

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de la Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques

Thème

**Etude d'une Machine
Synchrone**

Dirigé par:
Kechida Ridha

Réalisé par:
Kerrouche Youcef
Korbaa Abderahmane
Nid Nacer

Soutenu 03 Juin 2014

Dédicace

A ma Mère et mon Père

A ma Famille

A mes Sœurs mes Frères et mes Proches

A tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir

Et à ceux qui partagent de bons souvenirs

LISTE DE FIGURE

Fig.1:Symbole d'une machine synchrone	02
Fig.2: Stator machine synchrone	03
Fig.3:Rotor à pôles lisses	03
Fig.4: Rotor à pôles saillants	03
Fig.5:Rotor à aimant permanent.....	04
Fig.6: Principe de base de l'alternateur.....	05
Fig.7: Conditions de couplage d'un alternateur sur réseaux ou auteur alternateur	10
Fig.8: Exemple de couplage d'un alternateur sur réseaux	10
Fig.9: la manipulation d'un alternateur triphasé Tourne par moteur à courant continu	11
Fig. 10: le schéma électrique du montage permettant d'effectuer l'essai à vide.	13
Fig. 11: la caractéristique à vide de référence $E_v=f(I_{exc})$	14
Fig12: la caractéristique en charge résistive $U=f(I)$	15
Fig. 13:la caractéristique en charge inductive $U=f(I)$	15
Fig14: le schéma électrique du montage permettant d'effectuer l'essai en court-circuit.	16
Fig. 15 : la caractéristique en court-circuit $I_{cc} = f(I_{exc})$	17
Fig.16: Modèle pour l'étude de machine synchrone	21
Fig.17: Fenêtre de réglage des paramètres de la machine synchrone	22
Fig.18: Fenêtre de réglage des paramètres des réseaux triphasés	22
Fig19:Fenêtre de réglage du bloc baromètre de la charge	23
Fig.20: Les caractéristiques mécaniques d'un alternateur	24

SOMMAIRE

Dédicace	
Liste de figure	
Sommaire	
Introduction générale.....	01
Chapitre I: Généralité sur la machine synchrone	
1 Généralités	02
2 Domaines d'utilisation de la machine synchrone.....	02
3. Symbol	02
4. Constitution.....	03
4.1 Stator	03
4.2 Rotor	03
4.2.2 Rotor bobinés	03
4.2.1.1 Rotor à pôles saillants	04
4.2.1.2 Rotor à pôles lisses.....	04
4.2.2 Rotor à aimant permanent	04
5. Fonctionnement.....	04
5.1 Fonctionnement en moteur synchrone	04
5.2 Fonctionnement en génératrice : alternateur.....	05
5.2.1 Principe de base.....	05
6. Bilan énergétique pour moteur.....	06
6.1 La puissance absorbée.....	06
6.2 Les pertes par effet joule.....	06
6.3 Les pertes supplémentaires.....	06
6.4 Le rendement.....	06
7. Schéma équivalent du moteur.....	06

7.1. Equation de fonctionnement du moteur	06
8. Démarrage d'un moteur synchrone	07
8.1 Utilisation d'un moteur auxiliaire	07
8.2 Utilisation d'une excitatrice	07
8.3 Démarrage en asynchrone synchronisé	07
9. Bilan énergétique pour alternateur.....	08
9.1 La puissance utile.....	08
9.2 Les pertes constantes.....	08
9.3 Les pertes par effet joule.....	08
9.4 Les pertes supplémentaires.....	08
9.5 Le rendement.....	08
10. Le schéma équivalent de l'alternateur.....	09
10.1 L'équation de fonctionnement de l'alternateur.....	09
11. Mise en parallèle d'alternateur.....	09
11.1 Conditions de couplage.....	09
11.1.1 La même fréquence.....	09
11.1.2 La même tension.....	09
11.1.3 La même succession des phases.....	10
12. Les avantages et inconvénients d'une machine synchrone.....	11
12.1 Les avantages.....	11
12.2 Les inconvénients.....	11
13. Conclusion	11

Chapitre II: Elaboration d'un Alternateur Triphasé

Introduction	12
1. Buts de la manipulation	12
2. Etude de la signalétique de la machine	12
2.1 Etude de la plaque signalétique de la machine.....	12
3. Caractéristique de fonctionnement.....	13
3.2.1 Essai à vide	13
3.2.2 Essai en charge	14
3.2.3 Essai en court-circuit	16
4. Modèle de Behn-Eschenburg	17
4.1 Mesure de la résistance statorique à chaud	17
4.2 Détermination de la réactance synchrone de l'alternateur	18
4.3 Modèle de Behn-Eschenburg.....	18
5. Conclusion.....	19

Chapitre III: Etude d'un alternateur à l'aide d'un laboratoire virtuel

1. Introduction.....	20
2 Présentation.....	20
3. Objectif du travail.....	20
3.1 Les indications pour l'exécution du travail	20
3.2. Contenu du travail.....	20
3.3. La description de l'installation du laboratoire virtuel.....	20
4. Résultat de simulation.....	23
5. Conclusion	25

INTRODUCTION GENERALE

Toute machine électrique dont laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Deux modes de fonctionnement sont à distinguer pour les machines synchrones. En mode génératrice, elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor. En mode moteur elle consomme un courant électrique pour faire tourner le rotor à une vitesse déterminé par la fréquence du courant.

Les grandeurs des machines varient de quelques Watts pour les petits moteurs à plusieurs centaines de mégawatts pour les alternateurs de grande puissance. Par ailleurs, la structure de ces machines reste très semblable. Deux parties sont à distinguer, le stator est constitué d'enroulements triphasés qui par interaction avec le champ magnétique rotorique crée un couple électromécanique, le rotor quant à lui est responsable de générer le champ d'induction. Il existe trois sortes de rotor, les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants, et finalement les rotors à aimant.

1. Généralités

La machine synchrone est une machine très utilisée de par sa fonctionnalité et sa réversibilité. Elle est très utilisée dans la production d'énergie électrique (centrale) et en traction. Pour de petites applications, on la trouve de plus en plus à la place de moteur à courant continu [01].

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [02].

2. Domaines d'utilisation de la machine synchrone

Le grand avantage de la machine synchrone est l'élimination des pertes par glissement. En particulier pour les moyennes et petites puissances, la machine synchrone est utilisée largement dans plusieurs applications, comme les machines-outils, la robotique et les véhicules électriques. Ce sont des moteurs qui peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électronique, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide [03].

3. Symbole

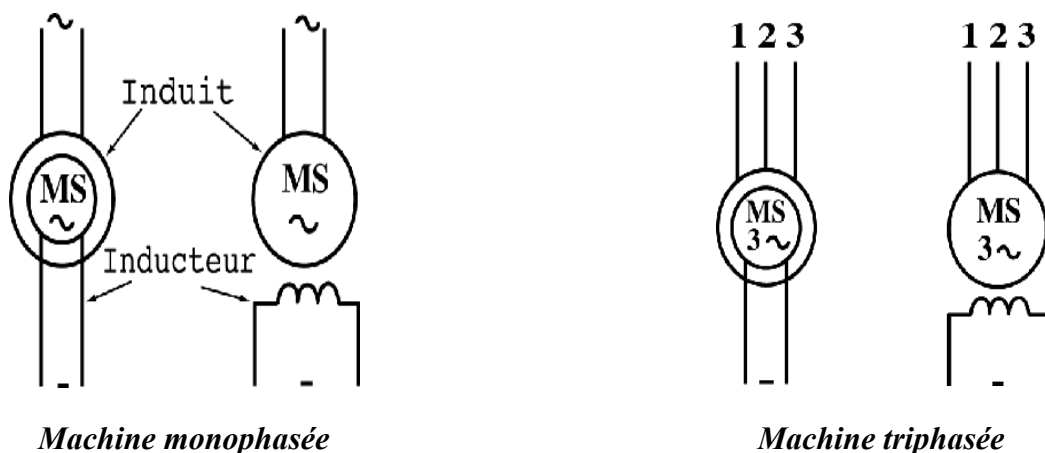


Fig.1:Symbole d'une machine synchrone

4. Constitution

Les machines synchrones sont par définition des machines à vitesse constante. Ils fonctionnent en synchronisation avec une ligne de fréquence et sont utilisés principalement pour les applications nécessitant une vitesse constante. Le moteur synchrone est un moteur électrique actionné par un courant alternatif comprenant deux composants de base: le stator et le rotor [04].

4.1 Stator

Représente la partie fixe de la machine, destiné à produire le champ tournant, comporte le circuit magnétique ferromagnétique constitué d'un empilage de tôles en acier au silicium de 0.35 à 0.5 mm, qui accueille dans ces encoches les enroulements statorique triphasé bobiné en fil de cuivre isolé. Les trois bobines sont disposées de telle façon qu'elles constituent un ensemble triphasé couplé soit en étoile ou en triangle [05].

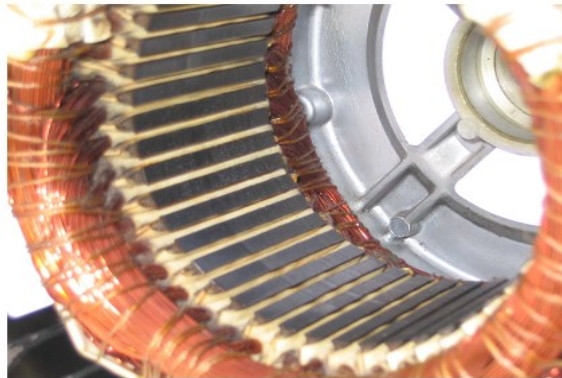


Fig.2: Stator machine synchrone

4.2 Rotor

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants [06]:

4.2.2 Rotor bobinés



Fig.3:Rotor à pôles lisses



Fig.4: Rotor à pôles saillants

4.2.2.1 Rotor à pôles saillants

Ce type de construction n'autorise pas de grandes vitesses de rotation. Forte puissance mais faible vitesse $n < 1500$ tr/min. Production d'énergie de 60 à 400 Hz dans les centrales hydrauliques, groupes électrogènes [07].

4.2.2.2 Rotor à pôles lisses

Ce mode de construction qui assure une grande robustesse mécanique est systématiquement adopté pour les alternateurs de fortes puissances dont la fréquence de rotation est élevée. Production d'énergie dans les centrales nucléaires [07].

4.2.1 Rotor à aimant permanent

Ce sont des moteurs qui peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électronique, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide [07].



Fig.5:Rotor à aimant permanent

5.Fonctionnement

5.1 Fonctionnement en moteur synchrone

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 [08].

5.2 Fonctionnement en génératrice : alternateur

5.2.1. Principe de base

La chose à ne pas perdre de vue est que la seule chose que nous attendons d'un alternateur c'est qu'il produise une tension triphasée alternative constante et symétrique. A cela doit être lié la constance de la fréquence de cette tension. Nous savons déjà que la fréquence sera fonction de la vitesse de variation du flux au droit des enroulements statoriques. Cette vitesse est fonction d'une part de la vitesse de rotation du rotor et d'autre part du nombre de paire de pôle au stator et au rotor. Il existe deux manières de construire un alternateur, soit l'inducteur est tournant soit l'inducteur est fixe [08].

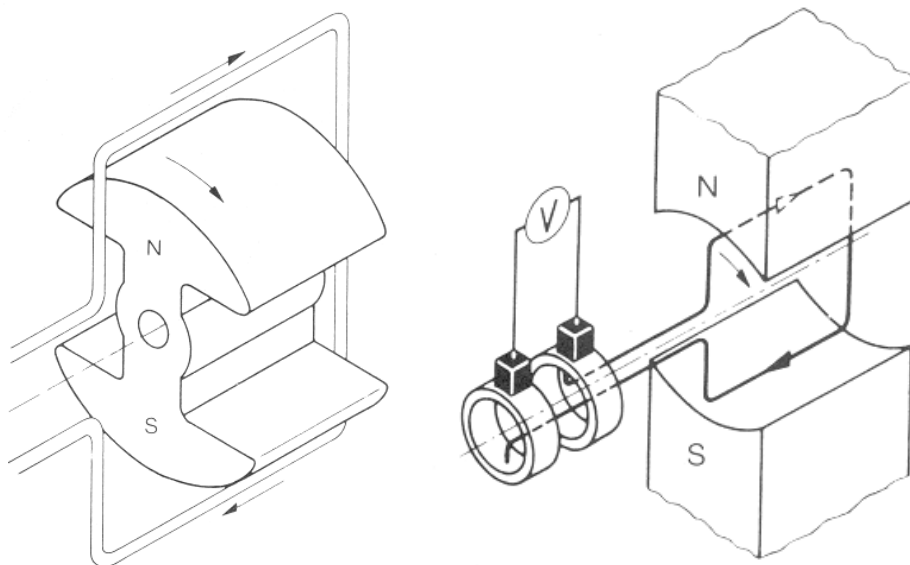


Fig.6:Principe de base du alternateur

Deux conditions sont nécessaires pour qu'un alternateur débite une tension.

- Premièrement : la mise en rotation du rotor qui se fait par l'intermédiaire d'un autre organe dit moteur. Ce dernier peut être un moteur d'entraînement électrique, un moteur à explosion ou une turbine alimentée en eau ou en vapeur. Dans tous les cas, la vitesse sera régulée par réglage du débit d'un fluide.
- Deuxièmement : la polarisation des pôles du rotor qui sera obtenue en injectant une tension continue dans le rotor (balais et bagues) et qui aura pour effet de permettre la circulation d'un courant dans les enroulements inducteurs suite à la résistance propre de ces derniers. Le sens de la polarisation des bobines sera donc fonction du sens de bobinage des enroulements. Un pôle nord doit suivre un pôle sud et précéder un pôle sud.

On peut donc dire que si les deux conditions ci-dessus sont respectées, les enroulements du stator vont voir un champ tournant. Ils vont donc être soumis à une variation de flux. Les conducteurs soumis à une variation de flux sont donc le siège d'une FEM, je peux conclure que mon alternateur débite une tension.

6. Bilan énergétique pour moteur

6.1 La puissance absorbée

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

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

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

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

6.2 Les pertes par effet joule

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

Dans le stator : pour un couplage étoile $P_{j_{st}} = 3.R.I^2$,

Pour un couplage triangle $P_{j_{st}} = 3.R.\left(\frac{I}{\sqrt{3}}\right)^2$.

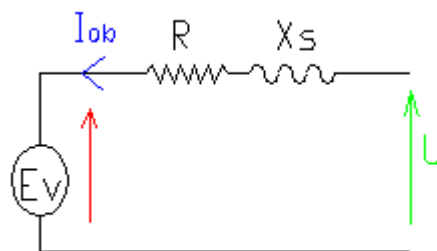
6.3 Les pertes supplémentaires

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.

6.4 Le rendement

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

7. Schéma équivalent du moteur



7.1. Equation de fonctionnement du moteur

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

8. 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 [9].

8.1 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 [9].

8.2 Utilisation d'une excitatrice

On alimente dans ce cas l'excitatrice accouplée au moteur synchrone en vue 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.[9]

8.3 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 alternatifs. On peut 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 [9].

9. Bilan énergétique pour alternateur

9.1 La puissance utile

La puissance utile vaut : en monophasé : $P = V.I.\cos\varphi$

En triphasé : $P = \sqrt{3}.U.I.\cos\phi$

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

9.2 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. 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 [8].

9.3 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 $P_{j_{st}} = 3.R.I^2$

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.

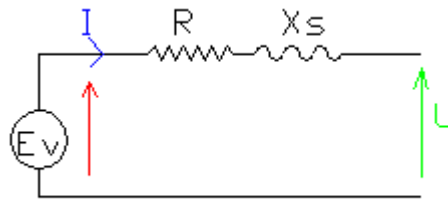
9.4 Les pertes supplémentaires

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.

9.5 Le rendement

Son expression est $\eta = \frac{P_{ut}}{P_{ut} + \text{pertes}}$

10. Le schéma équivalent de l'alternateur



10.1 L'équation de fonctionnement de l'alternateur

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

11. Mise en parallèle d'alternateur

Coupler un alternateur sur un réseau signifie simplement que l'on couple deux alternateurs en parallèle. En effet, comme le réseau est lui-même alimenté par un alternateur, dans une centrale, et que nous envisageons également d'alimenter le réseau nous réalisons bien une mise en parallèle. Il va de soi que nous devons respecter les grandeurs existantes du réseau comme la fréquence et la valeur de la tension. Il est illusoire de penser que vous parviendrez à modifier ces dernières. Pour ajuster la fréquence il nous suffira de jouer sur la vitesse du moteur d'entraînement et pour la tension il nous faudra jouer sur la valeur du courant d'excitation [9].

11.1 Conditions de couplage

Pour coupler un alternateur sur un réseau ou même sur un autre alternateur, il faut vérifier les points suivants :

11.1.1 La même fréquence

Nous avons vu dans la théorie de l'alternateur synchrone que la fréquence de la tension fournie par un alternateur synchrone dépendait du nombre de variation de flux en fonction du temps. Cette dernière est fonction de la vitesse du rotor donc de la vitesse du moteur d'entraînement. Nous devons donc régler la vitesse de rotation.

11.1.2 La même tension

Nous savons que pour qu'un alternateur synchrone délivre une tension, nous devons impérativement vérifier deux choses, la présence d'un flux d'une part et une variation de ce flux d'autre part. Pour ce dernier point nous en avons parlé ci-dessus. Pour ce qui est de la valeur du flux, nous savons qu'il est fonction du courant d'excitation. Le flux lui va induire les bobinages statoriques qui seront le siège de la FEM. Comme la tension est aux chutes de tension près égale à la FEM, je peux dire que la tension sera réglée par ce même courant d'excitation.

11.1.3 La même succession des phases

Soit les deux alternateurs représentés ci-dessous,

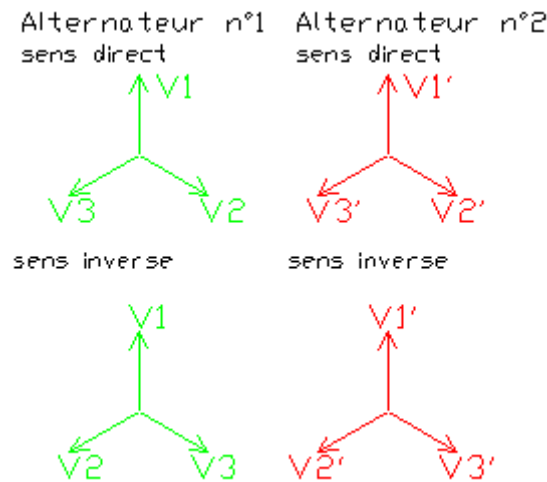


Fig.7: Conditions de couplage d'un alternateur sur réseaux ou auteur alternateur

Il est simple de comprendre que si deux alternateurs possèdent la même fréquence et la même tension, que les vecteurs $V1$ et $V1'$ sont identiques et qu'ils tournent à la même vitesse. Le potentiel entre $V1$ et $V1'$ est donc nul. Par contre, en fonction de l'ordre de succession des phases nous pourrions avoir des potentiels différents sur les autres phases. Voyons l'exemple suivant:

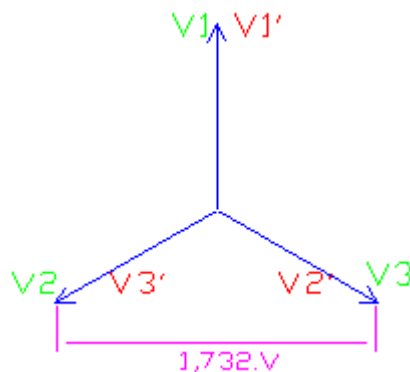


Fig.8: Exemple de couplage d'un alternateur sur réseaux

Dans cette configuration, on remarque que le potentiel entre $V2$ et $V2'$ est maximum ce qui montre bien que dans de telle condition nous ne pourrions en aucun cas réaliser la mise en parallèle car nous aurons un flash au commutateur. Nous devons donc réaliser la succession des phases de telle sorte que en tout moment, $V1$ soit sur $V1'$, $V2$ soit sur $V2'$ et $V3$ soit sur $V3'$. Cette mise en phase peut être réalisée soit en inversant le sens de rotation du moteur d'entraînement d'un des alternateurs soit en inversant deux phases sur l'un des alternateurs [9].

12. Les avantages et inconvénients d'une machine synchrone

12.1 Les avantages

- La vitesse est relativement constante, le facteur de puissance pouvant être égale à 1 en fait une machine intéressante. Le rendement est excellent.
- Il peut supporter des chutes de tension important sans décrocher.
- Fortes caractéristiques dynamiques (accélération, couple de démarrage);
- Intégration facile dans les applications d'entraînement et d'asservissement, vue l'encombrement réduit de la machine[9].

12.2 Les inconvénients

- Coût élevé.
- Difficulté de défluxage et complexité de son électronique de commande (nécessité d'un capteur de position).
- Il n'est pas associé à un variateur de vitesse, il a des difficultés à démarrer.
- Il peut décrocher en cas de forte charge (pas intéressant au niveau des ascenseurs nécessitant un couple important).
- Le moteur synchrone est difficile à démarrer. Du fait que le rotor possède un couple résistant important. Un système auxiliaire de démarrage est donc nécessaire. Il y a deux solutions à ce problème: Utiliser un moteur auxiliaire, ou utiliser le système de la cage d'écureuil [9].

13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence une introduction sur les machines synchrones qui présentent la construction simple de cette machine, ainsi que les différents modes de fonctionnement (moteur, génératrice), en plus les méthodes de démarrage sont présente, ainsi que ces avantages et inconvénients. Finalement on déduit que le machine synchrone est le plus utilisé dans le domaine de production d'énergie.

1. Introduction:

La machine synchrone est une machine réversible. Elle peut fonctionner en moteur ou en alternateur. Ce dernier fonctionnement que nous allons étudier. Dans une centrale électrique l'alternateur est entraîné par une turbine. Nous simulerons cette dernière par un moteur à courant continu à excitation shunt.



Fig.9: la manipulation d'un alternateur triphasé

2 Buts de la manipulation:

- Etude de la plaque signalétique de la machine.
- Relevé des caractéristiques de fonctionnement d'un alternateur triphasé :
 - caractéristique à vide;
 - caractéristiques pour différentes charge;
 - caractéristique en court-circuit.
- Détermination du schéma équivalent à une phase de l'alternateur à l'aide de la caractéristique de court-circuit.
- Mesure de la résistance statorique.

3. Travail à réaliser

3.1 Etude de la plaque signalétique de la machine:

La plaque signalétique de la machine:

Génératrice : $P_u=1500 \text{ W}$; $U=400 \text{ V}$; $I=2.2 \text{ A}$; $f=50 \text{ Hz}$

$N=1500 \text{ tr/min}$; $E_{exc}=43 \text{ V}$; $I_{exc} = 1.8 \text{ A}$. $p=2$

Moteur: $P_u=1500 \text{ W}$; $U=400 \text{ V}$; $I=46 \text{ A}$;

$N=1500 \text{ tr/min}$; $U_{exc}=13 \text{ V}$; $I_{exc}=0.6 \text{ A}$; $\cos\varphi = 0.68$

Telle que:

P_u : puissance utile

U : tension entre deux phase

I : courant de ligne

N : vitesse de rotation

V_{exc} : tension d'excitation

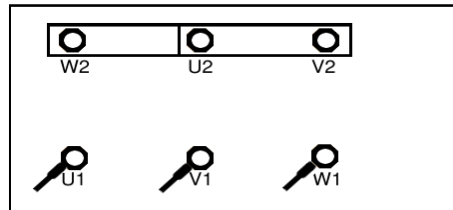
I_{exc} : courant d'excitation

$\cos\phi$: facteur de puissance

f : fréquence de synchronisme

p : nombre de pair de pôles

Type de couplage: étoile.



3.2 Caractéristiques de fonctionnement:

3.2.1 Essai à vide :

La machine synchrone étant entraînée à 1500 tr.min⁻¹ par la machine à courant continu, on fait croître progressivement, le courant d'excitation jusqu'à $I_{exc} = 1.9$ A, en mesurant la tension E_v et I_{exc} . On fait de même en faisant décroître I_{exc} . On peut alors tracer les caractéristiques $E_v = f(I_{exc})$.

▪ Tableau de mesure :

I_{exc}	0	0.71	0.81	0.97	1.10	1.20	1.43	1.53	1.66	1.70	1.75	1.8	1.9
E_v croissant (v)	0.15	222	240	260	280	290	330	340	350	355	365	370	380
E_v décroissant (v)	0.25	230	250	275	290	310	345	355	365	371	377	380	380

▪ Le schéma électrique du montage permettant d'effectuer l'essai à vide, en charge et en court-circuit:

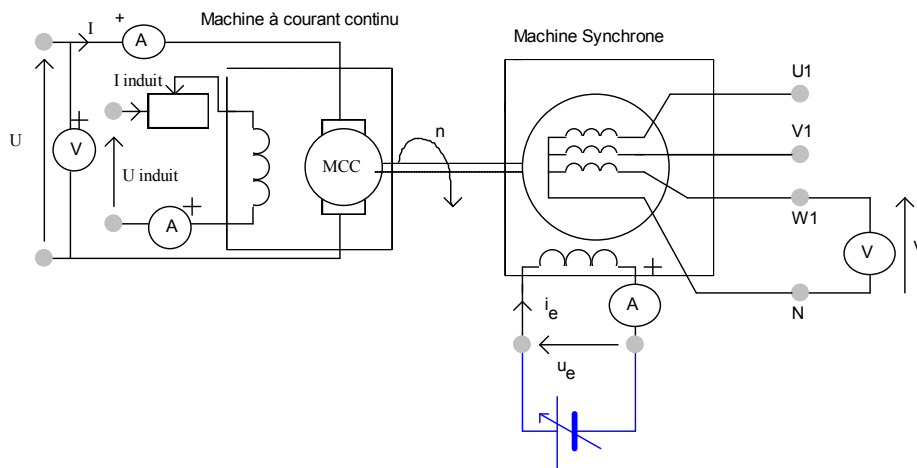


Fig 10: Schéma électrique du montage permettant d'effectuer des essais

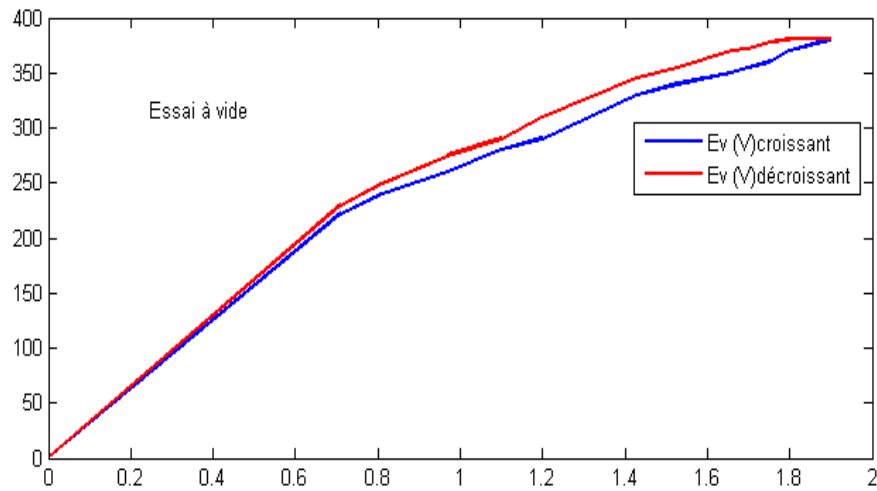


Fig 11 : la caractéristique à vide de référence $E_v=f(I_{exc})$

➤ Interprétation:

Une première constatation est que la fig.10 ne commence pas à tension nulle, en effet pour une excitation nulle. La raison en est simple, est lors de comprendre que ces noyaux de rotor conserveront toujours un petit peu de flux et que ce seul flux dit rémanent suffira à créer une tension au stator. Nous analysons à présent la courbe, nous remarquons deux zones. Pour l'une il s'agit d'une droite et pour l'autre une courbe. La droite nous montre bien le lien proportionnel entre le courant d'excitation, le flux rotorique et la FEM.

3.2.2 Essai en charge:

C'est la caractéristique $U=f(I)$ où U est la tension entre deux phases de l'alternateur et I est l'intensité efficace débitée par chaque fil de ligne, lorsque le courant d'excitation est maintenu constant, l'alternateur étant entraîné à fréquence de rotation constante.

▪ Charge résistive :

Brancher le voltmètre entre deux phase de l'alternateur. En maintenant la vitesse à 1500 tr/min, régler l'excitation de manière à ce que à vide, on ait $U=400V$

▪ Tableau de mesure:

I(A)	0	0.17	0.25	0.69	0.90
U(V)	379	354	335	290	255

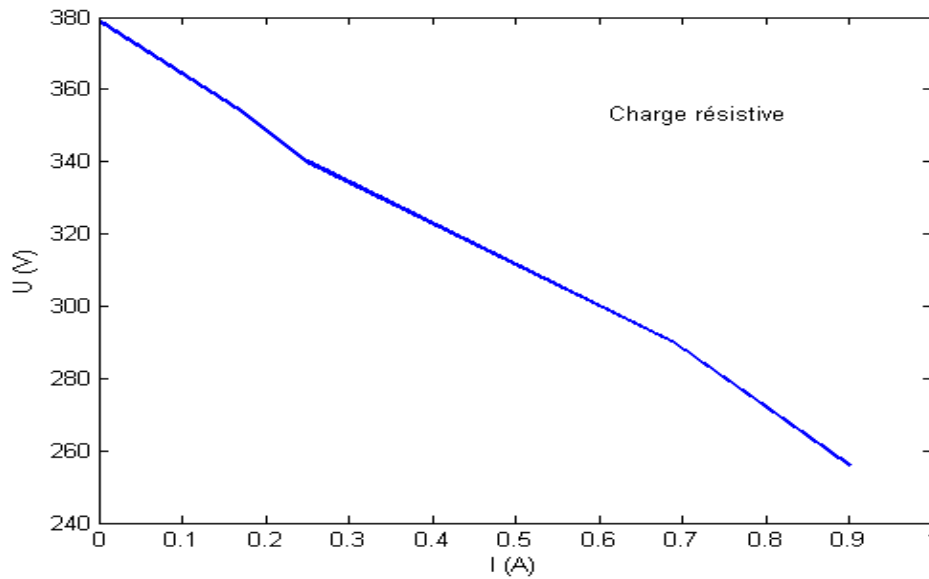


Fig 12 : la caractéristique en charge résistive $U=f(I)$

▪ **Charge inductive :**

▪ Tableau de mesure :

I(A)	0	1.01	1.20	1.35	1.50	1.70	1.80
U(V)	380	345	330	328	323	315	305

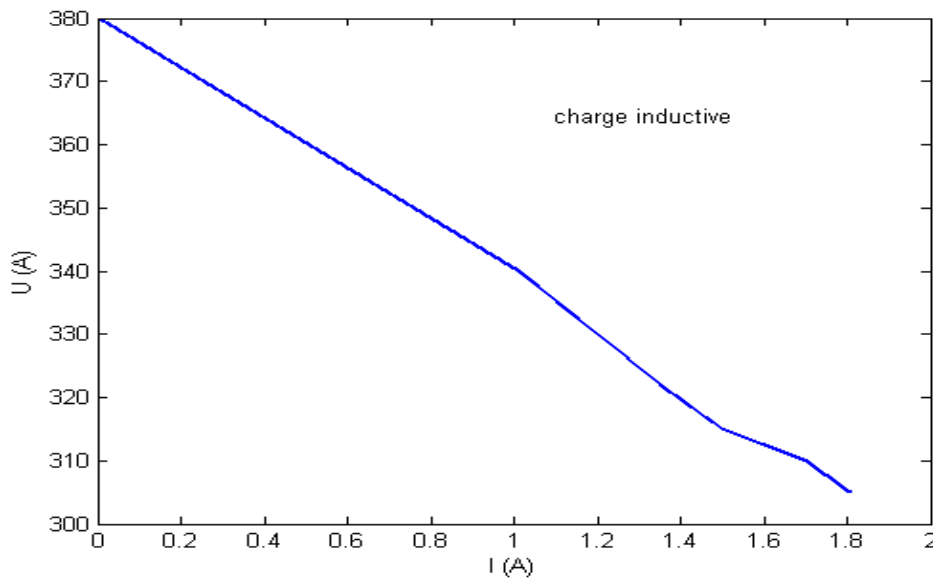


Fig. 13: la caractéristique en charge inductive $U=f(I)$

➤ **Interprétation:**

Nous pouvons vérifier que sur ce type de charge (fig.11), la tension d'exploitation diminue lorsque la charge augmente. Nous connaissons les causes de cette chute de tension. La loi d'ohm nous dit que si la résistance ne bouge pas mais que le courant qui traverse cette dernière

augmente, la tension est proportionnelle au courant. Nous devrions donc avoir une première chute de tension à l'image d'une droite. La seconde est la chute due à la FCEM. En effet, nous savons que les enroulements du stator sont balayés par le champ tournant statorique et que dès lors ils sont le siège d'une FCEM qui va s'opposer à ce qui a donné naissance à cette variation autrement dit la FEM. Cette variation sera directement proportionnelle au courant de charge et aura également comme image une droite.

L'allure de la courbe (Fig.12) s'explique de la même façon que pour la charge résistive, nous retrouvons une chute de tension ohmique, une chute de tension liée à la FCEM et une dernière fonction de la réaction d'induit. La seule différence réside dans cette dernière. Pour une charge inductive, la réaction d'induit est du type longitudinal démagnétisant ce qui sous-entend que le flux rotorique est en opposition avec le flux statorique. Le flux rotorique résultant sera donc plus faible diminuant automatiquement la valeur de la tension d'exploitation. Noter que la réaction d'induit étant plus néfaste sur charge inductive que sur charge résistive, l'effondrement de la tension d'exploitation sera d'autant plus importante.

3.2.3 Essai en court-circuit:

Le but est de mesurer la valeur de l'impédance à partir d'un essai en court-circuit puis d'en extraire la réactance synchrone connaissant la résistance. Court-circuiter les trois phases en insérant un ampèremètre dans l'une d'elles, en faisant attention de ne pas dépasser $I_{cc} = 1.5 \cdot I_n$. La vitesse du groupe est maintenue constante ($n_s = 1500$ tr/min) pendant cet essai.

Après avoir coupler le stator en étoile, entraîner le rotor (inducteur) en rotation à l'aide d'un moteur à courant continu, à la fréquence de rotation nominale de l'alternateur.

Le schéma électrique du montage permettant d'effectuer l'essai à vide.

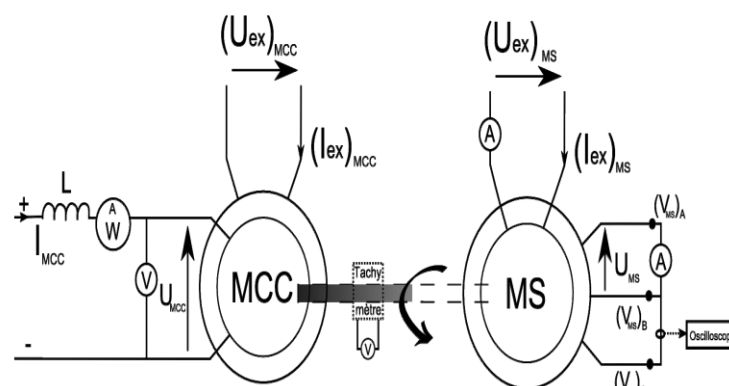


Fig14: le schéma électrique du montage permettant d'effectuer l'essai à vide.

- Tableau de mesure :

I_{exc} (A)	0.12	0.2	0.31	0.43	0.64
I_{cc} (A)	0.4	0.62	0.94	1.27	1.88

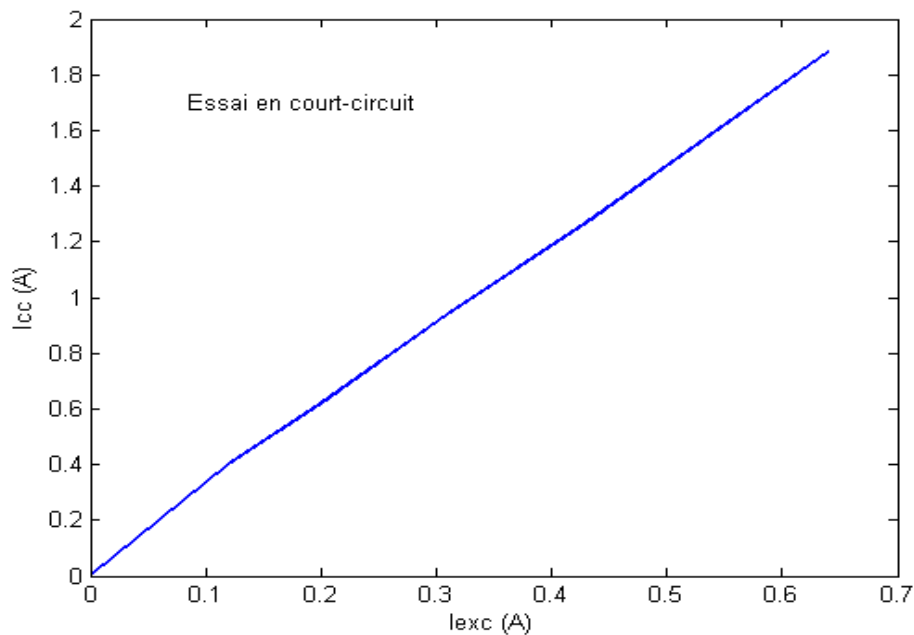


Fig 15 : la caractéristique en court-circuit $I_{cc} = f(I_{exc})$

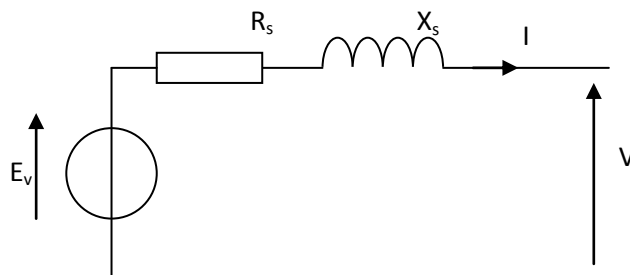
➤ Interprétation:

Etant donné que le courant de court-circuit est directement lié à la FEM puisque la tension est nulle. Dès lors comme la FEM est proportionnelle au courant d'excitation, je peux déduire que le courant de charge est proportionnel au courant d'excitation donc nous retrouvons bien une droite.

4. Modèle de Behn-Eschenburg :

4.1 Mesure de la résistance statorique:

Lorsque la machine synchrone n'est pas saturée, on peut, pour étudier son fonctionnement, proposer le modèle équivalent de Behn-Eschenburg :



La résistance R_s , correspond à la résistance de l'induit par phase. On la détermine par une ohmmètre ($R_s =$).

4.2 Détermination de la réactance synchrone de l'alternateur :

Pour trouver cette valeur « X_s », nous devons réaliser deux essais, un essai à vide et un essai en court-circuit. Comme nous prenons comme hypothèse que le circuit magnétique est non saturé, nous pouvons dire que la caractéristique à vide est une droite. La caractéristique elle étant également une droite. Noter que cette méthode de calcul est approximative et est une méthode par excès.

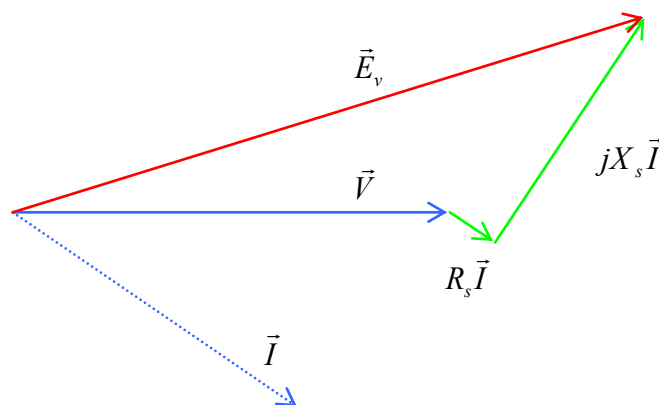
$X_s = L_s \cdot \omega$ correspond à la réactance synchrone, L_s est appelée inductance synchrone et englobe l'inductance de fuite par phase et l'inductance équivalente qui traduit la chute de tension due à la réaction magnétique d'induit (machine à pôles lisses).

E_v correspond à la force électromotrice à vide de la machine, et dépend, du courant d'excitation circulant dans la roue polaire.

On a alors les deux caractéristiques $I_{cc} = f(I_{exc})$ et $E_v = f(I_{exc})$. Pour un courant d'excitation donné (zone linéaire), on connaît donc I_{cc} et E_v . Lorsque l'on est en court-circuit, en appliquant la loi d'ohm sur le modèle équivalent, on obtient:

$$E_v - Z_s I_{cc} = 0 \text{ d'ou } Z_s = \frac{E_v}{I_{cc}} \text{ avec: } Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \text{ donc } X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} .$$

On obtient, pour $I_{exc} = 0.71$ A (zone de non-saturation), $E_v = 222$ V et $I_{cc} = 1.95$ A. On en déduit: $Z_s = 114 \Omega$ et $X_s \approx 114 \Omega$.



Le modèle de Behn-Eschenburg est très intéressant par sa simplicité. Cependant, il peut conduire à des erreurs importantes et il n'est valable que dans la zone linéaire. En effet, il ne tient pas compte de la saturation.

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'un alternateur triphasé pour identifier le modèle équivalent de Behn-Eschenburg est très intéressant. Pour réalise ce modèle en base sur différent test pratique. Les tests réalise dans ce travail sont trois essais principale, essai à vide, en charge et court-circuit pour obtenir les caractéristiques mécanique et de fonctionnement.

1. Introduction

Ce chapitre a été conçu dans le but de regrouper dans un ouvrage la majorité des commandes et fonctionnalités utiles à la conception et à la simulation de modèles sous *Simulink/SimPowerSystems*.

Ce chapitre n'a aucune vocation à faire de vous des professionnels de *SimPowerSystems*, il est là comme un outil d'aide à la conception sous *SimPowerSystems* et son usage dépendra de ce que chacun en fera, selon ses compétences propres et son désir d'investigation personnel. Il est néanmoins utile de savoir quelles sont les possibilités offertes par *SimPowerSystems*, et jusqu'où nous pouvons aller afin de concevoir des modèles les plus accessibles à nos élèves, et d'exploiter les résultats de la manière la plus conviviale possible [10].

2. Présentation

- **Simulink**: est un outil de conception visuel, intégré à l'environnement MATLAB. Il fournit un environnement de modélisation graphique par schéma-blocs.
- **SimPowerSystems**: modélisation de systèmes d'électrotechnique et d'électronique de puissance.

3. Objectif du travail

L'étude de machines synchrones fonctionnée comme alternateur triphasé et l'utilisation de simulation par Matlab (*SimPowerSystems*).

3.1 Les indications pour l'exécution du travail

Il est souhaitable de commencer ce laboratoire après l'étude théorique de la machine synchrone triphasée à pôles saillants. Pour cela, on peut se servir de n'importe quel document consacré à l'étude de ces types de machines.

3.2 Contenu du travail

- ✓ Le relevé de la caractéristique mécanique de la machine en régime d'alternateur.
- ✓ Le relevé des caractéristiques de fonctionnement de la machine en régime d'alternateur.

3.3 La description de l'installation du laboratoire virtuel

L'installation du laboratoire virtuel est représentée dans la fig18.

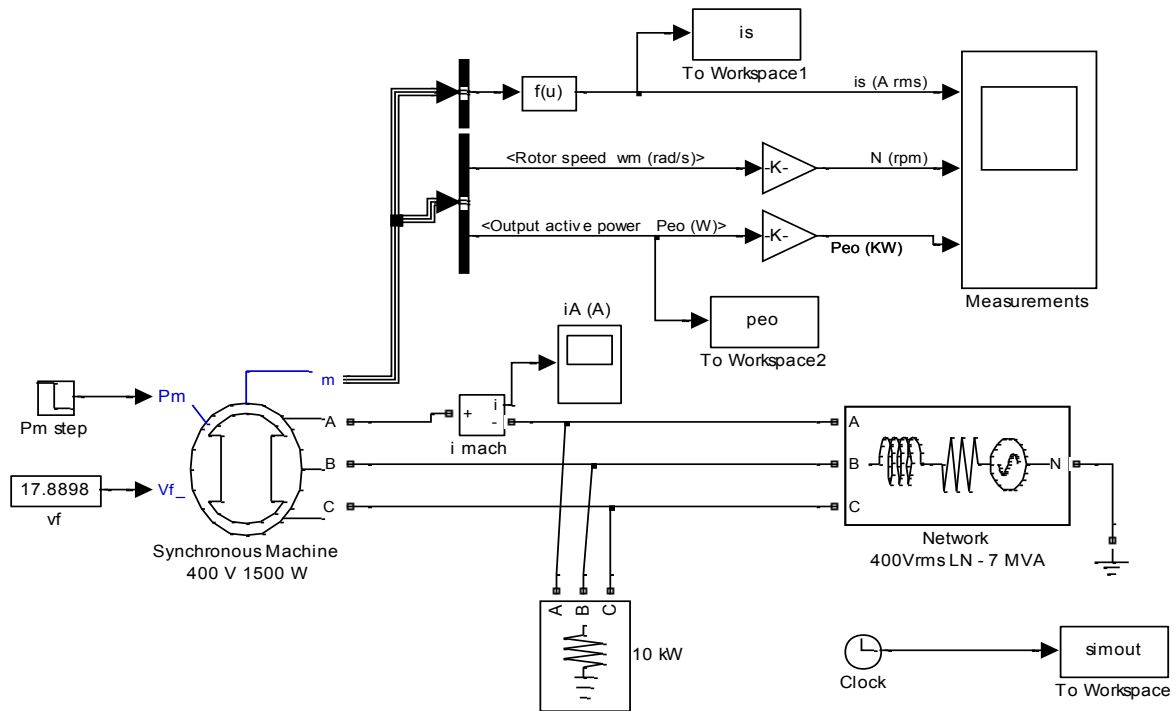


Fig.16: Modèle pour l'étude de machine synchrone

Elle comprend :

- ✓ une machine synchrone triphasée synchronous Machine de la bibliothèque Power System Blocset / Machines.
- ✓ une source de tension triphasée alternative Source de la bibliothèque Power System Blocset/ Extras/ Electric Sources.
- ✓ un bloc de mesure de la courant curent Measurement de la bibliothèque Power System Blocset / Extras/ Measurement.
- ✓ un bloc Mux, qui réunit trois signaux en un seul signal vectoriel bibliothèque Simulink / signal & System.
- ✓ un bloc Scope pour la visualisation des courants du stator, ainsi de la vitesse et du moment de la machine synchrone bibliothèque principale Simulink / Sinks.
- ✓ Charge RLC triphasé en série Three-Phase series RLC load de la bibliothèque Power System Blocset / Extras / Elements.

La fenêtre de réglage des paramètres de la machine est dans la fig19:

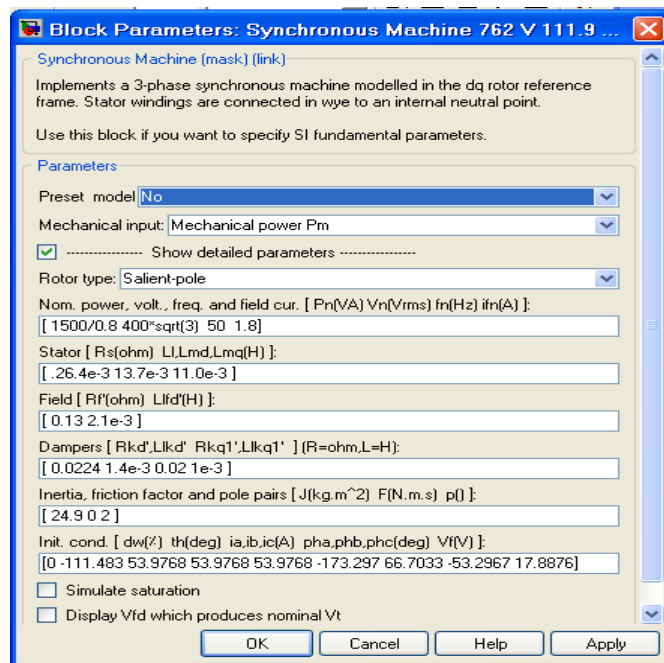


Fig.17: Fenêtre de réglage des paramètres de la machine synchrone

Dans les domaines de cette fenêtre on donne successivement :

- ✓ la puissance, la tension linéaire nominale effective et la fréquence.
- ✓ le type de rotor (rotor type), dans le menu contextuel de ce domaine on peut donner soit pôles saillant, soit pôles lisse.
- ✓ la puissance, la tension linéaire nominale effective et la fréquence.
- ✓ les paramètres du schéma équivalent du stator.
- ✓ le moment d'inertie, le coefficient de frottement, le nombre de paires de pôles

Bloc baromètre de réseaux:

- ✓ La tension et la fréquence du réseau triphasé.

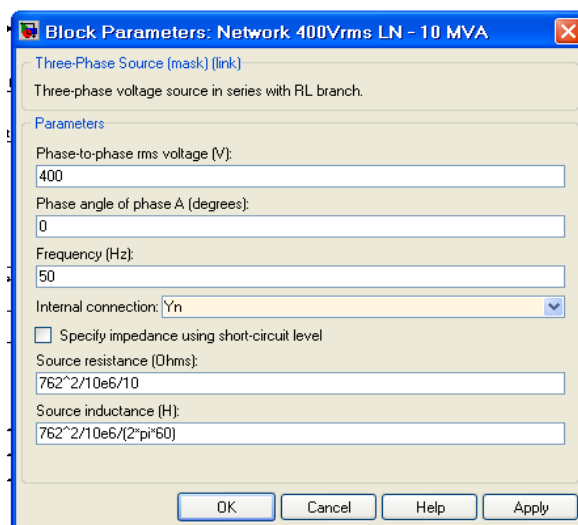


Fig.18: Fenêtre de réglage des paramètres des réseaux triphasés

Bloc baromètre de la charge:

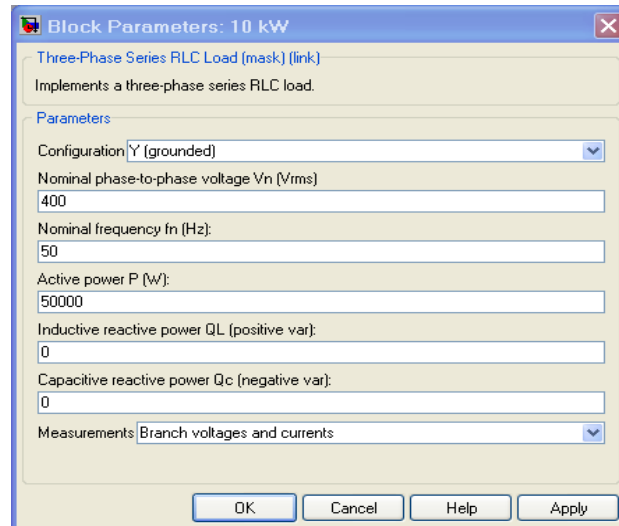
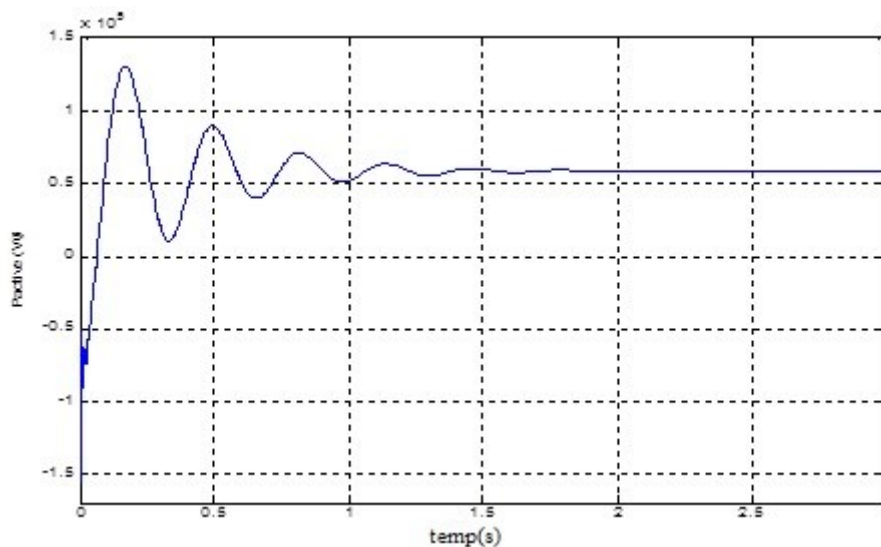


Fig19:Fenêtre de réglage du bloc baromètre de la charge

- ✓ La tension et la fréquence et la puissance active de la charge.

4. Résultats de simulation

La démo de power_simplealt (fig.18) utilise le bloc de la machine synchrone simplifiée pour représenter un 1000 MVA, 315 kV, 50 Hz, source équivalente connectée à un bus infini. Le bloc simplifié synchrone machine (unités SI) est utilisé comme un générateur synchrone. La résistance interne et la réactance sont fixés respectivement à 0,02 pu (1,9845 Ω) et 0,2 unité centrale ($X=19,845 \Omega$, $L=0,0526$ H). L'inertie de la machine est $J=168,870$ kg.m², correspondant à une inertie constante $H=3$ s. La fréquence électrique est $\omega s=2 * \pi * 50=314$ rad / s. La machine comporte deux paires de pôles tels que sa vitesse de synchronisme est de $2 * \pi * 50 / 2 = 157$ rad/s ou 1500 tours par minute.



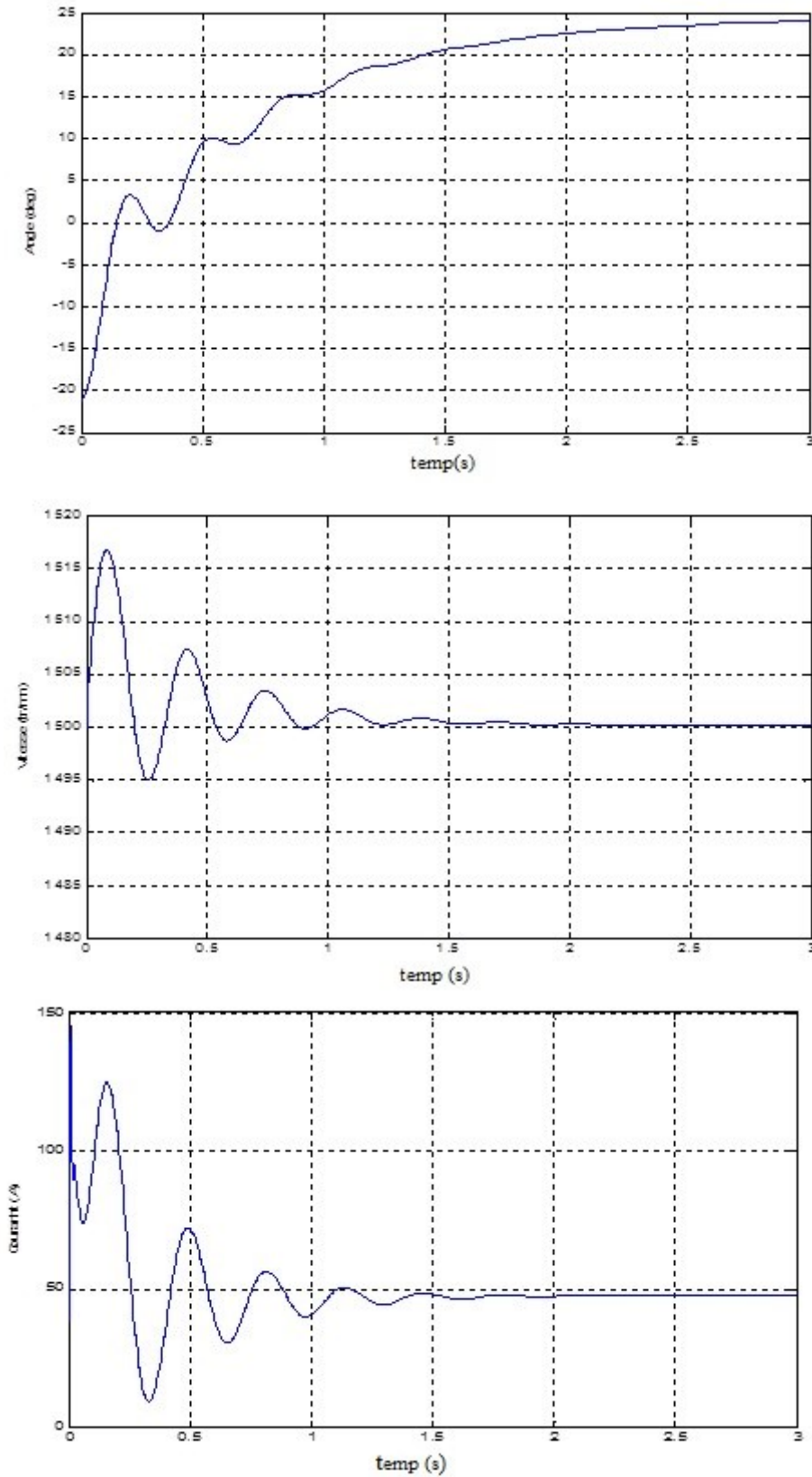


Fig.20: La caractéristique mécanique d'un alternateur

Dans cette démo (fig.18), une étape est effectuée sur la puissance mécanique appliquée à l'arbre. La machine est initialement fonctionne en régime permanent avec une puissance mécanique de 50 KW. A $t=0,5$ s, la puissance mécanique est augmenté brusquement à 1000

MW. En observer le régime transitoire électromécanique dans les figures afficher l'angle de puissance δ en degrés, la vitesse de la machine, et l'énergie électrique.

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'un alternateur triphasé à l'aide matlab/simulink, la simulation et l'analyse de système dynamiques (variable en fonction du temps) à partir de blocs.

Conclusion générale

A la fin de cette étude sur la machine synchrone, on peut extraire ce qui suit :

- la machine synchrone est la plus utilisée dans le domaine de production d'énergie.
- la modèle équivalent de Behn-Eschenburg est très important, pour le réalise aux en base sur différents tests pratiques. Les tests réalisés dans ce travail sont trois essais principaux, essai à vide, en charge et court-circuit pour obtenir les caractéristiques mécaniques et de fonctionnement.
- les résultats obtenus par voie de simulation donné une vision assez claire sur le comportement et les caractéristiques électriques de la machine synchrone.

Bibliographies

- [01] <http://fr.wikiversity>
- [02] fr.scribd.com/doc/220983367/6-alter-1213
- [03] A. Kaddouri, " Etude d'une Commande Non-Linéaire Adaptative d'une Machine Synchrones à Aimants Permanents ", Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval Québec, Nov 2000
- [04] <http://webcache.googleusercontent.com>
- [05] B. Multon, " Application des aimants aux machines électriques ", ENS Cachan –Antenne de Bretagne, Notes de cours version 2006
- [06] Annane Adel "Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable" mémoire de magister, université d'Annaba, 2009/2010.
- [07] http://membres.multimania.fr/electrodoc/machine_synchrone.htm .
- [08] Technicien Electricien-Automaticien- Formation - Cours techniques- Machine tournante a courant alternatif, les machines synchrones," l'alternateur", <http://phtelec.be/menu.html>
- [09] Cours d'électrotechnique," Partie N 3 : le moteur", <http://phtelec.be/menu.html>
- [10] Présentation –Formation Matlab–Simulink–Simscape, David Letranchant, Lycée Blaise Pascal Châteauroux