_2 - 0}{n_2 - n_s}$

$|a|$ est grand (droite presque verticale) et a est négatif.

Ordonnée à l'origine : point A_1 $0 = a.n_s + b$ soit $b = -a.n_s$

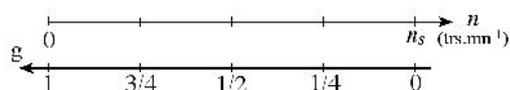
On peut écrire : $T_u = a(n - n_s)$

Remarque : le point A_2 peut aussi être fourni par les informations figurant sur la plaque signalétique de la machine (couple nominal T_n et vitesse nominale n_n).

2.5. Caractéristique mécanique en fonction du glissement

Changement d'axe

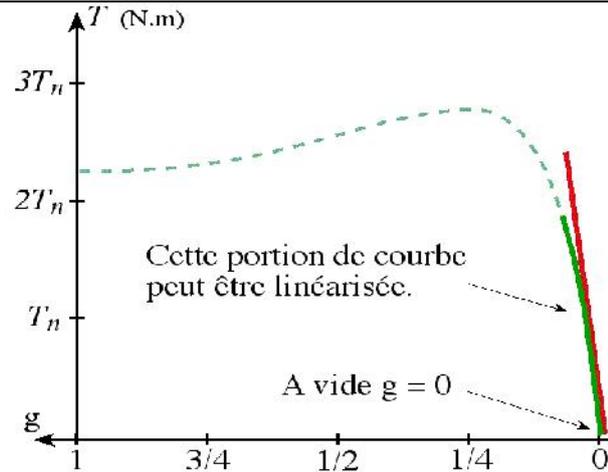
L'axe en n et l'axe en g sont inversés.



D'où la même caractéristique avec l'axe en g .
 Cette fois-ci le modèle est une droite passant par l'origine, donc d'équation :

Le machine asynchrone

$y = k.x$ soit $T_u = k.g$



Finalement :

Au voisinage du point de fonctionnement nominal, le couple utile est proportionnel au glissement.

$T_u = k.g$ k est une constante de proportionnalité (coefficient directeur) en N.m.

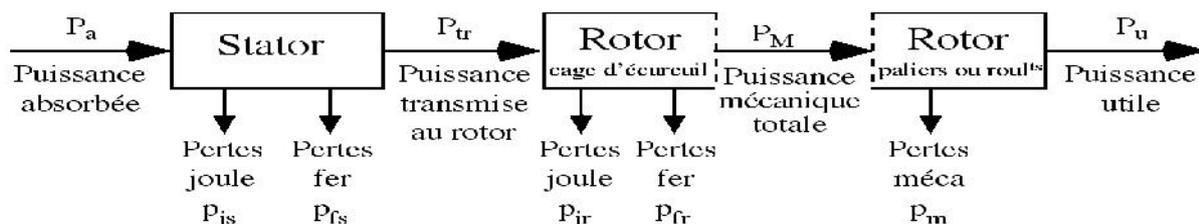
2.6. Résumé des caractéristiques

- A vide, le courant est non négligeable, mais la puissance absorbée est surtout réactive (Q) ;
- le couple et le courant de démarrage sont importants ;
- l'intensité du courant absorbée augmente avec le glissement ;
- la machine asynchrone peut démarrer en charge.

On retiendra que :

- la vitesse du champ tournant est : $n_s = \frac{f}{p}$ (f la fréquence du courant et p le nombre de paires de pôles) ;
- le glissement représente la différence de vitesse entre le champ et le rotor : $g = \frac{n_s - n}{n_s}$;
- à vide $g = 0$ et $n_0 = n_s$;
- quelle que soit la charge la vitesse de rotation varie très peu ($n \approx n_s$) ;
- en fonctionnement nominal le moment du couple utile est proportionnel au glissement $T_u = k.g$

3. Bilan des puissances



Le machine asynchrone

Puissance électrique absorbée	$P_a = \sqrt{3}UI \cos \phi$	U : tension entre deux bornes du moteur I : courant en ligne
Pertes par effet joule au stator	$p_{js} = \frac{3}{2} RI^2$	R : résistance entre deux bornes du stator
Puissance transmise : P_{tr}	$P_{tr} = P_a - p_{js} - p_{fs}$	C'est la puissance que reçoit le rotor.
Moment du couple électromagnétique : T_{em}	<p>Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_S : elles glissent sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse Ω. L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment T_{em}.</p> <p>$T_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_S}$ T_{em} (N.m) ; P_{tr} (W) ; Ω_S (rad.s⁻¹)</p>	
Puissance mécanique totale : P_M	<p>Le couple électromagnétique de moment T_{em} entraîne le rotor à la vitesse Ω. Il lui communique donc la puissance mécanique totale P_M.</p> <p>$P_M = T_{em}\Omega$ soit $P_M = T_{em}\Omega = P_{tr} \frac{\Omega}{\Omega_S} = P_{tr}(1-g)$</p> <p>$P_M = P_{tr}(1-g)$ Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.</p>	
Pertes fer au rotor : p_{fr}	Ces pertes sont négligeables	
Pertes joules au rotor	<p>$p_{jr} + p_{fr} = P_{tr} - P_M = P_{tr} - P_{tr}(1-g) = gP_{tr}$</p> <p>$p_{jr} \approx gP_{tr}$ Les pertes fer du rotor sont négligeables.</p>	
Pertes collectives : p_c	<p>$p_c = p_{fs} + p_m$</p> <p>Ces pertes ne dépendent que de U, f et n. Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.</p>	
Couple de perte :	$T_p = \frac{p_c}{\Omega_S}$	Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine
Autres :	$P_u = P_M - p_m \quad ; \quad T_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad ; \quad \gamma = \frac{P_u}{P_a}$	
Bilan complet :	$P_a = P_u + p_{js} + p_{jr} + p_c$	
Bilan des puissances à vide		
A vide :	<p>$T_u = 0 \Rightarrow P_u = 0$ et $g = 0 \Rightarrow p_{jr} = 0$</p> <p>$P_{a0} = \sqrt{3}UI_0 \cos \phi_0$ et $p_{js0} = \frac{3}{2} RI_0^2 \approx 0$ (car I_0 est faible)</p> <p>p_c à vide $\approx p_c$ en charge</p>	
Bilan à vide :	$P_{a0} \approx p_c$	Un essai à vide permettra de déterminer les pertes collectives.

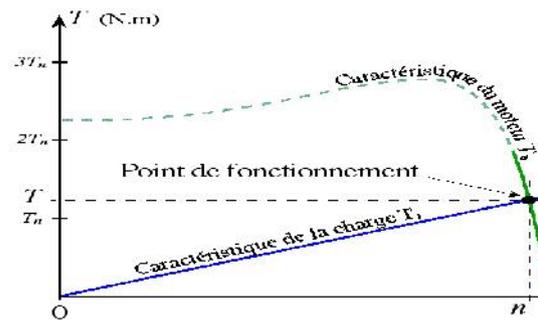
4. Point de fonctionnement du moteur en charge

C'est le point d'intersection des caractéristiques $T = f(n)$ du moteur et de la charge.

T_u : couple utile du moteur

T_r : couple résistant de la charge

La courbe du couple résistant dépend de la charge.



Méthode de résolution graphique

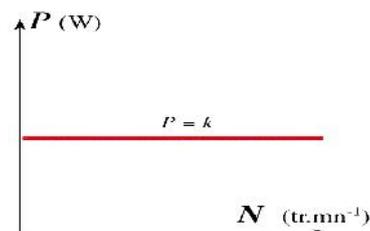
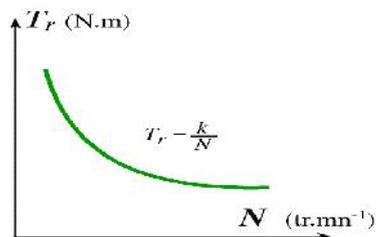
Tracer à l'échelle sur du papier millimétré les deux caractéristiques et relever les coordonnées du point d'intersection.

Méthode de résolution par le calcul

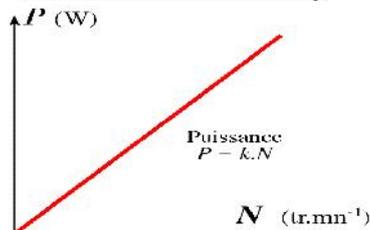
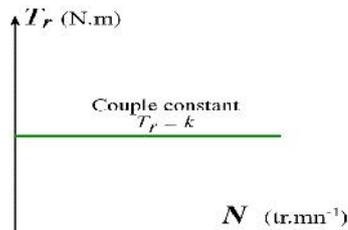
Il faut résoudre : $T_u = T_r$

5. Complément : caractéristiques $T_r=f(n)$ de quelques charges

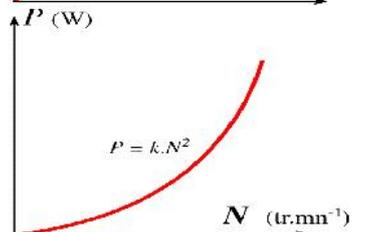
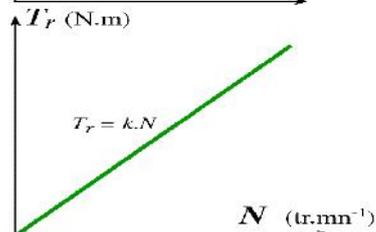
Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)



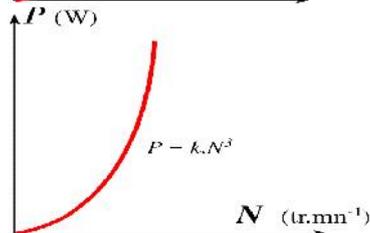
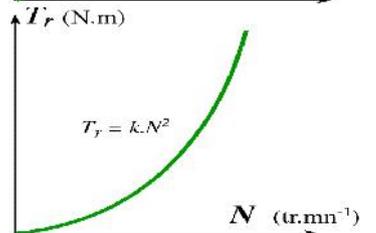
Machine à couple constant (levage, pompe)



Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe volumétrique, mélangeur)



Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur)



MOTEURS ASYNCHRONES
EXERCICES

Exercice 1 :

Soit un moteur asynchrone triphasé dont la fréquence de rotation est de 2870 tr/mn
P=1,8kw IP45 réseau 50Hz

- a- Quel est le nombre de pôles ?
- b- Quelle est la fréquence de rotation du champ tournant ?
- c- Calculer le glissement
- d- Donner la signification de IP45 (voir doc.)
- e- Quelle est l'intensité nominale absorbée par ce moteur
- f- Calculer le couple disponible en sortie.

Solution EX 01:

Soit un moteur asynchrone triphasé dont la fréquence de rotation est de 2870 tr/mn
P=1,8kw IP45 réseau 50Hz

- a- Quel est le nombre de pôles ? **Nb de pôles = 2 (et P=1 = 1 paire de pôles)**
- b- Quelle est la fréquence de rotation du champ tournant ?
 $n = 60 \cdot f / p = 60 \cdot 50 / 1 = 3000 \text{tr/mn (50hz)}$
- c- Calculer le glissement **$g = (n - n') / n = (3000 - 2870) / 3000 = 0,043$**
- d- Donner la signification de IP45 (voir doc.)
4 :Protégé contre corps solide >1mm
5 :protégé contre jet d'eau dans toutes directions
- e- Quelle est l'intensité nominale absorbée par ce moteur (voir doc. Leroy Somer) **$I_n = 3,6A$ (pour le LS90L 1,8kw)**
- f- Calculer le couple disponible en sortie

$C = P / h = 1,8 \cdot 10^3 / (2 \cdot a \cdot 2870 / 60) = 6N.m$

Exercice 02 :

Calculer la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone 4 pôles, $g=5\%$

Solution EX 02:

Calculer la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone 4 pôles, $g=5\%$

4 pôles $\Rightarrow p=2 \rightarrow n=60*f/p = 60*50/2 = 1500 \text{ tr/mn}$

(=25Hz fréquence du champ tournant)

$g= 5\% \Rightarrow n' = n(1 - 0,05) = 1425\text{tr/mn}$

Exercice 03 :

On donne $P_u = 2,2 \text{ kw}$ (puissance utile ou nominale)

$$\cos(\varphi) = 0.89$$

$$U = 400\text{V}$$

$$\eta = 0,82$$

calculer I_n (intensité nominale absorbée)

Solution EX 03:

On donne $P_u = 2,2 \text{ kw}$ (puissance utile ou nominale)

$$\cos(\varphi) = 0.89$$

$$U = 400\text{V}$$

$$\eta = 0,82$$

calculer I_n (intensité nominale absorbée)

$$P_a = P_u/\eta = UI \sqrt{3} \cos(\varphi) , \text{ d'où } I_n = P_u / (\eta * U * \sqrt{3} * \cos(\varphi)) = 2,2.10^3$$

$$/(0,82*400*\sqrt{3}*0,89) = 4,35\text{A}$$

Exercice 04 :

Donner la puissance nominale, la fréquence de rotation, le courant nominal, le $\cos(\varphi)$ et le rendement du moteur LS90S 4 pôles (Voir doc Leroy Somer)

Exprimer I_n en fonction de P_u , η , U , et $\cos(\varphi)$. Retrouver par calcul la valeur de I_n donnée dans la documentation.

Solution EX 04:

Donner la puissance nominale, la fréquence de rotation, le courant nominal, le $\cos(\varphi)$ et le rendement du moteur 4 pôles (Voir doc Leroy Somer)

Exprimer I_n en fonction de P_u , η , U , et $\cos(\varphi)$. Retrouver par calcul la valeur de I_n donnée dans la documentation.

$$P_n = 1,1 \text{ kW} \quad 1415 \text{ tr/mn} \quad I_n = 2,7 \text{ A} \quad \cos(\varphi) = 0,79 \quad \eta = 75\%$$

$$I_n = P_u / (\eta * U * \sqrt{3} * \cos(\varphi)) = 2.67 \text{ A}$$

Exercice 05 :

Calculer le rendement et le couple d'un moteur dont les caractéristiques sont :

$$P_n = 0,37 \text{ kW} \quad N_n = 2820 \text{ tr/mn} \quad I_n = 0,95 \text{ A} \quad \cos(\varphi) = 0,83 \quad U = 400 \text{ V}$$

Solution EX 05:

Calculer le rendement et le couple d'un moteur dont les caractéristiques sont :

$$P_n = 0,37 \text{ kW} \quad N_n = 2820 \text{ tr/mn} \quad I_n = 0,95 \text{ A} \quad \cos(\varphi) = 0,83 \quad U = 400 \text{ V}$$

$$P_{abs} = U I_n * \sqrt{3} * \cos(\varphi) = 400 * 0,95 * \sqrt{3} * 0,83 = 546 \text{ W} \quad (0,546 \text{ kW})$$

$$\text{rendement} : \eta = P_n / P_a = 0,37 / 0,546 = 0,67 = 67\%$$

$$\text{Couple} : \Gamma = P_n / \Omega = 0,37 * 10^3 / (2 * \pi * 2820 / 60) = 1,25 \text{ Nm}$$

Exercice 06 :

Soit un moteur asynchrone :

220V 50Hz – 6,5A – n=1440 t/min - cos φ = 0,84

La résistance mesurée entre deux phases du stator vaut r=2,25 ohms.

Les pertes dans le fer du stator valent : p_{fst}=90w

Les pertes mécaniques sont estimées à p_{méc}=50w

Calculer :

- ❖ les pertes par effet joule dans le rotor
- ❖ Les pertes par effet joule dans le stator
- ❖ le couple utile
- ❖ le rendement

Solution EX 06:

$$p_{jst} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 = 3 \cdot \left(\frac{R_s}{2}\right) I_s^2 = 3 \cdot \left(\frac{2,25}{2}\right) \cdot 6,5^2 = 142,594w$$

$$p_{jr} = g \cdot P_t$$

$$P_t = P_{ab} - p_{jst} - p_{fst} = 2080,5394 - 142,594 - 90 = 1847,945w$$

$$P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_s \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 6,5 \cdot 0,84 = 2080,5394w$$

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04$$

$$p_{jr} = g \cdot P_t = 0,04 \cdot 1847,945 = 73,9178w$$

$$P_{ut} = P_t - p_{jr} - p_{méc} = 1847,945 - 73,9178 - 50 = 1724w$$

$$C_{ut} = \frac{P_{ut}}{2 \cdot f \cdot n_r} = \frac{1724}{2 \cdot f \cdot \left(\frac{1440}{60}\right)} = 11,4328Nm$$

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{ab}} = \frac{1724}{2080} = 0,8286$$

Exercice 06 :

Soit un moteur asynchrone triphasé 380V 50Hz absorbe un courant de 15A avec un $\cos \phi = 0,86$; son glissement est de 4%. Sa vitesse de rotation étant de 1425 t/min.

Nous ne tiendrons compte que des pertes par effet joule dans le stator.

Calculer le nombre de pôles

La puissance absorbée

Le glissement

Les pertes par effet joule dans le rotor

Le rendement

Solution EX 06:

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

$$P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_s \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 15 \cdot 0,8 = 7898 \text{ W}$$

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0,05$$

$$p_{jr} = g \cdot P = 0,05 \cdot 7898 = 394,9 \text{ W}$$

$$y = \frac{(1-g) \cdot P_{ab}}{P_{ab}} = \frac{(1-0,05) \cdot 7898}{7898} = 0,95$$

Exercice 07 :

MOTEUR ASYNCHRO .

Un moteur asynchrone à rotor bobiné et à bagues est alimenté par un réseau triphasé 50Hz, 220V/380V. Le couplage de l'enroulement stator est en triangle, celui du rotor est en étoile. En mesurant à chaud la résistance entre 2 bornes on trouve au stator $R_s = 0,267 \Omega$ et au rotor $R_r = 0,1 \Omega$ Un essai à vide a été effectué sur cette machine. Le moteur tourne pratiquement à la vitesse de synchronisme ($N = 1500$ tr/min). La méthode des 2 wattmètres indique:

$$P_1 = 2200 \text{ W} \quad P_2 = - 700 \text{ W} \quad I_0 (\text{courant de ligne}) = 20 \text{ A.}$$

Un essai en charge est effectué à l'aide d'une charge mécanique, les courants absorbés étant alors équilibrés. On a les résultats suivants:

$$N' = 1450 \text{ tr/min} \quad P_1 = 14481 \text{ W} \quad P_2 = 5519 \text{ W}$$
$$I = 38,5 \text{ A.}$$

Sachant que les pertes mécaniques sont constantes et égales à 700 W:

- 1) Calculer les pertes Joule au stator lors de cet essai à vide de 2 façons différentes. En déduire les pertes fer au stator P_{fs} (que l'on supposera constante dans la suite du problème).
- 2) Calculer les puissances active et réactive totales absorbées par le moteur. En déduire le facteur de puissance lorsqu'on charge le moteur.
- 3) Calculer la fréquence des courants rotoriques. Que peut-on dire sur les pertes fer au rotor (P_{fr} ?)
- 4) Faire un bilan de puissance et calculer les pertes Joule au stator et la puissance transmise. En déduire les pertes Joule rotor P_{jr} . Calculer la valeur efficace des courants rotoriques de 2 façons différentes.
- 5) Calculer la puissance utile P_u et le rendement du moteur lors de cet essai.
- 6) Calculer le couple utile T_u et le couple électromagnétique T .

Solution EX 07:

1) Pertes Joules et pertes fer au stator

Pertes Joule au stator à vide (P_{js0})

Quelque soit le couplage les pertes Joule au stator sont données par

$$P_{js0} = (3/2)R_s I_0^2 = 160,2 \text{ W}$$

Elles peuvent aussi être calculée à partir du courant dans les enroulements du stator. Ce dernier étant couplé en triangle les spires sont parcourues par un courant de valeur efficace

$$J_0 = \frac{I_0}{\sqrt{3}} = 11,55 \text{ A}$$

et la résistance par phase est de

$$R' = (3/2)R = 0,4\Omega$$

Les pertes Joule dans ces enroulements sont alors

$$P_{js0} = 3R'J_0^2 = 160,1 \text{ W}$$

Pertes fer (P_{fs})

A vide, la puissance utile (P_u) est nulle. Les pertes Joule au rotor (P_{jr}) sont proportionnelles au glissement. Celui ci étant peu différent de zéro à vide les pertes Joule au rotor sont négligeable. La puissance absorbée par le moteur se décompose alors en

$$P_0 = P_m + P_{fs} + P_{js0}$$

où P_m représente les pertes mécaniques.

Par ailleurs, la méthode des deux wattmètres nous donne

$$P_0 = P_1 + P_2 = 1500 \text{ W}$$

d'où

$$P_{fs} = P_0 - P_{js0} - P_m = 639,8 \text{ W}$$

2) Puissances active et réactive - facteur de puissance

Toujours en exploitant les résultats donnés par la méthode des deux wattmètres

$$\begin{aligned}P &= P_1 + P_2 = 20 \text{ kW} \\Q &= \sqrt{3}(P_1 - P_2) = 15,523 \text{ kVAR} \\S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = 25,317 \text{ kVA}\end{aligned}$$

et le facteur de puissance

$$\cos \phi = P / S = 0,79$$

3) Fréquence au rotor, pertes fer au rotor

Le glissement en charge est de

$$g = (N - N') / N = 0,033$$

La fréquence des courants au rotor est donc

$$f_r = g f_s = 1,66 \text{ Hz}$$

Les pertes fer sont une fonction croissante de la tension et de la fréquence. Pour un moteur asynchrone, les enroulements du rotor sont en court circuit et, comme nous venons de le calculer, la fréquence est très faible. Les pertes fer au rotor seront par conséquent négligeables.

4) Bilan de puissance en charge

La puissance utile est:

$$P_u = P - P_{js} - P_{fs} - P_{jr} + P_m = (1 - g) (P_{abs} - P_{js} - P_{fs}) = (1 - g) P_{tr} - P_m$$

P_u : puissance utile

P_{jr} : pertes Joule au rotor en charge

P_{js} : pertes Joule au stator en charge

P_{tr} : puissance transmise

Connaissant le courant absorbé en charge, on obtient les pertes Joule au stator en charge

$$P_{js} = (3/2) R_s I^2 = 593,6 \text{ W}$$

Le machine asynchrone

Les pertes fer au stator étant constantes, la puissance transmise est

$$P_{tr} = P - P_{js} - P_{fs} = 18,766 \text{ kW}$$

On en déduit les pertes Joule au rotor

$$P_{jr} = gP_{tr} = 619,3 \text{ W}$$

Le couplage des enroulements rotor étant en étoile on peut écrire

$$P_{jr} = 3R_r J^2 \quad \text{ou} \quad P_{jr} = (3/2)R_r J^2$$

où J désigne la valeur efficace du courant au rotor et R la résistance mesurée sur une phase. Pour un couplage étoile on a $R_r = 2R$

d'où

$$J = \sqrt{\frac{2P_{jr}}{3R_r}} = 64,2 \text{ A}$$

5) Puissance utile et rendement en charge

la puissance utile

$$P_u = (1 - g) P_{tr} - P_m = 17,441 \text{ kW}$$

et le rendement

$$n = P_u / P = 0,91$$

la puissance utile

5) Couples utile et électromagnétique

Connaissant les puissance utile et transmise on en déduit les couples correspondant

Couple utile

$$T_u = P_u / 2.N' = 114,9 \text{ Nm}$$

Couple électromagnétique

$$T = P_{tr} / 2.N = 119,5 \text{ Nm}$$