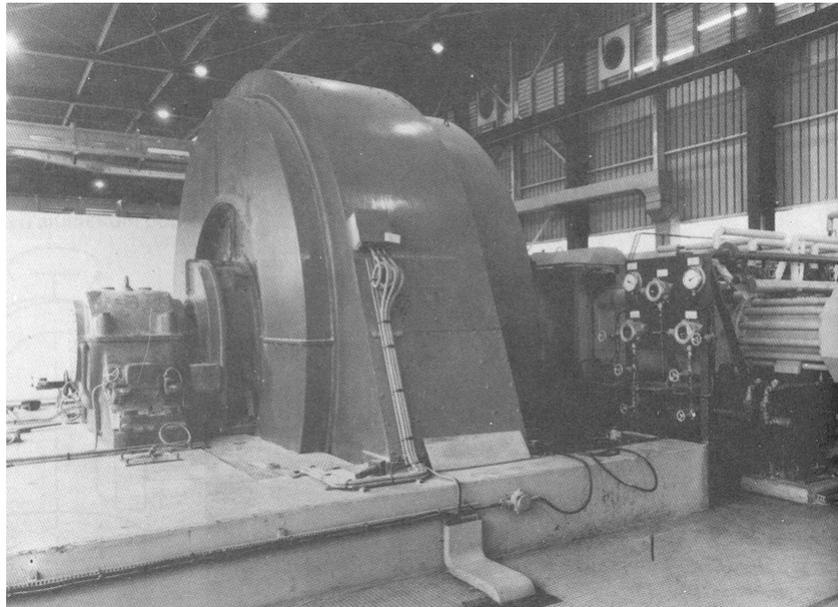


Cours d'électrotechnique

MACHINE TOURNANTE A COURANT ALTERNATIF

LES MACHINES SYNCHRONES



PARTIE N°3 :

LE MOTEUR

TABLE DES MATIERES

1.	Principe de fonctionnement	2
1.1.	Principe de base	2
1.2.	Création du couple	2
1.3.	Génération d'un couple utilisable	2
1.4.	Conclusion	3
2.	Diagramme des inductions	4
3.	Les chutes de tension en charge.....	5
3.1.	La résistance.....	5
3.2.	le circuit magnétique	5
3.3.	La FEM d'auto induction	5
3.4.	La FCEM	6
3.5.	La réaction d'induit	6
4.	La vitesse de rotation	7
5.	Etude du moteur	9
5.1.	Schéma de câblage	9
5.2.	La courbe en vé	9
5.2.1.	Mode opératoire.....	9
5.2.2.	Courbe	10
5.2.3.	Explication physique	10
5.3.	La courbe en cloche	13
5.3.1.	Mode opératoire.....	13
5.3.2.	Courbe	13
5.3.3.	Explication physique	14
5.4.	La courbe de vitesse	15
5.4.1.	Mode opératoire.....	15
5.4.2.	Courbe	15
5.4.3.	Explication physique	16
6.	Bilan énergétique.....	17
6.1.	La puissance absorbée.....	17
6.2.	Les pertes constantes.....	17
6.3.	Les pertes par effet joule	17
6.4.	Les pertes supplémentaires	17
6.5.	Le rendement	17
7.	Schéma équivalent du moteur.....	18
8.	Equation de fonctionnement du moteur.....	18
9.	Le moteur dans l'hypothèse de FRESNEL.....	18
9.1.	Hypothèse	18
9.2.	Comment évolue I pour une charge variable.....	18
9.3.	Comment évolue le déphasage si i varie et U constant	19
9.4.	Comment fournir un couple à puissance active constante.....	19
10.	Le moteur dans l'hypothèse de BEHN-ESCHENBURG.....	21
10.1.	Hypothèse.....	21
10.2.	Comment évolue I pour i constant.....	21
11.	Que faire contre les variations brusques de charge	22
12.	Démarrage d'un moteur synchrone.....	23
12.1.	Utilisation d'un moteur auxiliaire :	23
12.2.	Utilisation d'une excitatrice	23
12.3.	Démarrage en asynchrone synchronisé	23
13.	Usages – avantages – inconvénients	23
14.	Exercices.....	24

1. Principe de fonctionnement

1.1. Principe de base

La seule chose que l'on attend d'un moteur synchrone, c'est qu'il produise un couple afin d'être capable d'entraîner une charge. La vitesse devra être constante et ne pas varier lorsque la charge augmente. Le principe même de la génération du couple est basé sur les lois de l'électromagnétisme. En effet, nous allons ici exploiter d'une part le champ tournant et d'autre part associer à ce dernier la polarisation de la partie fixe qui se mettra dès lors en rotation pour suivre le champ. Le principe est donc basé sur l'attraction de pôles opposés. Le champ tournant prendra son siège au stator et ce dernier sera alimenté par une tension réseau triphasée. La polarisation du rotor se fera via les noyau ou des bobinages seront placés pour créer des champs suite au passage de courant continu. Cette partie de la machine sera donc alimentée par une tension continue. Nous pouvons donc dire que nous allons avoir un accrochage du champ fixe sur le champ tournant. Je conclus donc que le rotor tournera à la vitesse du synchronisme.

1.2. Création du couple

Considérons le stator de la machine constitué de trois bobines constituées chacune de une spire et donc de deux conducteurs actifs. Ces dernières alimentées sous tension alternative sinusoïdale vont de par leur disposition sur le stator avec des angles de 120° entre elles vont engendrer par combinaison des flux statoriques un champ tournant statorique. La description de ce phénomène peut être relu dans la description de cette machine. D'autre part, nous avons au rotor la polarisation des pôles par circulation d'un courant continu dans les bobinages rotoriques.

Nous savons que le champ tournant statorique peut être modélisé par un pôle nord et un pôle sud qui serait mis en rotation à la vitesse du synchronisme fixée par la fréquence de la tension réseau. Le rotor lui possède également un ou plusieurs pôles nord et sud. Je peux donc déduire que les pôles des deux parties vont s'accrocher entre eux exigeant ainsi la mise en rotation du rotor. Les champs en présence seront donc l'image des forces et l'angle entre les deux champs le bras de levier.

1.3. Génération d'un couple utilisable

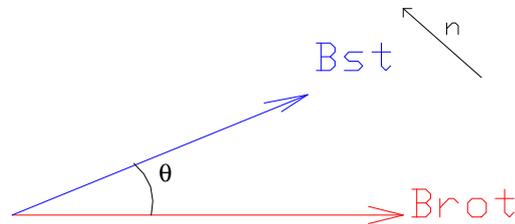
Nous venons de dire ci-dessus que le couple devait son existence au deux champs en présence, je peux donc en déduire que la valeur de ce couple sera fonction de ces deux derniers. Hors la force d'un champ peut être caractérisé comme étant la force d'attraction des pôles. Cette force sera donc fonction des champs statoriques et des champs rotoriques. Ces champs sont donc fonction du courant qui traverse les bobinages mais aussi du nombre de spires formant ces mêmes bobinages. Je peux donc conclure que j'obtiendrais un couple utilisable moyennant un nombre plus ou moins important de spires au droit de chaque bobinage. Ces spires devront être placées dans des encoches réalisées à cet effet sur les masse magnétique de la machine. En pratique, il sera impossible de placer toutes les spires d'une même bobine dans la même encoche ce qui exigera de réaliser plusieurs encoches et de répartir ainsi le bobinage sur la périphérie du stator ou du rotor.

1.4. Conclusion

Soit une tension continue appliquée sur l'enroulement inducteur de la machine, ce dernier ayant une résistance, nous allons avoir circulation d'un courant continu qui va créer au sein du rotor des flux continus qui vont polariser les noyaux. Le stator lui est alimenté par une tension alternative triphasée, ce qui entraîne la circulation d'un courant alternatif dans ces bobinages puisque ceux-ci offrent une résistance propre. Ces courants statoriques vont engendrer la création des trois flux qui vont ensemble former le champ tournant statorique. Les deux phénomènes liés entre eux engendrent en quelque sorte un accouplement magnétique entre le champ tournant et le rotor. Comme le champ statorique à une vitesse, le rotor se met en mouvement.

2. Diagramme des inductions

Le couple moteur résultant de l'action mutuelle du champ rotorique et du champ statorique a pour expression : $C = \beta_{\text{statorique}} \cdot \beta_{\text{rotorique}} \cdot \sin \vartheta$



Théta est donc le déphasage éventuel entre le champ statorique tournant et le champ rotorique.

Le couple est nul pour théta = 0 et maximale pour théta = $\pi/2$.

L'angle théta est appelé décalage angulaire et variera avec le couple demandé au moteur.

A vide : comme le couple est uniquement demandé pour vaincre le couple propre de la machine, le décalage est donc presque nul.

En charge : Comme la charge augmente, le couple résistant augmente et le décalage augmente

Vous voyez aisément que si le couple est maximum pour un décalage de 90° , il va de soit que si le couple résistant continue à augmenter, le décalage va lui aussi augmenter mais le couple moteur lui ne va plus augmenter. Il va même diminuer ce qui entraîne le décrochage du moteur. Nous ne pourrons donc jamais dépasser cet angle ce qui sous-entend que la charge maximum est imposée pour un moteur synchrone. Les protection devront donc être choisies non seulement en fonction du courant absorbé mais aussi en fonction de ce décalage qui retrouvera son image au niveau du courant.

3. Les chutes de tension en charge

Nous savons que nous appliquons une tension réseau aux bornes de nos enroulements statoriques, la question que l'on pourrait se poser est de savoir si le courant poussé des les conducteurs en vu de la génération des flux est directement lié à cette tension. Nous savons que toute machine offre des chutes de tension de tout type qui réduisent ainsi la tension réellement appliquée aux bobinages. Voyons quel en sont les types pour le moteur synchrone.

3.1. La résistance

Nous savons que les bobinages statorique sont constitués de fil de cuivre et que ces derniers offrent une certaine résistance. Lorsque ces derniers vont être parcouru par le courant, il vont donc être le siège de chute de tension qui vont se soustraire à la tension du réseau. De plus, les bobinage seront caractérisé par une impédance et non une résistance, ce qui doit nous montrer que la chute de tension ohmique se somme vectoriellement à la tension du réseau. De plus, je sais que la chute de tension ohmique sera toujours proportionnelle au courant. L'allure de ces chutes en fonction du courant sera donc une droite.

3.2. le circuit magnétique

Nous savons que la machine est aussi constituée de circuit magnétique dont le rôle est de permettre la conduction des différents champs en présence dans la machine. Il s'agit du circuit magnétique du stator et du circuit magnétique du rotor. Chacun de ces circuit magnétique va conduire le flux statorique et le flux rotorique. Le flux rotorique sera fonction du courant d'excitation ou courant inducteur tandis que le champs statorique sera lui fonction du courant de charge ou courant absorbé au réseau. Chacun de ces flux évoluera donc en fonction de la charge ou plus précisément du couple résistant. On peut conclure que les flux en présence peuvent devenir important. Les circuit magnétique étant ce qu'ils sont, ils offrent une limite à la conduction du flux. On appelle se phénomène la saturation du circuit magnétique qui caractérise la conduction maximum admissible de flux. On remarque donc que la machine aura à un moment donné une limite qui se répercutera sur la vitesse de rotation du moteur via le couple moteur.

3.3. La FEM d'auto induction

Nous avons vu que le stator de part ses trois bobinages engendrait un champ tournant que l'on pouvait modéliser comme étant un nord et un sud en rotation. Je peux donc conclure en disant que ces pôle vont induire les enroulement du stator qui verront une variation de flux. N'oublions pas que ce champ statorique est tournant et que sa vitesse est fonction de la fréquence de la tension du réseau. Chaque bobinage statorique va donc par influence de ce champ produire une FEM dite d'auto induction. Elle sera caractérisée par le produit de la réactance synchrone et du courant absorbé. Cette FEM d'auto induction est donc fonction du champ tournant et donc du courant absorbé. La réactance fait apparaître les caractéristiques des bobines. Cette chute de tension d'auto induction se sommera donc vectoriellement à la tension du réseau.

3.4. La FCEM

Si il était aisé de voir l'influence du champ statorique sur les conducteurs du stator, ces mêmes conducteurs sont également soumis à un autre champ. Il s'agit bien évidemment du champ développé par le rotor et qui dans sa mise en rotation est également vu par les enroulements statoriques comme un champ variable. Nous aurons donc au sein des enroulements du stator apparition d'une Force Contre Electro Motrice qui sera fonction du flux statorique et donc du courant d'excitation. Cette nouvelle chute de tension se sommera elle aussi à la tension du réseau. La démonstration de la formule de cette dernière peut être analysée dans la partie sur l'alternateur. L'équation est

$$E = 2,22 \cdot K1 \cdot K2 \cdot f \cdot N \cdot \phi_M \cdot \sin\left(\omega \cdot y - \frac{\pi}{2}\right) \text{ avec } K = 2,22 \cdot K1 \cdot K2$$

3.5. La réaction d'induit

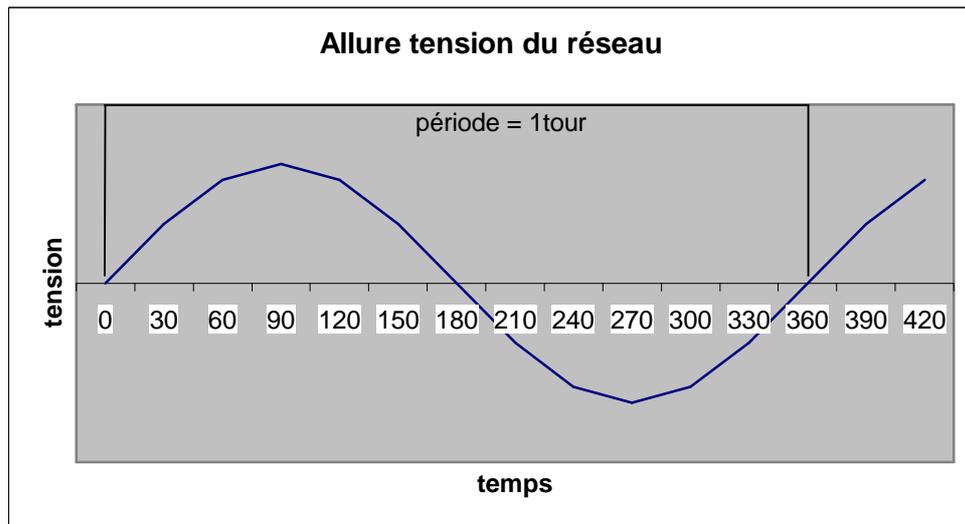
Nous avons vu dans l'alternateur que en fonction du type de charge placée sur la sortie de notre alternateur nous pouvons avoir consommation de courant à prédominance selfique, résistif ou capacitif. L'influence de ces derniers se marquait par le déphasage entre le courant absorbé et la tension d'exploitation elle même liée à la FEM. Ces déphasage en fonction des cas pouvaient créer des réactions d'induit de type transversale (résistif) ou longitudinal démagnétisante (selfique) ou longitudinal magnétisant (capacitif). Ces phénomènes allait tous dans le but de déformer le flux rotorique. Notre machine ne fonctionnant pas de la même manière, devons conclure à la présence de réaction d'induit dans notre moteur synchrone ?

Nous devons pour bien comprendre le phénomène nous rappeler que le couple moteur est créer par les deux champs et par l'angle entre ces derniers. Je peux donc conclure en disant que si je charge mon moteur, cet angle va augmenter me permettant ainsi de développer un couple moteur plus élevé. Ce décalage crée donc une déformation du flux rotorique et donc une diminution de la FCEM au stator qui se répercute par une augmentation du courant afin d'augmenter la force du flux statorique et aider ainsi au développement d'un couple moteur plus conséquent. Si par contre, je retire du couple résistant, il se peut que mon moteur sur son inertie se retrouve dans une situation où l'angle entre les deux champs à changer de sens à savoir que le champ rotorique serait passé devant le champ statorique. Dans ce cas, nous avons toujours une réaction d'induit qui va dans le sens d'augmenter le flux rotorique, donc d'augmenter la FCEM et par conséquent de diminuer la valeur du courant absorbé. Nous voyons donc que la réaction d'induit est toujours présente dans notre moteur et que ces effets se reporteront sur une évolution du courant absorbé. Nous verrons les liens en analysant les caractéristiques.

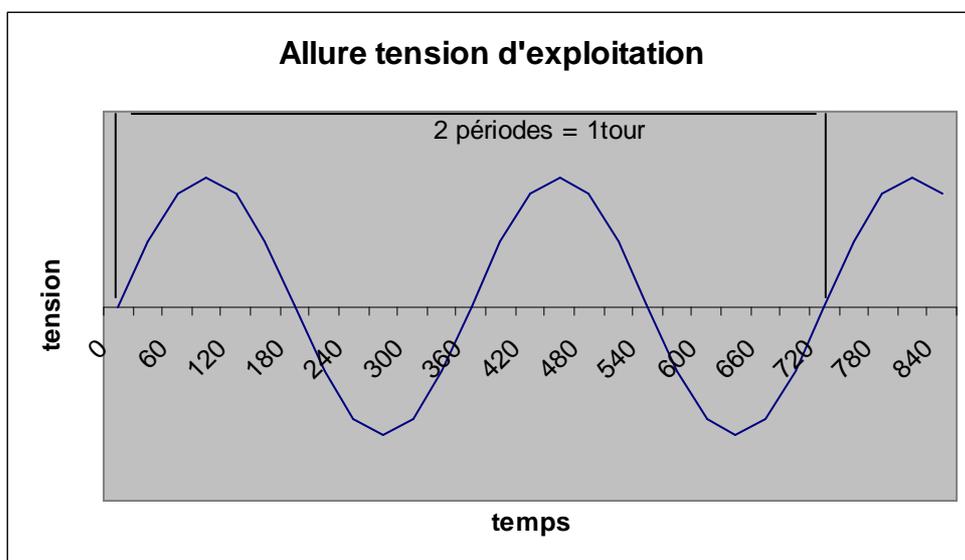
4. La vitesse de rotation

Nous savons que la vitesse de rotation du moteur est fonction de la vitesse du synchronisme et que cette dernière est fonction de la fréquence de la tension du réseau. Nous savons encore que nous pouvons en pratique trouver des machines ayant plusieurs paires de pôles. Tentons de voir le lien entre ces derniers et la vitesse du moteur.

Je sais que si je suis en présence d'une machine bipolaire, lorsque j'aurai parcouru une période, j'aurai ainsi parcouru 360° électrique et également 360° mécanique.



Si maintenant je réalise le même essai mais avec une machine tétrapolaire, je remarque que pour obtenir une rotation de un tour soit 360° mécanique, je dois réaliser 720° électrique soit deux fois la période autrement dit avec une fréquence double. Sachant que le réseau ne permet pas de variation de fréquence, je peux dire que pour une même fréquence, la machine tétrapolaire aura une vitesse de rotation égale à la moitié de celle obtenue avec une machine bipolaire.



Je peux donc tirer la relation suivante : $n = \frac{f}{p}$ avec

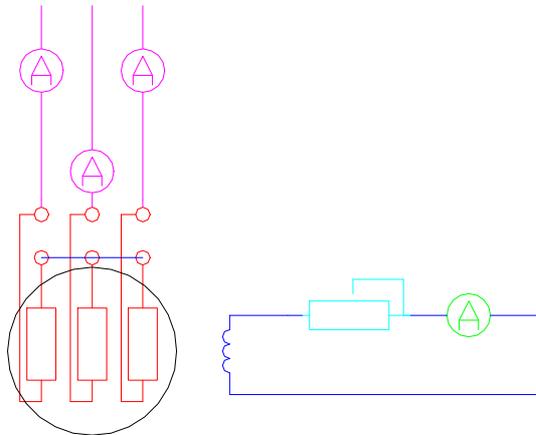
- f : la fréquence en hertz
- n : la vitesse de rotation en t/sec
- p : le nombre de paire de pôles

Un tableau de synthèse permettra de visualiser les liens entre nombre de pôles et vitesse pour une fréquence fixe.

P	N (t/min)
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600
6	500
7	428
8	375
16	188
24	125
32	94
72	42

5. Etude du moteur

5.1. Schéma de câblage



5.2. La courbe en vé

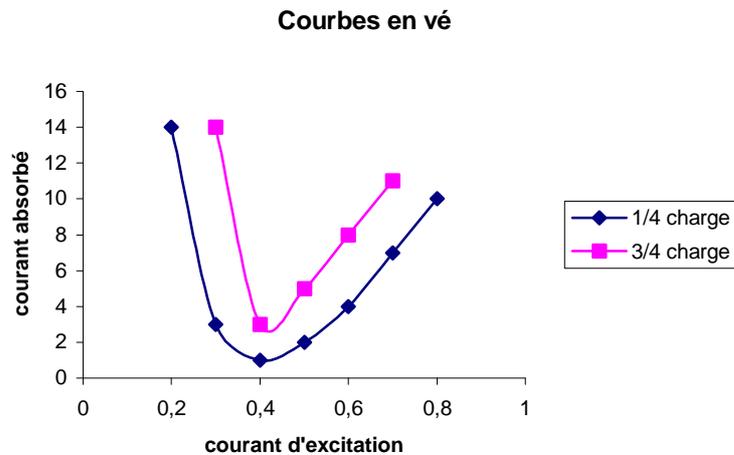
Paramètres constants	Paramètres variables
Vitesse de rotation	Courant excitation
Couple moteur	

Cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution du courant absorbé « I » en fonction du courant d'excitation ($I=f(i)$).

5.2.1. Mode opératoire

- Câbler la machine en fonction du schéma de câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- Vérifier que le rhéostat de champ est bien placé en série avec l'inducteur et que la valeur de la résistance est maximum afin d'avoir le courant d'excitation minimum.
- Alimenter l'inducteur de la machine sous tension continue.
- Alimenter l'induit de la machine sous tension et fréquence constante alternative
- Par palier constant, modifier le courant d'excitation à l'aide du rhéostat de champ et relever le courant absorbé. Vous ferez ensuite la même manipulation en diminuant par palier le courant d'excitation.

5.2.2. Courbe

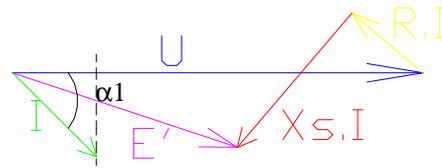


5.2.3. Explication physique

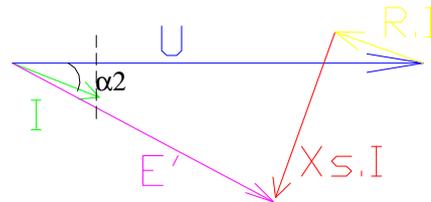
Nous remarquons une allure très particulière de cette courbe. En effet, lorsque l'on augmente le courant d'excitation, le courant absorbé décroît dans un premier temps pour passer par une valeur minimum et ensuite remonter. Nous savons que ces courbes sont réalisées sur charge constante et que dès lors la puissance active demandée au réseau reste également constante. Je peux donc déduire que la variation du courant d'excitation entraîne une variation du courant réactif absorbé au réseau. Analysons ce qui se passe. Nous avons commencé notre essai avec le rhéostat au maximum de sa résistance ce qui sous-entend que le courant d'excitation est minimum et que donc le flux rotorique l'est aussi. Je peux donc dire également que le décalage entre le flux rotorique et le flux statorique est maximum pour cette charge. Si cet angle est maximum, cela veut dire que nous avons une réaction d'induit très importante et que donc la FCEM est faible exigeant un appel de courant très important. Nous visualisons très bien ce premier point sur le graphe. Etant donné que la puissance active est constante, je peux dire que le courant actif l'est également. Si j'augmente le courant d'excitation en jouant sur le rhéostat de champ, je diminue l'angle entre les deux flux puisque pour un même couple résistant, si l'une des forces augmente, le bras de levier peut devenir plus faible. Cette diminution de l'angle entraîne une déformation moins importante du flux rotorique d'où une augmentation de la FCEM et une diminution du courant absorbé. Comme la composante active de ce courant n'a pas changé pour une charge constante, je peux dire que seul la composante réactive a changé et que l'angle de ce courant total absorbé par rapport à la tension à lui aussi diminué.

Visualisons sur le diagramme ci-dessous cette situation :

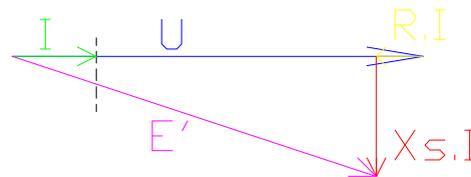
courant d'excitation minimum



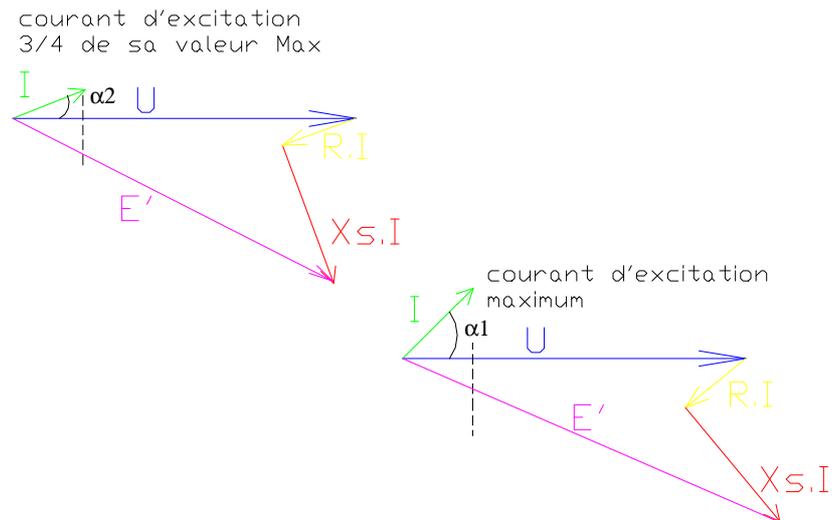
courant d'excitation 1/4 de sa valeur Max



Si nous continuons à augmenter le courant d'excitation, nous pouvons voir que nous allons trouver un courant absorbé purement actif et de même valeur puisque la charge n'a pas changée. Nous avons dès lors le courant en phase avec la tension du réseau. La réaction d'induit est alors purement transversale et ce passage à permis de diminuer la déformation, donc d'augmenter encore la FCEM et donc une diminution de I.



Que se passe t-il si nous continuons à augmenter le courant d'excitation, nous allons encore augmenter la valeur du champ rotorique qui va permettre de faire passer le champ rotorique devant le champ statorique. Cela sous-entend que nous avons apparition de réaction d'induit longitudinale magnétisante et que cette dernière va amplifier le flux rotorique ce qui aura pour conséquence d'augmenter la FCEM et donc de modifier le courant absorbé. Comment se courant va t-il évoluer ? Nous savons que quel que soit la valeur qu'il va prendre, la composante active devra toujours avoir la même valeur puisque notre charge n'a pas variée. Voyons sur les graphes ci-dessous ce que devient le courant.



Nous voyons que le courant absorbé augmente à nouveau, avec une composante réactive du type capacitif et non plus selfique. Cela veut dire que notre moteur ne consomme plus que de la puissance active, la puissance réactive elle est fournie par mon moteur au réseau. Ce type de fonctionnement est utilisé dans certaine grosse installation afin d'améliorer le facteur de puissance globale. Vous voyez que si nous appliquons le maximum de courant d'excitation, la FCEM continue à augmenter entraînant une augmentation du courant absorbé et une augmentation de production de puissance réactive. La machine lorsqu'elle est surexcitée fonctionne en compensateur synchrone.

5.3. La courbe en cloche

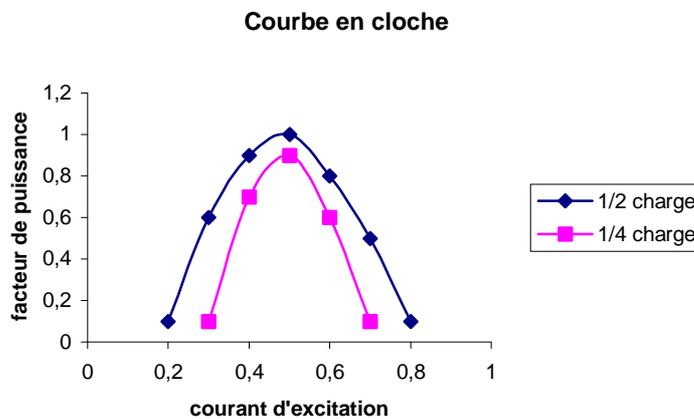
Paramètres constants	Paramètres variables
Vitesse de rotation	Courant excitation
Courant excitation	

Cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution du cosinus « $\cos \varphi$ » en fonction du courant d'excitation $\cos\varphi=f(i)$.

5.3.1. Mode opératoire

- Câbler la machine en fonction du schéma de câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- Vérifier que le rhéostat de champ est bien placé en série avec l'inducteur et que la valeur de la résistance est maximum afin d'avoir le courant d'excitation minimum.
- Alimenter l'inducteur de la machine sous tension continue.
- Alimenter l'induit de la machine sous tension et fréquence constante alternative
- Par palier constant, modifier le courant d'excitation à l'aide du rhéostat de champ et relever le cosinus phi entre la tension du réseau et le courant absorbé. Vous ferez ensuite la même manipulation en diminuant par palier le courant d'excitation.

5.3.2. Courbe



5.3.3. Explication physique

Nous avons vu pour les courbe en vé que l'augmentation du courant d'excitation entraînait une modification du déphasage entre les champs rotorique et statorique qui avait pour conséquence de modifier l'effet de la réaction d'induit sur le champ rotorique. Ce champ rotorique étant à l'origine de la FCEM au stator, cette dernière va elle aussi évoluer en augmentant d'autant plus que le courant d'excitation augmente. Cette augmentation de la FCEM nous à montrer que le courant absorbé évoluait à son tour. Comme la charge était constante, la composante active de ce courant était constante ce qui nous à permis de découvrir que seul la composante réactive évoluait. Cette dernière diminuait donc avec l'augmentation de l'excitation pour passer par une valeur nulle pour ensuite augmenter à nouveau. L'évolution de cette composante réactive nous amène donc à dire que si la composante active reste constante, que cela ne peut se faire que moyennant une modification du facteur de puissance. Hors ce facteur de puissance est représenté par le cosinus de phi. Phi étant de déphasage entre la tension du réseau et le courant absorbé. Les graphes vu ci-dessus nous ont montré clairement que l'influence du courant d'excitation entraînait une augmentation du facteur de puissance (cosinus tend vers 1) pour passer par un facteur de puissance égale à 1 dans le cas ou le courant absorbé se ramène à un courant purement actif et ensuite une diminution du facteur de puissance (cosinus tend vers 0). Il va de soit que le graphe ne peut pas nous montrer que l'angle devient négatif et que dès lors nous sommes passé d'un fonctionnement selfique à un fonctionnement capacitif. Quoi qu'il en soit, je peut dire que la partie gauche de la courbe correspond à un fonctionnement selfique et que la partie de droite correspond à un fonctionnement capacitif.

5.4. La courbe de vitesse

Paramètres constants	Paramètres variables
Courant d'excitation	Couple résistant
Tension d'alimentation et fréquence	

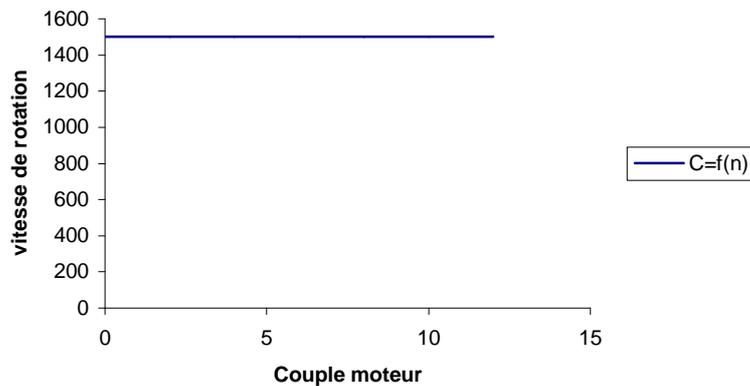
Cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution du courant absorbé « I » en fonction de la vitesse de rotation « n » $n=f(I)$.

5.4.1. Mode opératoire

- Câbler la machine en fonction du schéma de câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- Vérifier que le rhéostat de champ est bien placé en série avec l'inducteur et que la valeur de la résistance est maximum afin d'avoir le courant d'excitation minimum.
- Alimenter l'inducteur de la machine sous tension continue.
- Alimenter l'induit de la machine sous tension et fréquence constante alternative
- Par pallier constant, modifier la charge et relever le couple et la vitesse de rotation

5.4.2. Courbe

Caractéristique de vitesse



5.4.3. Explication physique

Cette courbe nous montre très bien la constance de la vitesse de ce type de moteur. En effet, la vitesse est définie par la vitesse du champ tournant statorique, et comme le moteur tourne au synchronisme, il tourne à cette même vitesse. Que se passe-t-il dès lors lorsque la vitesse s'effondre ? Nous savons que le couple est existant parce que nous avons les deux forces développées par chacun des champs statorique et rotorique et par le bras de levier entre ces deux derniers à savoir le décalage angulaire. Les deux champs tournent donc à la même vitesse puisque le champ rotorique est fixe vis à vis du rotor et que ce dernier tourne au synchronisme. Mais cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas un décalage entre ces derniers. Ce décalage a pourtant ces limites. Lorsque nous chargeons notre moteur sans modifier les autres paramètres du moteur, seul ce déphasage peut évoluer pour d'une part augmenter le couple et d'autre part permettre une augmentation du courant absorbé par influence de la réaction d'induit. Tout va donc dans le sens de fournir un couple moteur capable de reprendre le couple résistant. Lorsque cet angle atteint 90° , on peut dire que le couple moteur est maximum. Toute augmentation complémentaire de cet angle aurait pour conséquence n'ont plus une augmentation du couple moteur mais une diminution de ce dernier. Comme le couple résistant deviendra alors plus grand que le couple moteur, la machine va décrocher et la vitesse va tendre vers zéro. Noter que dans ce cas, des protections doivent protéger le moteur.

6. Bilan énergétique

6.1. La puissance absorbée

La puissance absorbée vaut : en monophasé : $P=U.I.\cos\varphi$

en triphasé : $P=\sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$

- U= tension composée
- I = courant composé
- $\cos\varphi$ = déphasage entre courant simple et tension simple

La puissance absorbée par l'inducteur vaut sous tension continue $P=U .i$

6.2. Les pertes constantes

Lorsque l'on parle des pertes d'un alternateur, on mentionne souvent les pertes dites « constantes ». Elles sont constituées de pertes mécaniques et magnétiques.

En réalité, ces pertes varient en fonction de la vitesse et de l'induction. En pratique étant donné que l'on fonctionne à vitesse constante pour garantir une fréquence constante et à induction constante on pourra considérer ces pertes comme constante.

Ces pertes sont mesurées pendant un essai à vide. Lors de cet essai, la vitesse de la machine est égale à la vitesse nominale afin de débiter la tension d'exploitation qui sera dans ce cas égale à la FEM à vide. La puissance mesurée représentera les pertes fer.

6.3. Les pertes par effet joule

Dans le rotor elles valent $p_{j_{ex}}=u_{ex}.i_{ex}$.

Dans le stator elles valent pour un couplage étoile $p_{j_{st}}=3.R.P^2$ et pour un couplage triangle $p_{j_{st}}=3.R.\left(\frac{I}{\sqrt{3}}\right)^2$.

Noter que la plupart des machines ayant leur stator couplé en étoile, la valeur mesurée entre phase représente la résistance de deux enroulements en série. Nous devons donc diviser cette dernière pour obtenir la valeur d'un seul enroulement.

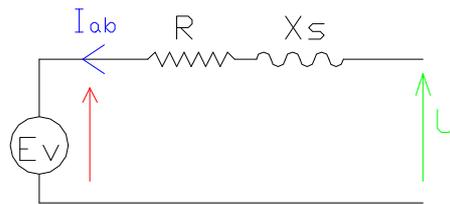
6.4. Les pertes supplémentaires

Les pertes supplémentaires sont essentiellement constituées par les pertes par courant de FOUCAULT dans les parties métalliques de la machine. Les pertes supplémentaires ne sont pas calculables mais peuvent être mesurées au cours d'un essai en court-circuit.

6.5. Le rendement

Son expression est $\eta=\frac{P_{ab}-pertes}{P_{ab}}$

7. Schéma équivalent du moteur



8. Equation de fonctionnement du moteur

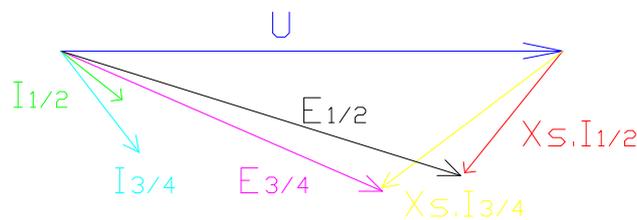
$$\bar{U} = \bar{E} + R\bar{I} + X_s\bar{I}$$

9. Le moteur dans l'hypothèse de FRESNEL

9.1. Hypothèse

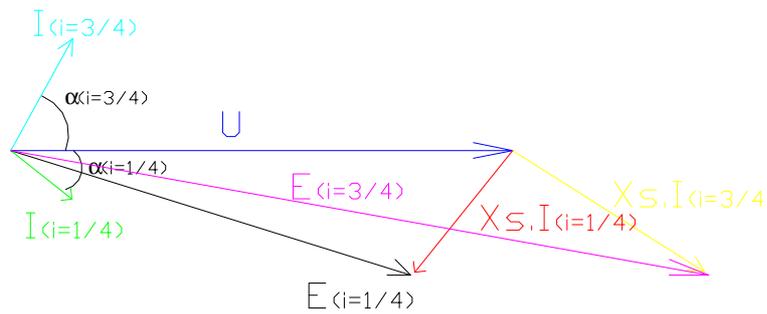
Dans le cas de cette théorie, les chutes de tension ohmiques sont négligées ;
 L'équation se ramène donc à $\bar{U} = \bar{E} + \bar{E}_i$ avec $\bar{E}_i = X_s\bar{I} = j.\omega.L\bar{I}$. E_i étant la Force Electro Motrice d'auto induction.
 Je précise encore que le circuit magnétique sera considéré comme non saturé.

9.2. Comment évolue I pour une charge variable



Nous pouvons voir sur le graphe ci-dessus que toute augmentation de la charge entraîne tout d'abord une diminution de la valeur de la FCEM. Cette diminution entraîne une augmentation du courant absorbé. Qui entraîne une nouvelle augmentation de la FEM d'auto induction $X_s \cdot I$. L'ensemble se stabilisera en vérifiant l'équation des tensions de la machine. Noter que pour une charge variable, les composantes active et réactive du courant absorbé évoluent. Noter encore que l'explication de la diminution de la FCEM est lié au fait que la réaction d'induit devient plus dévastatrice envers le champ rotorique. Ce dernier phénomène étant lui lié à l'augmentation du décalage angulaire entre les champs générant le couple moteur. Noter encore que l'augmentation de la charge entraîne une variation du facteur de puissance, nous n'avons pas augmentation proportionnel entre les deux composantes du courant par le simple fait que les multiples pertes au sein de la machine non pas la même action sur l'un ou sur l'autre.

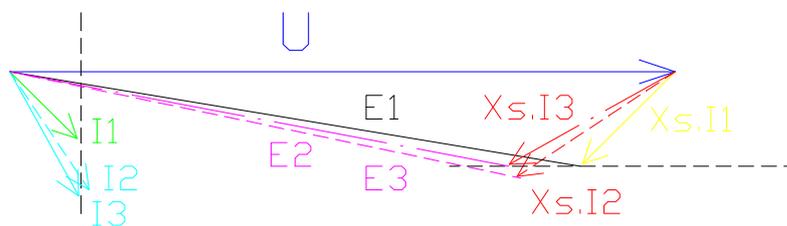
9.3. Comment évolue le déphasage si i varie et U constant



Prenons le cas où la charge est constante, et où nous faisons varier le courant d'excitation. Le graphique nous montre clairement que la composante de la FCEM augmente pour toute augmentation du courant d'excitation. Que le courant absorbé diminue pour passer par une valeur minimum égale à la composante active du courant qui elle ne bouge pas en fonction du courant d'excitation puisque la charge est fixe. Noter que la FEM d'auto induction suit les mêmes variations que le courant moyennant un facteur constant soit X_s . Noter encore que si la composante réactive passe d'une valeur maximum sous excitation réduite à une valeur nulle pour ensuite retendre vers une valeur maximum sous excitation maximum, le sens du déphasage entre le courant absorbé et la tension du réseau à lui aussi changé. Nous sommes passé d'un fonctionnement selfique en sous excité à un fonctionnement capacitif en surexcité. Dans ce dernier cas, la machine travaille en compensateur synchrone ce qui veut dire qu'elle ne consomme pas de puissance réactive, elle en fournit au réseau.

9.4. Comment fournir un couple à puissance active constante

Étant donné que en tant que consommateur, nous sommes redevable au distributeur de la puissance active consommée, il serait intéressant de voir si nous pourrions parvenir à faire travailler un moteur synchrone sur charge variable à puissance active constante. Visualisons sur un graphique la situation avant la charge et après la charge et tentons de voir comment nous pourrions parvenir à maintenir la puissance active constante entre ces deux points de fonctionnement.



L'état 1 correspond à la situation avant la charge
 L'état 2 vecteurs en pointillés correspond à la situation après la charge
 L'état 3 vecteurs en trait d'axe correspond à la situation vers laquelle il faut tendre pour garder la même puissance active.

Nous voyons bien qu'après la charge, la composante active du courant est trop importante ce qui implique que nous avons une consommation de puissance active plus élevée. Pour réduire cette dernière, nous devons réduire la consommation de courant actif. Pour parvenir à cela, nous devons augmenter la composante réactive puisque le courant global ne pourra pas devenir plus petit. Nous pouvons même avancer que ce dernier va devoir augmenter. Il nous faut donc augmenter le déphasage entre la tension du réseau et le courant absorbé. Qui dit augmentation de cet angle dit diminution du facteur de puissance et augmentation de l'influence selfique de la machine. Nous consommons plus de puissance réactive. Pour réaliser ce phénomène, il nous suffit de diminuer la valeur du courant d'excitation afin d'augmenter le décalage angulaire entre les flux, augmenter l'effet dévastateur de la réaction d'induit, diminuer la FCEM et ainsi permettre une augmentation du déphasage. Noter que l'on voit clairement sur le graphique que la FCEM est plus faible lorsque nous avons stabilisé la puissance active.

En conclusion, pour obtenir un fonctionnement sous tension et puissance active constante, il est nécessaire de :

- Faire fournir par le réseau la puissance active minimum pour que le moteur puisse développer le couple nécessaire pour entraîner la charge.
- Fixer le courant d'excitation à une valeur d'autant plus petite que la charge augmente. La puissance réactive absorbée par un moteur est réglée par son excitation.

10. Le moteur dans l'hypothèse de BEHN-ESCHENBURG

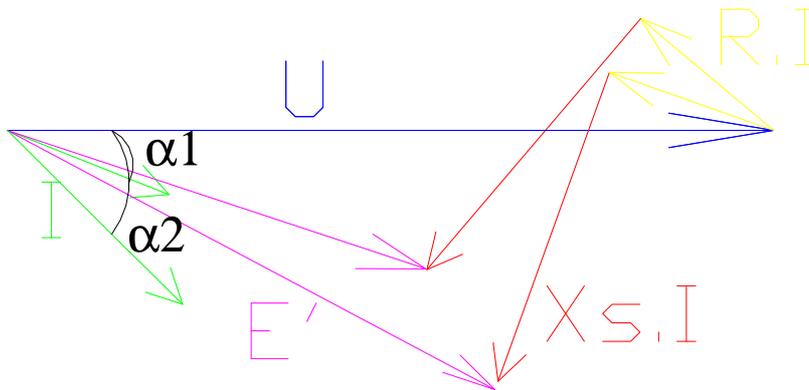
10.1. Hypothèse

Dans le cas de cette théorie, aucune des chutes de tension ne sont négligées.

L'équation est donc $\bar{U} = \bar{E} + R\bar{I} + j.\omega.L\bar{I}$. Je signale que la valeur de $R.I$ a été exagérée pour la visibilité du diagramme.

Le circuit magnétique sera toujours considéré comme non saturé.

10.2. Comment évolue I pour i constant



Ce graphe est très explicite, toute augmentation de la charge à excitation constante exige tout d'abord une augmentation du couple moteur qui sera réalisé par une augmentation du décalage angulaire entre les champs. Ce décalage modifie l'action de la réaction d'induit et amplifie donc son effet néfaste. La conséquence est bien sûr une diminution de la FCEM. Cette diminution exige pour vérifier l'équation des tensions une augmentation du courant absorbé. Cette augmentation entraînera bien entendu une augmentation des chutes de tension. De plus, l'effet de la réaction d'induit va amplifier la composante réactive du courant et donc diminuer le facteur de puissance de la machine. Je peux donc dire que lorsque je charge une machine à excitation constante, les composantes active et réactive du courant évolue, dans des proportions différentes ce qui impose que le facteur de puissance évolue également pour tendre vers un fonctionnement de plus en plus selfique.

11. Que faire contre les variations brusques de charge

Ce problème qui bien sur entraîne des variations de vitesse est du au fait que la machine doit en permanence retrouver un point d'équilibre, nous avons vu tout au long de ce cours que la modification d'un élément interférait toujours sur d'autre et que ces l'ensemble des éléments qui garanti d'une part le fonctionnement et d'autre part la stabilité. Il est donc certain que pour toute variation de charge, le moteur subit un phénomène de pompage au niveau de sa vitesse afin que courant et décalage angulaire se soit stabilisé. Si ce pompage peut être négligeable dans certaines applications, d'autre par contre ne le tolérons pas. Il nous faut donc trouver une solution pour réduire ce pompage. La solution a été trouvée par Mr LEBLANC. Il suffit de placer des amortisseur du même nom. Ces derniers se caractérise sous la forme de portions de cage qui seront placées dans les épanouissements polaire de la machine. Lorsque le moteur tourne à la vitesse du synchronisme, je peux conclure que ces amortisseurs ne joue aucun rôle, ils ne sont soumis à aucune variation de flux. Si par contre j'ai variation de vitesse, j'ai à ce moment une variation de flux au sein de ces amortisseurs. Cette variation de flux crée des FEM dans les conducteurs des portions de cage. Comme ces cages sont court-circuitées à leur extrémité, j'aurai circulation de courant qui lui va créer un champ. Ce champ va nous permettre de créer un écran électrostatique entre le rotor et le stator. En d'autre terme, cet écran va masquer les variations de flux rotorique de telle sorte que le stator ne réagisse pas de façon excessive par un appel brusque de courant. Nous aurons toujours un pompage, mais il sera réduit.

12. Démarrage d'un moteur synchrone

Si nous appliquons une tension triphasée alternative sur un moteur synchrone et que nous l'excitons, nous remarquerons que le moteur ne se mettra pas en rotation. Nous savons que si le décalage angulaire entre les deux champs est supérieur à 90° , nous avons décrochage. Hors au démarrage, le champ statorique est à vitesse du synchronisme de façon instantanée ce qui empêchera tout accrochage. Il nous faut donc amener la vitesse du rotor à une vitesse proche de celle du synchronisme pour permettre un accrochage du champ rotorique sur le champ statorique.

12.1. Utilisation d'un moteur auxiliaire :

On entraîne le moteur synchrone à une vitesse de rotation à peine inférieure à celle du synchronisme au moyen d'un moteur asynchrone de faible puissance. Le moteur synchrone est couplé au réseau lorsque sa vitesse s'est stabilisée .

12.2. Utilisation d'une excitatrice

On alimente dans ce cas l'excitatrice accouplée au moteur synchrone en vu de fournir à ce dernier la tension continue ce revient à faire tourner cette excitatrice en moteur. Quand la vitesse voulue est atteinte, on déconnecte l'alimentation de l'excitatrice par exemple d'un jeu de batterie, on alimente le stator du moteur et connecte l'excitatrice sur l'inducteur du moteur synchrone.

12.3. Démarrage en asynchrone synchronisé

Nous réalisons dans ce cas le court-circuit du rotor. Nous savons que à l'arrêt mes conducteurs rotoriques vont voir une variation de flux et donc engendrer des FEM qui sur un court circuit vont pousser des courants dans les enroulements du rotor. Noter que les FEM et les courants seront ici alternatif. Je peux donc concevoir que les courants rotoriques vont induire des flux qui en association vont créer un champ tournant rotorique sur le même principe que pour le stator. Les deux champs vont ainsi pouvoir s'accrocher entres eux et mettre le rotor en rotation. Un fois la vitesse du synchronisme proche, on retire le court circuit du rotor et on injecte la tension continue.

13. Usages – avantages – inconvénients

Usages : Lorsqu'une vitesse absolument constante est nécessaire, ce type de moteur peut trouver son application. Il est toutefois peut utiliser car nécessite un système de démarrage coûteux. L'autre utilisation est l'application du moteur en compensateur synchrone afin d'améliorer le facteur de puissance.

Avantages : La vitesse est relativement constante, le facteur de puissance pouvant être égale à 1 en fait une machine intéressante. Le rendement est excellent.

Inconvénients : Nécessité d'une source auxiliaire pour l'excitation, le démarrage n'est pas spontané et le risque de décrochage peut entraîner l'arrêt du moteur.

14. Exercices

1° Un moteur synchrone triphasé fonctionne sur un réseau 220-380V 50Hz. La réactance synchrone correspondant à la tension composée est de 12 ohms. Calculer la FEM pour un facteur de puissance de 1 et une puissance active de 12Kw, le couple moteur sachant que le rotor a 4 pôles et le coefficient de stabilité.

2° Un moteur synchrone triphasé hexapolaire, dont les enroulements sont couplés en étoile, fonctionne sous 220V-380V 50Hz. Sa réactance synchrone, pour une phase, est de 3,46ohms et sa puissance nominale de 25Kw. Il fonctionne avec un facteur de puissance de 0,9 avant. Calculer le courant absorbé, la puissance réactive fournie, la valeur de la FEM par phase et entre phase, le couple moteur et le coefficient de stabilité.

3° Un moteur synchrone triphasé étoile est utilisé en compensateur synchrone. Il fonctionne sous 5000V 50Hz entre phases et absorbe une puissance active de 30Kw. Quel doit être le déphasage avant du courant sur la tension pour obtenir une puissance réactive de 200Kvar ? Quelle est la FEM E_v sachant que, pour une phase, $X_s=115\text{ohms}$

4° Un moteur synchrone triphasé étoile possède 8 pôles et fonctionne sous 5000V 50Hz entre phases. Sa réactance par phase est de 23ohms. Il fonctionne avec une excitation constante donnant une FEM entre phases à vide $E_v = 7000\text{V}$. Déterminer, pour la puissance active absorbée de 6000Kw le courant actif, la valeur de la chute de tension inductive, le facteur de puissance, le couple moteur et le coefficient de stabilité.

5° Un moteur synchrone est branché sur un réseau 8000V 50Hz. Le moteur a 12 pôles. A vide, il faut donner au courant d'excitation une intensité de 100A pour que le courant statorique soit nul. Toujours à couple nul, on porte l'excitation à 120A, le courant statorique, est alors de 40A. Calculer la puissance réactive fournie au réseau et le coefficient d'équivalence entre le courant d'excitation et le courant statorique. Le courant d'excitation restant 120A, on fait agir sur l'arbre un couple résistant de 21000mN ; déterminer le courant statorique, la puissance réactive et le décalage de la roue polaire. On désire fournir au réseau la même puissance réactive qu'à vide, déterminer les valeurs du courant d'excitation et du courant statorique.

6° Un atelier est alimenté par une distribution triphasée de 5500V 50Hz. Il absorbe une puissance de 600Kw pour un facteur de puissance de 0,6 arrière. Pour améliorer ce facteur de puissance on utilise une machine synchrone de 460Kvar, enroulement en étoile. L'essai à vide a donné :

J	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Ecomp	1430	2810	4060	5110	5930	6410	6720	6930	7100

Pour la pleine charge en compensateur, quelle valeur prendrait le facteur de puissance de l'atelier, quelle valeur faudrait-il donner au courant d'excitation si la réactance synchrone d'une phase est de 18ohms. La machine fonctionne en moteur à charge normale, l'excitation est réglée pour avoir un facteur de puissance égale à 1. calculer ce courant d'excitation. La puissance utile restant constante et en négligeant les pertes,

tracer la courbe de MORDEY du moteur. Pour quelle valeur du courant d'excitation obtient-on la limite de stabilité ?

7° Une machine synchrone triphasé 127-220V 50Hz ; 10Kvar ; 4 pôles ; 50Hz a donné aux essais les résultats ci-dessous. Essai en alternateur à vide :

J	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
E comp	32	95	150	192	222	243	258	272	283	292

Essai en court-circuit pour $j = 10A$ $I_{cc} = 32,4A$
 $J = 20A$ $I_{cc} = 64,8A$

Cette machine fonctionne en moteur sur un réseau triphasé 220V entre phase en fournissant une puissance de 10Kw. Calculer le courant d'excitation et la FEM correspondante pour que le facteur de puissance soit égal à 1. Calculer le couple moteur et le coefficient de stabilité. Déterminer le décalage électrique et le décalage géométrique. Ces questions pourront être résolues par la méthode des AT et par la méthode de BEHN-ESCHENBURG ; les résultats seront comparés. Un essai a donné $j=13A$ pour valeur expérimentale du courant d'excitation.