

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département de l'Electrotechnique*



MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

Thème

*Analyse et simulation d'un ensemble
turbine-alternateur-charge dans les réseaux
embarqués*

Proposé et dirigé par :
Mr. M'hemed RACHEK

Présenté par :
Mr. BENCHABANE Akli
Mr. SADEG Smail

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

À l'issue de ce travail, nous tenant à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur, monsieur M'hemed RACHEK, docteur d'état en électrotechnique (maitre assistant chargé de cours) pour nous avoir encadré tout au long de notre projet. Aussi nous tenant à lui reconnaître le temps précieux qu'il nous a consacré.

On tient à remercier très sincèrement le président et les membres de jury, pour nous avoir honorés en acceptant d'évaluer notre travail.

DIDICACES

Dédicaces

Akli

Je dédie ce modeste travail à tous les membres de ma famille, qui m'ont soutenu de près ou de loin tout au long de ce travail, surtout mes parents.

- *Mon frère Essaid sa femme Cristine et leurs enfants Yanis et Amilia*
- *Mon frère Arab sa femme Farida et leurs enfants Lisa et Rayane*
- *Mon frère Hocine et sa femme Djamila*
- *Ma sœur Fatiha et son mari Amrane et leurs fille Lina*
- *Ma sœur Anissa et son mari Arezki*
- *Mon frere Amar*
- *Toute ma famille et mes amis sans exception*
- *A mon binôme Sadeg smail et toute sa famille*

Smail

Je dédie ce modeste travail à tous les membres de ma famille, qui m'ont soutenu de près ou de loin tout au long de ce travail, surtout mes parents.

- *Mes frères Omar Mourad et Boualem et leurs femmes*
- *Mes sœurs et leurs maries.*
- *Toute ma famille et mes amis sans exception*
- *A mon binôme Benchabane Akli et toute sa famille*

SOMMAIRE

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
CHAPITRE I : Génialités et présentation de la propulsion électrique	
<i>Introduction</i>	4
<i>I-1) Historique de la propulsion des navires</i>	4
<i>I-1-1) Propulsion motorisée</i>	4
<i>I-1-2) Propulsion électrique des navires</i>	5
<i>I-2) Composition de la propulsion électrique</i>	5
<i>I-2-1) L'hélice</i>	6
<i>I-2-2) Le gouvernail</i>	7
<i>I-2-3) Convertisseurs de puissance utilisés en propulsion électrique</i> ..	8
<i>I-2-4) Moteurs électriques</i>	8
<i>I-3) Les différentes structures des machines électriques pour les POD</i>	9
<i>I-3-1) La machine synchrone à rotor bobiné à double étoile</i>	9
<i>I-3-2) Les machines à aimant permanent</i>	9
<i>I-3-3) La machine asynchrone</i>	12
<i>I-3-4) Machine synchrone double étoile</i>	12
<i>I-3-5) Machines polyphasées</i>	13
<i>I-4) Modélisation et stabilité des réseaux</i>	14
<i>I-4-1) La stabilité des réseaux</i>	14
<i>I-4-2) comportement des réseaux électriques</i>	16
<i>I-4-3) Stabilité statique</i>	18
<i>I-4-4) Stabilité dynamique</i>	21
<i>I-5) Méthode de modélisation</i>	23
<i>I-6) les logiciels d'études des réseaux électriques</i>	24
<i>I-6-1) CYMSTAB (analyse de stabilité transitoire)</i>	24
<i>I-6-2) Logiciel G.T.A (group turbo alternateur)</i>	25
<i>I-6-3) Logiciel PSAF</i>	27
<i>I-6-4) Logiciel MATLAB</i>	27
CHAPITRE II : Présentation et modélisation de la machine asynchrone	
<i>Introduction</i>	30
<i>II.1) Constitution de la machine</i>	30
<i>II.2) Description de la machine Asynchrone</i>	30
<i>II.2.1) Hypothèses simplificatrices et conventions de signes</i>	32
<i>II.3) Equations générales de la machine non saturée</i>	32
<i>II.3.1) Modèle en plan abc</i>	32
<i>II.4) Transformation de Park</i>	35
<i>II.4.1) Equations des tensions dans le plan dqo</i>	36
<i>II.4.2) Equations des flux dans le plan dqo</i>	38
<i>II.5) Expression de la puissance et de couple dans les axes d et q</i>	39
<i>II.6) Equation mécanique de la MAS</i>	41
<i>II.7) Choix de référentiel</i>	41
<i>II.8) Schéma équivalent de la MAS dans le référentiel stationnaire</i>	43

<i>II.10) Modèle de simulation de la MAS.....</i>	<i>46</i>
<i>II.11) Implémentation du modèle de la machine asynchrone en vue de sa simulation.....</i>	<i>48</i>
<i>II.11.1) Les schémas blocs.....</i>	<i>49</i>
<i>II.12) Simulation de la machine.....</i>	<i>53</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>56</i>

CHAPITRE III : Présentation et modélisation de la machine synchrone

<i>Introduction.....</i>	<i>58</i>
<i>III-1) Structure des machines synchrone à inducteur bobine.....</i>	<i>59</i>
<i>III-2) Description de la machine synchrone.....</i>	<i>59</i>
<i>III-3) Modèle en abc du moteur synchrone.....</i>	<i>61</i>
<i>III.3.1) Equations électriques.....</i>	<i>61</i>
<i>III-4) Choix des différents repères.....</i>	<i>64</i>
<i>III-5) Modèle de la MS dans le plan dqo.....</i>	<i>64</i>
<i>III-6) L'équation des flux statorique dans le plan dqo.....</i>	<i>66</i>
<i>III-6-1) Etablissement des équations électriques.....</i>	<i>66</i>
<i>III-6-2) Etablissement de l'équation de couple.....</i>	<i>68</i>
<i>III-7) Equation mécanique.....</i>	<i>69</i>
<i>III.8) Schéma équivalents de la MS.....</i>	<i>70</i>
<i>III-9) Diagrammes vectoriels en régime permanent.....</i>	<i>71</i>
<i>III.10) Modèle de la simulation de la MS.....</i>	<i>75</i>
<i>III-11) Les blocks de simulation de la machine synchrone.....</i>	<i>78</i>
<i>III-12) simulation de la machine.....</i>	<i>83</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>85</i>

Chapitre IV : présentation et simulation de réseau électrique embarqué

<i>Introduction.....</i>	<i>87</i>
<i>IV.1) Présentation générale de la simulation à réaliser.....</i>	<i>88</i>
<i>IV.2) Description des module.....</i>	<i>90</i>
<i>IV.2.1) La turbine à gaz ou le diesel.....</i>	<i>90</i>
<i>IV.2.2) L'alternateur.....</i>	<i>90</i>
<i>IV.2.3) Le bus de puissance.....</i>	<i>90</i>
<i>IV.2.4) Les charges.....</i>	<i>91</i>
<i>IV.3) Modélisation des modules cités.....</i>	<i>92</i>
<i>IV.3.1) La turbine à gaz.....</i>	<i>92</i>
<i>IV.3.2) La machine synchrone utilisée en générateur.....</i>	<i>94</i>
<i>IV.3.3) Le bus de puissance.....</i>	<i>95</i>
<i>IV.3.4) La modélisation « P, Q » de la propulsion et de l'hôtellerie.....</i>	<i>96</i>

<i>IV.4) Réalisations et résultats.....</i>	<i>98</i>
<i>IV.4.1) Matériel et logiciels utilisés.....</i>	<i>98</i>
<i>IV.4.2) Système simulé.....</i>	<i>98</i>
<i>IV.5) Simulation du réseau embarqué tout électrique.....</i>	<i>99</i>
<i>IV.6) Couplage d'alternateur au réseau et équilibrage des puissances.....</i>	<i>99</i>
<i>IV.6.1) Conditions d'un couplage correct d'alternateur au réseau.....</i>	<i>99</i>
<i>IV.6.2) Répartition des puissances entre les turbines des alternateurs.....</i>	<i>100</i>
<i>IV.7) Simulation de réseau embarqué.....</i>	<i>107</i>
<i>IV.7.1) Simulation du réseau sans les turbines à gaz.....</i>	<i>107</i>
<i>IV.7.2) Répartition de la charge.....</i>	<i>107</i>
<i>IV.7.3) Allure de la tension du réseau avec le couplage/découplage.....</i>	<i>109</i>
<i>IV.7.4) Etude du courant de charge lors du couplage/découplage.....</i>	<i>110</i>
<i>IV.8) Simulation du réseau avec les turbines à gaz.....</i>	<i>110</i>
<i>IV.8.1) Répartition de la charge avec couplage/découplage.....</i>	<i>111</i>
<i>IV.8.2) Etude de la tension du réseau avec le couplage/découplage.....</i>	<i>112</i>
<i>IV.9) Ramener toute la simulation au référentiel (d,q.....</i>	<i>113</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>113</i>
<i>Conclusion générale</i>	<i>116</i>
<i>Bibliographie</i>	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie, le transport et le développement durable entretiennent ensemble de fortes relations. À la fois, les militaires comme le monde civil sont intéressés par le développement de nouvelles énergies qui peuvent être embarquées ou utilisées dans les objets nomades. De nouvelles technologies comme les nanotechnologies en font partie. Ce n'est seulement par la recherche fondamentale que des progrès pourront être obtenus dans le domaine des énergies embarquées.

Le navire tout électrique initie une véritable révolution dans la Marine nationale. Il s'agit de rationaliser l'utilisation de l'électricité par une approche globale de tous les besoins en énergie, afin d'améliorer les performances et la sécurité tout en réduisant les coûts. Pour atteindre ces objectifs il est nécessaire que tout au long de la chaîne conception, réalisation et exploitation, les ingénieurs disposent de moyens leur permettant de comprendre, d'analyser et de reproduire le comportement des systèmes d'énergie électrique.

Cette analyse passe naturellement aujourd'hui par la modélisation puis la simulation des systèmes électriques. Pour simuler des problèmes de plus complexes et si riches en enjeux, on fait appel à des méthodes de simplification, mais ces méthodes de calcul doivent s'adapter à ces évolutions.

Notre travail portera plus particulièrement sur l'étude de quelques éléments de ces réseaux embarqués, la turbine, l'alternateur synchrone, le moteur asynchrone, puis la charge. Il est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre on a donné des généralités et la présentation des éléments de la propulsion électrique, où on a cité quelques logiciels de simulation.

Dans le deuxième chapitre on l'a consacré pour le moteur Asynchrone dont on a fait la modélisation de la machine on utilisant la méthode de simplification de PARK, puis on a dressé ces schémas block sous Matlab/Simulink, puis on a terminé par la simulation de ce moteur en donnant quelques résultats graphiques.

Et de même manière que le chapitre deux, dans le chapitre trois on a fait la modélisation puis la simulation de la génératrice synchrone.

Introduction générale

On a terminé avec le chapitre quatre en donnant des concepts généraux sur la turbine a gaz, en suite on a fait la construction du schéma globale qui comporte trois turbines reliaient a trois alternateurs (1 alternateur principale, et 2 alternateurs auxiliaires), qui alimente le réseau de consommation qui comporte des charges (le moteur de propulsion, lampes, prises, climatisation, le bord ...etc.). Et a la fin de ce chapitre on a fait la simulation générale du système globale, on donnant quelques résultats graphique.

Et on termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I

GENERALITE ET ELEMENTS

CONSTITUTIF DE LA

PROPULSION ELECTRIQUE

Introduction

Dès la préhistoire, l'homme construisit des embarcations fluviales, des pirogues creusées dans des tranches d'arbres, des canoës en peau, des radeaux de roseaux. Cette idée de construction a commencée vers 2500 ans AV.J.C.

Un bateau, est un bâtiment flottant à la surface d'eau, destiné au transport de passagers ou de marchandises .En général, un bateau désigne un petit bâtiment, tandis qu'un navire est de plus fort tonnage.

I-1) Historique de la propulsion des navires

La propulsion maritime désigne l'ensemble des systèmes qui permettent aux navires et bateaux de se déplacer, elle est effectuée par un propulseur entraîné par un moteur. Le propulseur peut être une force naturelle (courant d'un fleuve entraîné par la gravité), une force animale (halage), ou un système mécanique qui transforment soit une énergie extérieure (une voile utilisant la force des vents), soit une énergie embarquée (une hélice entraînée par un moteur). [1]

I-1-1) Propulsion motorisée

La propulsion motorisée consiste à actionner un propulseur grâce a un moteur. Ce système était introduit au début du XIXème siècle avec la machine à vapeur actionnant une roue à aube, l'énergie étant fournie par la combustion du charbon. Les premiers travaux et applications pratiques, furent réalisés par l'américain ROBERT FULTON dès 1803. Depuis d'autres systèmes plus efficaces ont étaiés créés. Dans toute propulsion motorisée, on peut distinguer trois fonctions principales, à savoir la transformation par un moteur d'une source d'énergie stockée à bord, en énergie mécanique, la transmission de cette énergie vers le propulseur, et la transformation de cette énergie en force motrice par le propulseur.

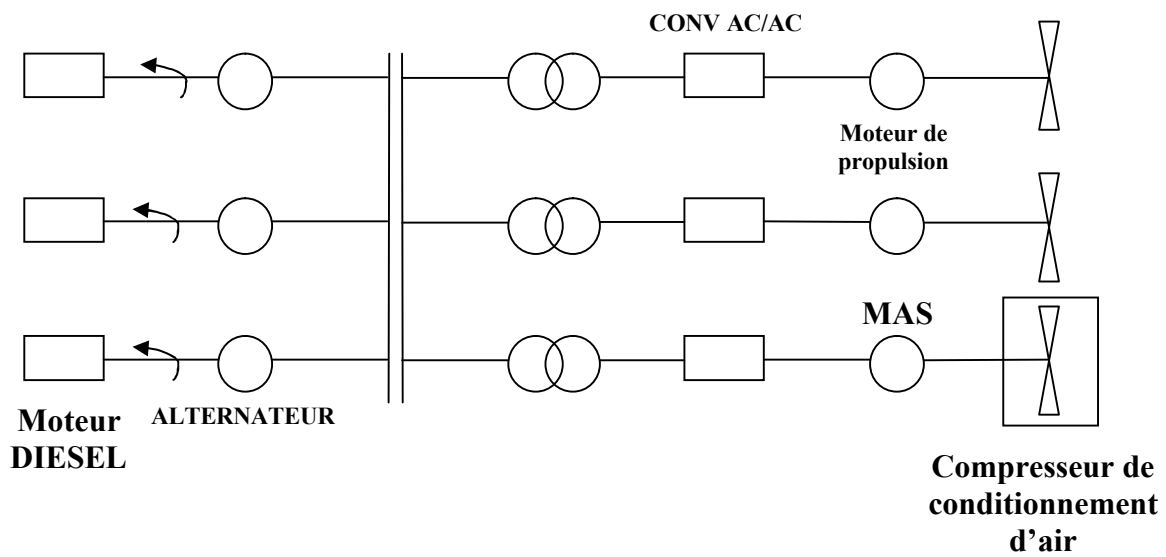
I-1-2) Propulsion électrique des navires

Les propulsions électriques de navire ont connues une très grande progression ces vingt dernières années. Après les bateaux de croisières et les tankers, plusieurs marines nationales s'intéressent actuellement aux navires tout électriques. Comme pour les réseaux terrestres, les contraintes sur la qualité de ces réseaux embarqués sont de plus en plus exigeantes. La puissance de ces réseaux est relativement faible, comparée aux réseaux terrestres. Ceci rend quelques hypothèses simplificatrices à la limite de validité. La propulsion électrique des navires est une méthode maritime, où celle-ci est assurée par un moteur électrique. L'énergie électrique nécessaire y est généralement produite par des systèmes moteur-thermique alternatif. Cette technologie nous conduits à la propulsion directe ou des moteurs thermiques (à vapeur ou à combustible interne) entraînent directement les hélices. Elle est comparable à celle des voitures hybrides, avec toutes ses variantes, bien qu'étant nettement plus nature que cette dernière.

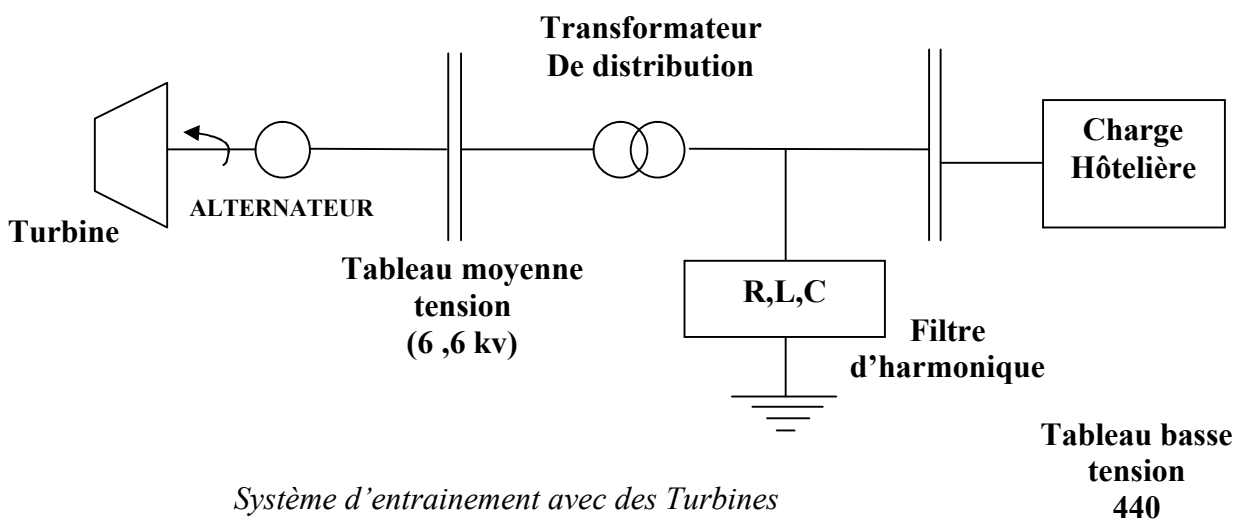
I-2) Composition de la propulsion électrique

La centrale d'énergie comprend plusieurs alternateurs entraîné soit par de moteur diesel, soit par des turbines a gaz. Elle alimente tous les utilisateurs du bord et notamment un ou plusieurs équipements de propulsion. L'équipement de propulsion comprend un moteur électrique à vitesse variable associé à un convertisseur, ou très rarement un moteur à vitesse fixe entraînant une hélice à pas variable. [2]

On peut aussi représenter le réseau sur la (fig. I.1) de façon générale, en tenant compte de toutes les charges :



Système d'entraînement avec des moteurs diesel



Système d'entraînement avec des Turbines

Fig. (I-1) : Réseau embarqué avec système de propulsion.

I-2-1) L'hélice :

L'hélice est actuellement le propulseur le plus employé, dans sa forme la plus simple et la plus courante, on trouve l'hélice à pas fixe placée généralement à l'arrière du navire, elle tourne autour d'un axe horizontal, et génère une poussée qui fait avancer le navire. Le nombre de pôles des hélices peut varier de 2 à 3 pôles pour les petites embarcations, 4 pôles comme la majorité des navires de commerce, ou 7 à 8 pour les sous marins. [2]

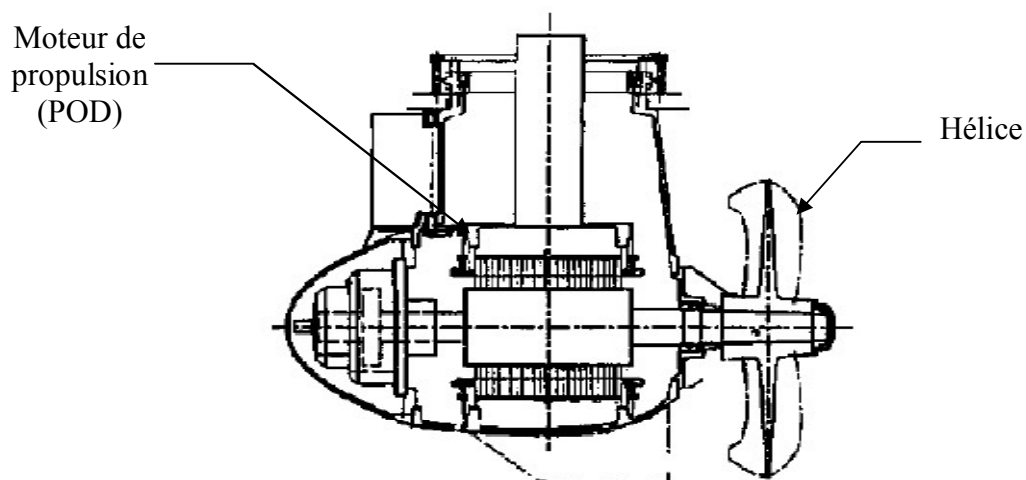


Fig. (I-2) : Représentation d'une hélice [3]

I-2-2) Le gouvernail

Sur un bateau à propulsion humaine, un système pour contrôler la direction peut ne pas être nécessaire, il le devient en cas de propulsion mécanique ou vélique. Le dispositif le plus courant est un gouvernail constitué d'un safran plan immergé à l'arrière de la coque, pouvant être braqué pour générer une force latérale servant à faire tourner le bateau. Le safran est braqué par la barre, actionnée manuellement ou par un pilote automatique. Le gouvernail peut être supprimé quand le propulseur est orientable : moteur hors-bord, pods. [2]

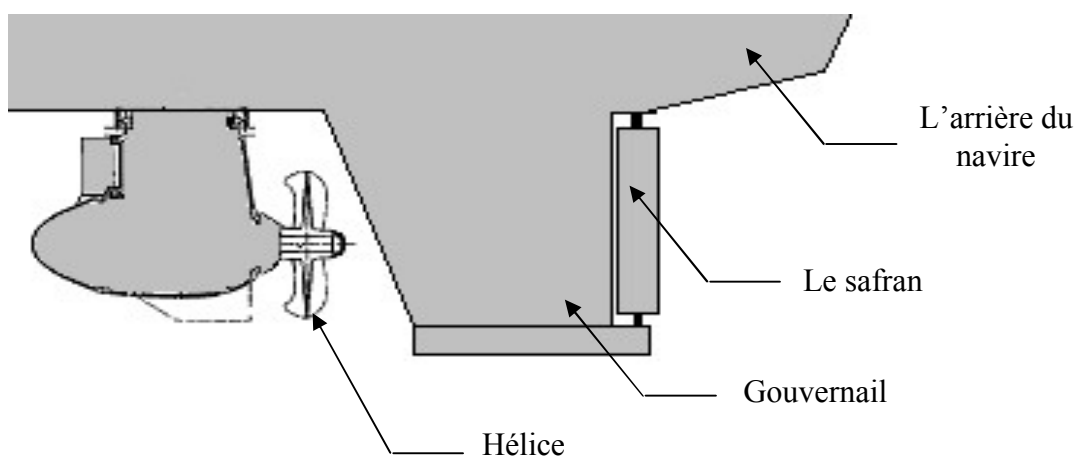


Fig. (I-3) : Vue d'un gouvernail derrière une hélice

I-2-3) Convertisseurs de puissance utilisés en propulsion électrique

Les machines synchrones sont préférés aux machines asynchrones pour leurs aptitudes à fournir des entrefers importants sans être pénalisés par des courants magnétisant anormalement élevés, pour cela l'association cyclo-convertisseur moteur synchrone est utilisée. Cette solution est particulièrement adaptée aux navires brise glace qui nécessitent un couple élevé à basse vitesse, il est aussi possible de libérer une hélice prise dans la glace sans caler l'hélice. L'association synchro-convertisseur moteur synchrone est meilleure pour tout entraînement propulsif des navires autres que brise glace du fait de ses qualités intrinsèques de simplicité et de fiabilité.

Les Onduleurs à commutation forcés associés a un moteur synchrone sont utilisés dans les navires équipés de nombreux propulseurs de faible puissance. En fait, elle présente des limitations à la fois au niveau puissance maximale et au niveau vitesse de moteur.

Quelque soit le type de convertisseur utilisé, dans la plupart des cas le moteur de propulsion et accouplé directement a la ligne d'arbre , cependant , quand l'enroulement et le poids doivent être limité la solution a retenir est un moteur a vitesse élevée associer a un réducteur. Les moteurs diesels sont dissociés de la ligne d'arbre, ce qui permet d'implanter les matériels au meilleur emplacement possible et d'obtenir des gains de place substantielle. [3]

I-2-4) Moteurs électriques

Dans le domaine de la propulsion électrique, différents types de moteurs associés aux convertisseurs statiques ont été utilisés. Le moteur à courant continu associé a son redresseur, est une solution pratiquement abandonnée dans la propulsion marine. Par contre les moteurs synchrones à excitation associés aux synchro-convertisseur (commutateur de courant), sont à ce jour les plus utilisés.

Au début des années 90 est apparue l'idée de combiner les avantages de manœuvrabilité des gouvernails mécaniques avec la flexibilité de la propulsion électrique. L'idée de base est de loger le moteur électrique de propulsion, dans une nacelle, appelée POD (Propulsors with Outboard Drives), fixée sous la coque a l'extérieur du navire, entraînant une hélice a pas fixe. [2]

I-3) Les différentes structures des machines électriques pour les POD

I-3-1) La machine synchrone à rotor bobiné à double étoile

La plupart des systèmes de propulsion par POD sont équipés de moteurs synchrones a rotor bobiné a double étoile, associés a deux onduleurs de structure courant. Cette association offre d'une part, une redondance naturelle grâce à l'alimentation par deux onduleurs identiques, de la cote motrice, cette association permet de réduire le couple pulsatoire. L'inconvénient des moteurs synchrones a rotor bobiné par rapport aux machines à aimants permanents ou asynchrones réside dans la complexité d'excitation de ces machines. [2]

I-3-2) Les machines a aiment permanent

Nous présentons trois topologies de machines à aimants permanents :

a. Machines à aimants cylindriques à flux radial :

En fonction de la disposition des aimants au rotor, on distingue plusieurs types de machines à aimants à structure cylindriques (figures (I-4)). Toutefois, pour les applications de fortes puissances et a vitesse lente, les machines à aimants permanents montés en surface (figure (I-4-a)) sont préférées pour leurs facilités de construction. En raison de leurs structures, les machines à aimants à champ radial répondent bien aux contraintes rencontrées dans les propulsions en nacelle. En effet, ces machines semblent offrir une flexibilité dimensionnelle importante a la conception, permettant de réduire le rapport de diamètre nacelle sur l'hélice de 40% a 50% en comparaison aux machines synchrones conventionnelles requérant des grands diamètres a vitesse lente et imposent donc des dimensions importantes a la nacelle et dégradent le rendement nautique. Ce gain en masse est obtenu, notamment, grâce à la facilité de réalisation des machines à aimants à plus grand nombre de paires de pôles, comparées aux machines a rotors bobinés, permettant ainsi, une réduction significative des culasses. [2]

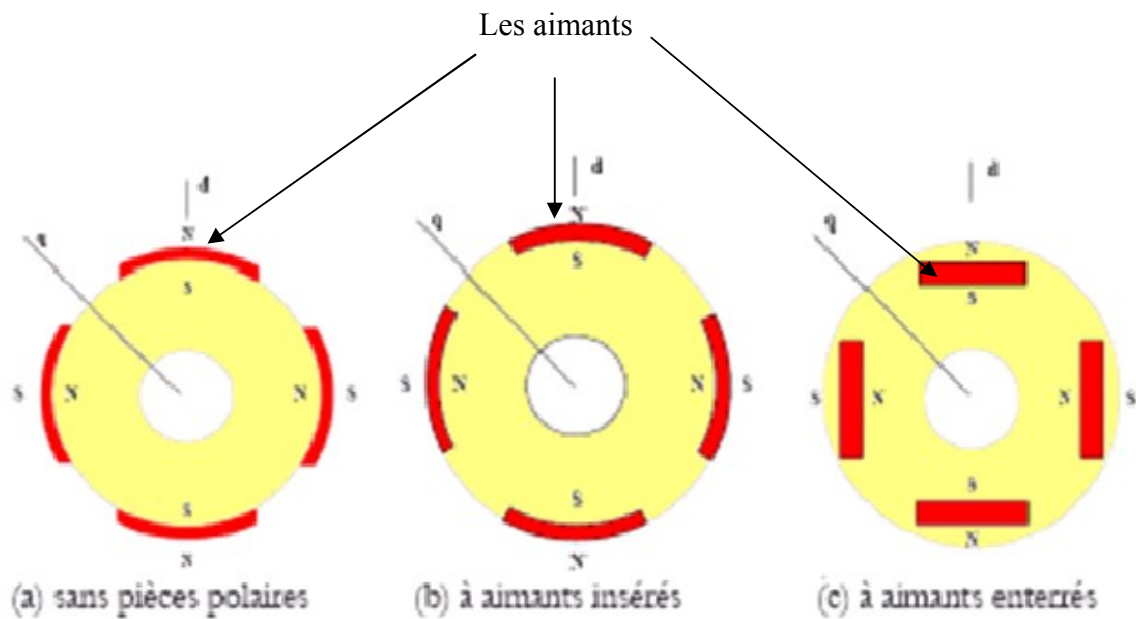


Fig. (I-4) : Vue transversale des machines à aimants permanents
à flux radial [2]

b. Machines à aimants discoïdes à flux axial.

Les moteurs discoïdes sont pourvus de disques fixes bobinés et de disques mobiles supportant les aimants permanents. L'avantage déterminant de la structure discoïde par rapport aux structures cylindriques provient de l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. L'accroissement de la polarité dans ce type de machine a le même effet que sur les structures à champ radial et se traduit ici par une diminution de la longueur, le volume étant parfaitement occupé (figure (I-5)).

Les structures discoïdes offrent également une grande modularité naturelle par juxtaposition de modules, la puissance étant déterminée par le nombre de disques pour un diamètre donné. Malgré sa puissance massique élevée, on souligne toutefois l'existence de contraintes mécaniques liées aux poussés axiales et des contraintes thermiques dues à la difficulté d'évacuation des pertes statoriques.

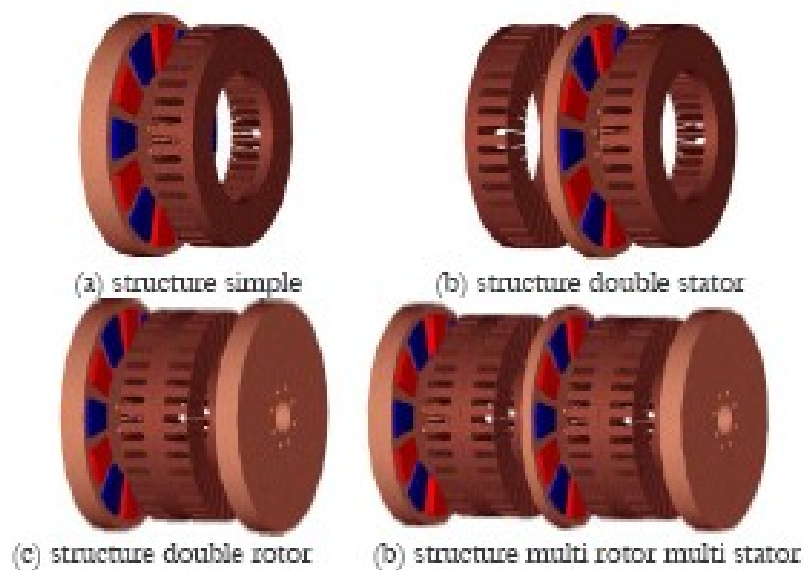


Fig. (I-5) : vue d'une machine à aimant permanents [2]

c. Machines à aimants à flux transverse

Dans cette structure, des circuits magnétiques en forme de fer à cheval régulièrement disposés entourent le bobinage statorique de chaque phase. Un moteur à flux transverse a phases comprendra alors plusieurs moteurs monophasés (circuits magnétiques) montés sur le même arbre et décalés d'un angle géométrique de $2p/q$.

Ces structures sont particulièrement adaptées pour des exigences de forte densité de couple, toutefois sa complexité mécanique et son coût de réalisation font qu'elle est encore au stade de développement. Par ailleurs, on souligne de forts couples pulsatoires, des vibrations et des pertes fer excessives dues au caractère tridimensionnel du champ. Pour réduire ces pertes, on pourrait utiliser des matériaux magnétiques composites au détriment du couple volumique lié à un niveau d'induction de saturation relativement faible de ce type de matériau. En outre, les quelques réalisations effectuées ont mis en évidence que l'obtention d'un fort couple volumique se traduit par un surdimensionnement de la partie convertisseur. [2]

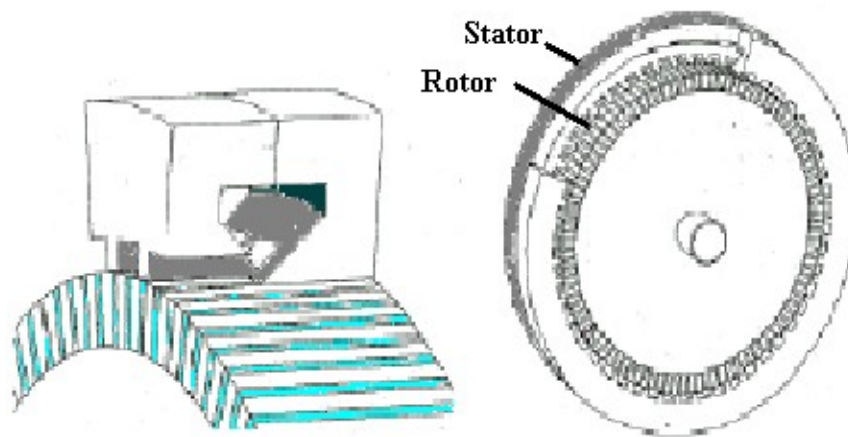


Fig. (I-6) : Vue d'une machine à flux transversale

I-3-3) La machine asynchrone

De par sa robustesse, son coût et sa simplicité, la machine asynchrone à cage peut offrir une alternative intéressante dans la propulsion par POD. Ces machines comparées aux machines synchrones à aimants, ont des pertes Joule plus élevées, notamment au rotor. Cependant, elles peuvent supporter une élévation de température plus importante. Les travaux en cours ont pour objectif la mise en place de moyens de refroidissement plus efficaces et une amélioration structurelle de la machine pour mieux évacuer les calories. L'autre objectif consiste à améliorer le rendement et à ramener l'encombrement (couple volumique) de ces machines à celui de la machine à aimants permanents à flux radial. [2]

I-3-4) Machine synchrone double étoile

Depuis ces dernières années avec l'évolution de l'électronique de puissance les machines alternatives remplacent les machines à courant continu, qui sont améliorées et qui ne nécessitent pas un entretien autant que la machine à courant continu et de très grande puissance. D'autre part, la bonne des positions que présente les machines alternatives (dépourvue de collecteurs mécaniques, couple massique important) et surtout les machines

à grande puissance et principalement la machine à double étoile qu'est utilisée dans le domaine maritime grâce à ses avantages suivants : [4]

- Excellent rendement
- Grande robustesse
- Faible coût de l'ensemble alimentation-contrôle-machine
- Elle permet la réduction des pulsations du couple
- La réduction des pertes.

1-3-5) Machines polyphasées

On distingue habituellement deux types de machines polyphasées suivant le nombre de phases statorique est ou non multiple de trois, On peut ainsi les classer en deux groupes « machine polyphasées type 1 » « machines polyphasées de type 2 ». [5]

a. Machine polyphasées de type 1 :

C'est des machines dont le nombre de phase statorique est multiple de trois, de sorte qu'on peut les regrouper en η étoiles triphasées. $q = 3\eta$. Avec ($\eta=1, 2, 3, \dots, n$), d'où l'appellation « machines multi-étoiles».

Pour un nombre donné de phases il peut exister plusieurs configurations suivant le décalage entre phases adjacentes. En effet une machine double étoile ($q=6$) dont les étoiles sont décalés de $\alpha = (\frac{\pi}{6})$, et celle décalés de $\alpha = (\frac{\pi}{3})$ de même nombre de phases. On peut introduire un nombre équivalent de phase, noté, q_α qu'on défini comme suite :

$$q_\alpha = \pi/\alpha$$

b. Machines polyphasées de type 2

Ce types de machines présentent un nombre de phases statoriques, impaire ($q>5$). si on désigne par α le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes, les q phases sont alors décalées régulièrement de $(\frac{2\pi}{q} = 2\alpha)$. On a donc toujours :

$$q = q_\alpha = \pi/\alpha$$

Les avantages des machines polyphasées :

Ces machines ont plusieurs avantages dont on cite :

- ❖ *L'élimination des harmoniques d'espace.*
- ❖ *Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.*
- ❖ *Amélioration de la fiabilité.*
- ❖ *Segmentation de puissance.*

Les inconvénients des machines polyphasées :

Comme aussi il contient des inconvénients :

- ❖ *Le nombre de semi conducteurs augmente avec l'augmentation de nombre de phases, ce qu'augmente le coût de l'ensemble convertisseur machine.*
- ❖ *La multiplication de nombre de semi-conducteurs complique le système de commande.*

I-4) Modélisation et stabilité des réseaux

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence équilibre entre la production et la consommation. Les générateurs, les récepteurs et les réseaux électriques qui les relient ont des inerties mécaniques et électriques qui rendent difficile le maintien d'un équilibre garantissant une fréquence et une tension relativement constantes. Normalement, face à une variation de puissance, le système électrique, après quelques oscillations, retrouve un état stable. Dans certains cas, le régime oscillatoire peut diverger. Des études sont nécessaires pour pouvoir éviter ce phénomène et garantir la stabilité du réseau électrique.

I-4-1) La stabilité des réseaux

Elle est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et fréquences associées. on distingue :

[6]

- *La stabilité en régime statique : le réseau a un comportement stable, c'est-à-dire que, soumis à de petites perturbations, il revient à son point de fonctionnement initial ceci avec d'éventuelles oscillations amorties jusqu'au retour à l'équilibre.*
- *La stabilité en régime transitoire : lorsque l'on passe d'un état stable statique à un autre, suite à une perturbation durable voulue ou non, ce changement d'équilibre s'accompagne d'un régime variable oscillatoire amorti considéré comme acceptable eu égard à des fourchettes prédéfinies de ΔU , ΔF , Δt .*
- *Un réseau est un ensemble de producteurs et de consommateurs d'énergie électrique relie entre eux. L'état électrique du réseau et le résultat de toutes les interactions de c'est différentes composantes. Les modifications de cette état (exploitation du processus, incident électrique) entraînent une évolution naturel de comportement vers un nouvel état stable ou non. Dans ce dernier cas (instabilité au régime transitoire, il y a perte d'utilisation d'énergie, au moins partielle et parfois même totale (écroulement de réseau). Il peut s'ensuivre pour l'industrie, des pertes très couteuses de production,*
- *La stabilité en régime dynamique : le réseau est apte à éviter tout régime oscillatoire divergent et à revenir à un état stable acceptable. Ceci inclut l'intervention éventuelle des protections et automatismes divers fonction des perturbations envisagées.*

Les études de stabilité dynamique consistent à :

- ❖ *envisager les principaux scénarios critiques tels que court-circuit, perte d'énergie mécanique, perte de source électrique, variation de charge, contraintes de process.*
- ❖ *prédire le comportement du réseau face à ces perturbations,*
- ❖ *préconiser les mesures à prendre en exploitation, telles que type de protection, réglage de relais, délestages, configurations... pour éviter les modes de fonctionnement indésirables.*

Ces études permettent donc la maîtrise du comportement du réseau considéré, qu'il soit public ou privé, aussi bien en H.T ou B.T.

I-4-2) comportement des réseaux électriques

Le comportement d'un réseau électrique lors de phénomènes transitoire dépend du comportement de chacun de ses constituants. Ceux-ci, partant d'un état stable, vont influencer sur le comportement transitoire de l'ensemble. Ils vont se trouver, en fin de perturbation, soit dans le même état stable qu'avant la perturbation, soit dans un autre état stable, soit dans un état instable, ce qui en général entraîne la perte d'un ou plusieurs constituants par activation des protections. Il importe donc de connaître le comportement de chacun d'eux pour pouvoir déterminer le comportement de l'ensemble du réseau électrique considéré.

➤ Les charges passives sont des consommateurs tels que l'éclairage, le chauffage dont les lois de variation électrique sont du type : **[6]**

$$P = \left[\frac{V}{V_n} \right]^\alpha P_n \quad \text{et} \quad Q = \left[\frac{V}{V_n} \right]^\beta Q_n \quad (\text{I.1})$$

α et β : sont les caractéristiques de charge.

➤ Un grand nombre de récepteurs : cuves à électrolyse, moteurs à vitesse variable, chauffage à gradateur, etc., entrent dans cette famille de charges. Ces récepteurs ont en général en commun une forte sensibilité aux variations de tension. Par exemple, un moteur à vitesse variable peut être arrêté complètement pour une variation de tension de l'ordre de $\pm 15\%$. A cela, peut se rajouter une sensibilité aux variations de fréquence, donc ces appareils font partie des récepteurs sensibles aux problèmes de stabilité des grandeurs électriques. Il en est de même pour les matériels informatiques.

➤ Les transformateurs, les lignes et les câbles qui assurent le transit de l'énergie électrique entre sources et charges, sont caractérisés par leurs impédances qui créent des chutes de tension et des pertes d'énergie active, fonction du courant qui les traverse. Leur importance est déterminante en régime transitoire:

➤ les forts courants d'appel provoquent des baisses de tension parfois critiques,

➤ l'impédance qu'ils induisent entre sources synchrones

(Appelée « distance électrique ») peut être à l'origine d'oscillations de grande durée

➤ Par leur présence majoritaire dans les réseaux industriels (jusqu'à 80 % de la puissance consommée dans certaines installations), les moteurs asynchrones ont un rôle prépondérant dans les phénomènes de stabilité.

➤ Influence des creux de tension.

Sur la **figure (I-7)** le diagramme couple/vitesse d'un moteur asynchrone est représenté pour un moteur double cage alimentant une pompe.

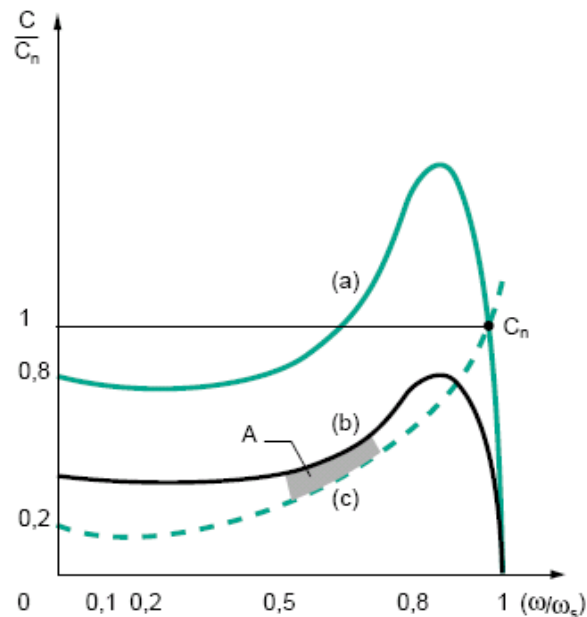


Fig. (I-7) : Diagramme couple/ vitesse de la machine Asynchrone.

- (a) : courbe $C(\omega)$ à pleine tension
- (b) : courbe $C(\omega)$ à tension réduite ($0.7U_n$)
- (c) : courbe $Cr(\omega)$

Le point de fonctionnement se trouve à l'intersection des courbes de couple moteur et résistant. Le couple moteur est proportionnel au carré de la tension.

La stabilité du moteur dépend des positions relatives des courbes de couple moteur et résistant. Si le moteur subit une coupure ou un fort creux de tension pendant quelques instants, il va ralentir et se retrouver à une vitesse réduite, par exemple 70% de la vitesse de synchronisme.

Pourra-t-il réaccélérer et retrouver son état stable d'origine ?

Cela dépend de la valeur de la tension à son rétablissement. Supposons que, du fait des appels de courant dans le réseau, la tension soit à $0,7 U_n$ à cet instant. Le couple moteur est à peine supérieur au couple résistant (zone A, **figure (I-7)**) : le moteur va « ramper » (accélérer très lentement), et se trouver déconnecté par action des protections de démarrage trop long, relais thermique ou mini de tension.

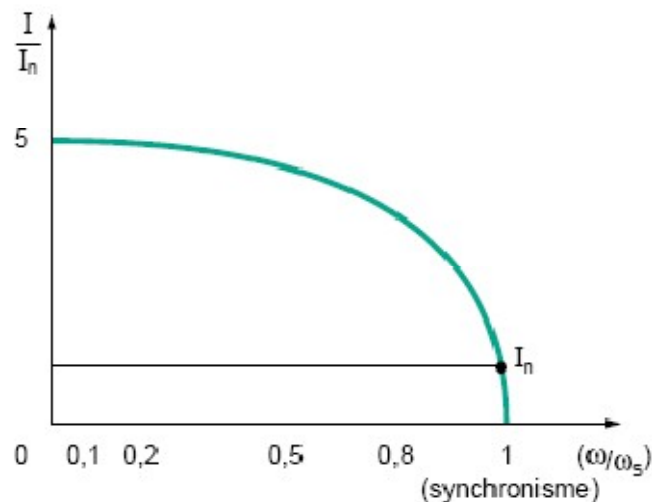


Fig. (I-8) : moteur asynchrone-courant en fonction de la vitesse

La **figure (I-8)** montre que dès qu'un moteur ralentit un peu, il absorbe un fort courant. Ce dernier cause des chutes de tensions qui rendent d'autant plus difficile la réaccélération. Si l'ensemble des moteurs d'une installation industrielle ralentit (par exemple suite à un fort creux de tension dans le réseau du distributeur d'énergie), le courant absorbé par l'ensemble des moteurs à la réaccélération crée des chutes de tensions qui peuvent rendre impossible la réaccélération.

La solution est souvent l'utilisation d'un automate de délestage et relestage progressif des charges. La stabilité peut donc être gérée en minimisant l'appel de courant et donc la chute de tension.

En résumé, les moteurs asynchrones sont des acteurs importants dans le cadre de la stabilité dynamique et peuvent rencontrer des difficultés de fonctionnement suite à un passage brusque sous tension réduite.

➤ *Influence des manques de tension.*

Lors d'un manque de tension, le moteur génère à ses bornes une tension rémanente auto-induite qui s'amortit en quelques dixièmes de seconde.

Dans le cas d'un gros moteur et en présence de capacités de compensation de la puissance réactive, cette tension peut perdurer près d'une seconde.

Les machines synchrones sont fréquentes dans les réseaux industriels. Elles peuvent être installées pour les besoins suivants :

- ❖ *récupération de l'énergie d'un processus exothermique ou cogénération,*
- ❖ *besoin d'une source électrique*

Complémentaire pour :

- ❖ *contrat Effacement Jours de Pointe (EJP),*
- ❖ *secours,*
- ❖ *pointe,*
- ❖ *compensation d'énergie réactive.*

Elles jouent un rôle prédominant dans les phénomènes de stabilité des réseaux. Rappelons-en le principe.

I-4-3) Stabilité statique

Une machine synchrone peut être représentée par le schéma électrique simplifié de la figure (I-9) avec :

R : résistance statorique, X : réactance directe statorique, E : f.é.m. statorique créée par l'enroulement d'excitation rotorique, U : tension aux bornes du stator en charge.

*Le diagramme vectoriel correspondant au schéma électrique simplifié est celui de la **figure (I-10)**. L'angle interne δ de la machine est défini comme l'angle entre les vecteurs U et E. Cet angle est égal à celui dont le rotor est décalé par rapport à sa position de fonctionnement à vide (si $I = 0$, $\delta = 0$).*

En négligeant R, un calcul rapide montre que la puissance électrique active transmise au réseau se calcule par :

$$P = \frac{EU}{X} \sin \delta \quad (\text{I.2})$$

Il est clair que la puissance électrique transmise au réseau est limitée à la valeur de $\frac{EU}{X}$ valeur qui est atteinte pour $\delta = 90^\circ$.

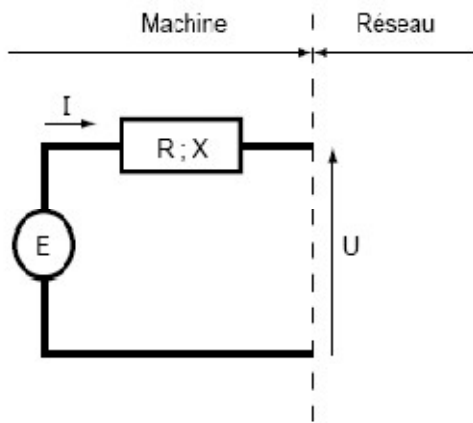


Fig. (I-9) : Schéma équivalent de la Machine synchrone (MS)

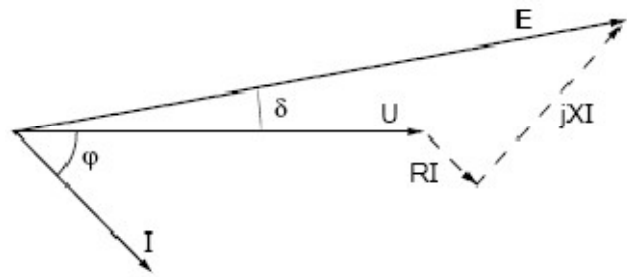


Fig. (I-10) : Diagramme vectoriel de la machine synchrone (MS)

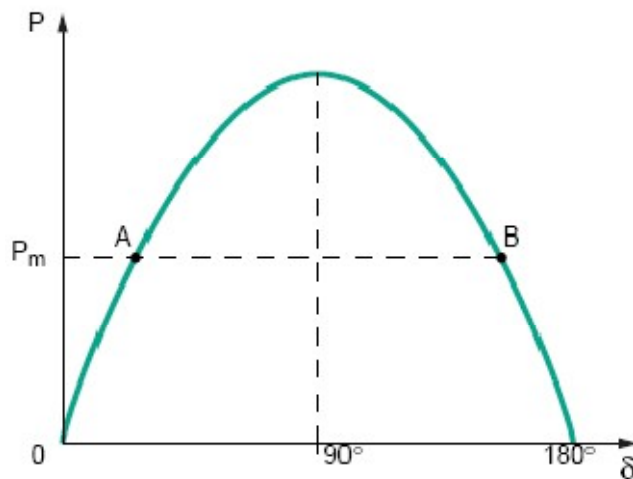


Fig. (I-11): Puissance générée par un alternateur en fonction de l'angle interne

On peut représenter P en fonction de δ . Sur ce schéma la puissance mécanique P_m , fournie par la machine entraînée est représentée par une droite horizontale. Le point de fonctionnement est donné par l'intersection de cette ligne horizontale avec la sinusoïde. En fait deux points de fonctionnement A et B sont possibles.

Partant de A et si, pour une raison quelconque, l'angle δ augmente, la puissance transmise au réseau va augmenter, et donc la machine va ralentir, ce qui fait diminuer δ , le point de départ est retrouvé : le fonctionnement est stable. Un raisonnement identique montre que le point B est instable, comme tout point sur la partie rectiligne de la courbe.

En ne supposant plus que $R = 0$, la limite pour δ est un angle ψ tel que :

$$\tan \psi = -\frac{X}{R}$$

La stabilité statique d'un alternateur (c'est-à-dire son aptitude à répondre à une variation lente de la charge) peut être énoncée selon deux considérations pratiques complémentaires :

- le fonctionnement n'est stable que si l'angle interne δ reste inférieur à un angle limite proche de 90° ,
- la puissance active transmise au réseau est limitée. Elle est maximale lorsque la limite de stabilité est atteinte.

I-4-4) Stabilité dynamique

Les problèmes de stabilité dynamique résultent du passage de la machine d'un état stable à un autre. Considérons le cas d'un à-coup de puissance sur la turbine : celle-ci passe brusquement d'une puissance fournie $P1$ à une puissance fournie $P2$ (figure (I-12)).

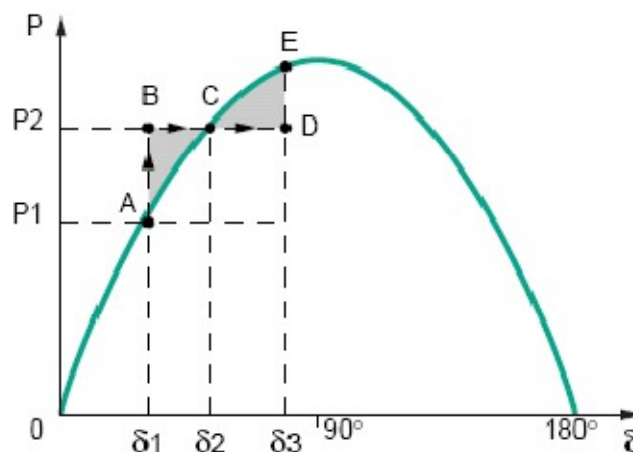


Fig. (I-12) : réaction du système à une variation de puissance.

L'augmentation lente de la puissance de P_1 à P_2 ferait passer lentement du point A au point C en restant sur la courbe. Mais l'application brusque de cet échelon de puissance n'est pas possible. Il est en effet impossible, compte tenu des inerties mécaniques, de passer d'un angle δ_1 à un angle δ_2 brusquement. D'où le passage instantané du point A au point B ; ensuite l'angle δ augmente de δ_1 à δ_2 .

Mais en arrivant au point C la stabilisation n'est pas immédiate, l'inertie amène jusqu'au point D . De celui-ci, la décélération jusqu'au point C finit par stabiliser le phénomène, après éventuellement quelques oscillations. Les calculs concernant les énergies montrent que la position du point E est définie par la loi des aires : les aires ABC et CDE sont égales.

En conséquence, l'angle interne maximal δ_{max} peut être supérieur à 90° de façon transitoire. La limite de stabilité dynamique est donc plus élevée que la limite de stabilité statique. Toutefois, il peut arriver que la différence entre P_1 et P_2 soit tellement importante que la loi des aires ne puisse plus s'appliquer (figure (I-13)).

Il n'y a pas de point D qui corresponde à la loi des aires. L'alternateur accélère du point B au point C , puis jusqu'au point X : à ce point, il continue à accélérer en restant sur la courbe et la puissance transmise au réseau diminue. Si le réseau est alimenté par d'autres sources, il y a perte de synchronisme par survitesse.

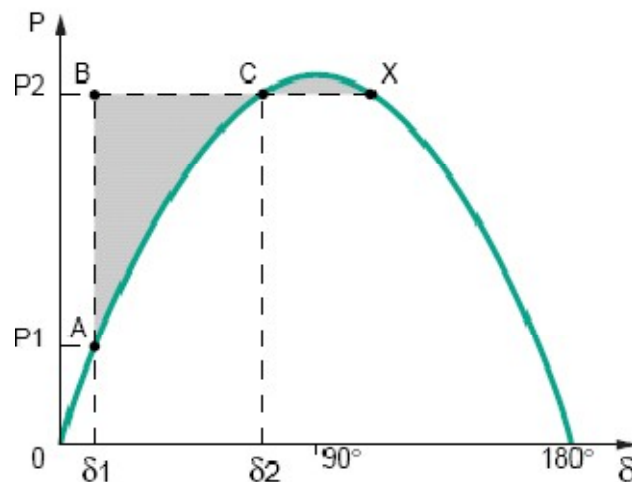


Fig. (I-13) : Instabilité (survitesse) suite à un échelon mécanique

Il en découle deux remarques importantes :

- ❖ *les risques de pertes de stabilité dynamique sont liés à des changements d'états importants et brusques du réseau ou de la turbine,*
- ❖ *les risques de pertes de stabilité dynamique sont d'autant plus importants que la puissance fournie par la machine synchrone est proche de la limite de stabilité statique.*

Cette constatation s'exprime par la notion de puissance synchronisante :

$$P_s = \frac{dP}{d\delta} = \frac{EU}{X} \cos \delta \quad (\text{I.3})$$

Qui montre que pour une variation donnée de la puissance appelée, la modification de l'angle électrique est d'autant plus faible que l'angle est petit. A noter qu'en réalité dans le régime transitoire, intervient en plus de X les réactances transitoires et subtransitoires des machines, qui prennent en compte les variations temporelles de flux. Mais les régulations de vitesse et de tension jouent un rôle capital pour améliorer le comportement du groupe face au réseau.

I-5) Méthode de modélisation

La modélisation est un outil mathématique qui nous permet d'étudier les différents phénomènes physiques des systèmes électriques. Il consiste à interpréter ces derniers à des équations mathématiques parfois complexes et pour cela on fait appel à des méthodes de simplification dont on cite les suivantes :

a. Méthode des éléments finis

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.). Concrètement, cela permet par exemple de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils

soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire : mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique, etc.

b. Méthode de Park :

A fin d'obtenir des coefficients constants dans les équations différentielles, la méthode de Park est utilisée. La Transformé de Park (1929), transforme un système de grandeurs triphasés équilibré en un système de grandeurs diphasés équivalent d'axe (d,q). [8]

Dans notre projet on a opté cette méthode de simplification dans le chapitre II et chapitre III

I-6) les logiciels d'études des réseaux électriques

L'étude théorique de certains phénomènes électriques devient très complexe, c'est pour cela qu'on utilise des logiciels de calcul et de simulation, On retrouve plusieurs logiciel des réseaux électrique, parmi lesquels on peut citer: [9]

I-6-1) CYMSTAB (analyse de stabilité transitoire)

CYMSTAB est le module de PSAF permettant la simulation des phénomènes transitoires électromécaniques dans des réseaux électriques triphasés. CYMSTAB comprend une vaste bibliothèque d'équipements et de modèles de contrôleurs, permet d'inclure des commandes définies par l'utilisateur, est doté d'une interface très flexible avec l'utilisateur et offre de puissantes possibilités graphiques. CYMSTAB utilise des méthodes de résolution par intégration trapézoïdale simultanée implicite pour les équations du réseau, des équipements et des contrôleurs. Le programme a la capacité de tester la réponse à l'échelon des contrôleurs et permet une modélisation définie par l'utilisateur des équipements du réseau et des contrôleurs.

CYMSTAB nous offre l'option unique de compléter la vaste gamme de modèles préprogrammés pour les équipements et les contrôleurs de système en offrant à l'utilisateur la possibilité de modéliser n'importe quel système de commande grâce à l'option de

modélisation définie par l'utilisateur. L'approche de la modélisation définie par l'utilisateur est basée sur l'interprétation en temps d'exécution des équations définies par l'utilisateur.

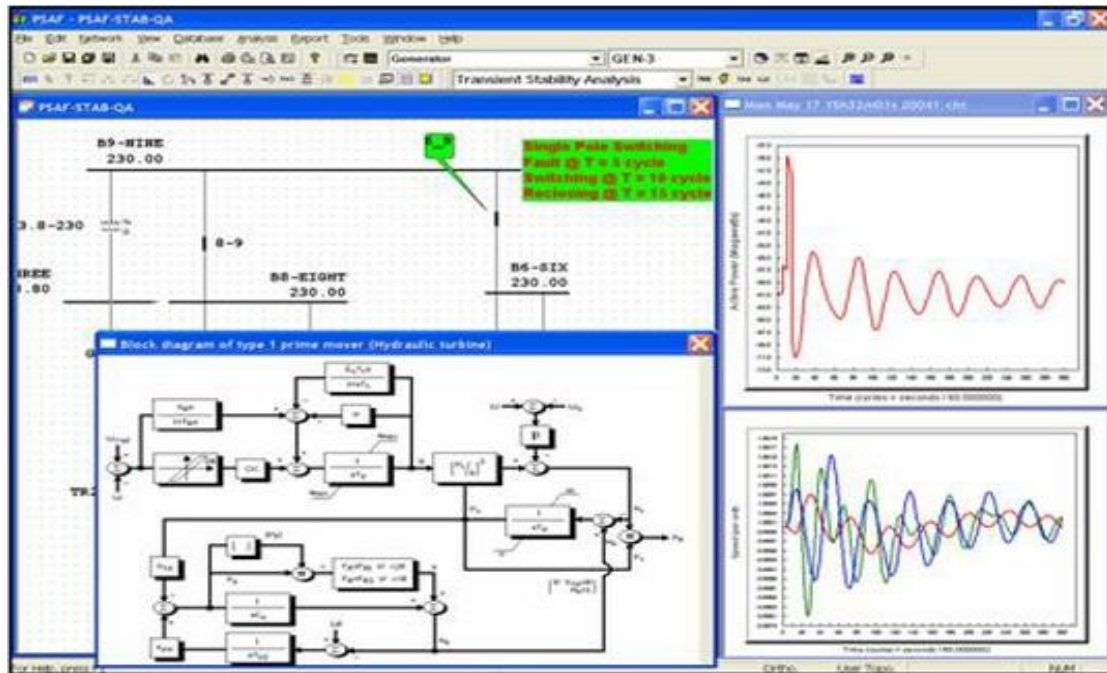


Fig. (I-14) : l'interface du logiciel SYMSTAB

I-6-2) Logiciel G.T.A (group turbo alternateur)

Le logiciel pédagogique (G.T.A. v 1.0), conçu en collaboration avec le Centre d'Etude des Auxiliaires Pédagogiques de l'EDF, permet de simuler le fonctionnement d'un processus de production d'énergie électrique du système d'entraînement mécanique jusqu'à la ligne de transport.

Le logiciel a été développé à partir des données de la centrale de Civaux (la dernière génération de centrale nucléaire d'une puissance de 1450 MW). Il est utilisé comme outil pédagogique dans les centres de formation EDF.

Ce moyen pédagogique permet des possibilités étendues de présentation et d'interaction, se prête particulièrement bien à la formation aux techniques et procédés industriels :

- acquisition de connaissances, compréhension de phénomènes ;
- entraînement à la conduite d'un procédé ou d'une machine ;

- *apprentissage des procédures et des modes opératoires ;*
- *évaluation.*

L'objectif du logiciel G.T.A. v 1.0 est de permettre de développer des séquences de travaux pratiques sur la production et le transport de l'énergie électrique. De plus cet outil permet d'acquérir de nouvelles compétences contenues dans le programme des sections S.T.I. option Electrotechnique.

Le logiciel G.T.A., ce didacticiel est dédié à la compréhension des sciences, et à la technologie des groupes de production d'électricité, ce logiciel de simulation permet de :

- *Découvrir la conception d'une chaîne de production d'énergie électrique ;*
- *Comprendre l'importance du transport de l'énergie, notions de pertes énergétiques ;*
- *Découvrir l'ordre de grandeur des différentes valeurs liées à un turboalternateur de Centrales.*
- *Comprendre l'importance du réglage du courant d'excitation du turboalternateur.*

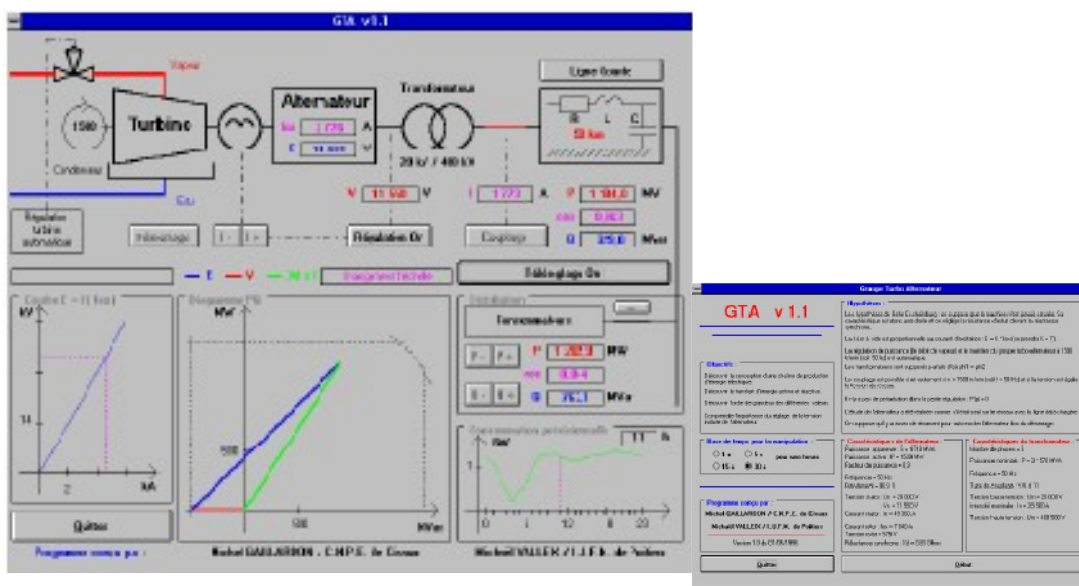


Fig. (I-15) : *l'interface du logiciel G.T.A (groupe turbo alternateur)*

I-6-3) Logiciel PSAF

PSAF de CYME est une suite logicielle complète, composée de différents modules d'analyse intégrés qui permettent la simulation et l'analyse de réseaux de transport d'énergie électrique et de réseaux industriels, selon les besoins des ingénieurs électriciens. PSAF permet la saisie de données en mode graphique ou tabulaire et le traçage personnalisé du schéma unifilaire ainsi que des fonctions sophistiquées de production de rapports, de traçage et de personnalisation des rapports de simulation.

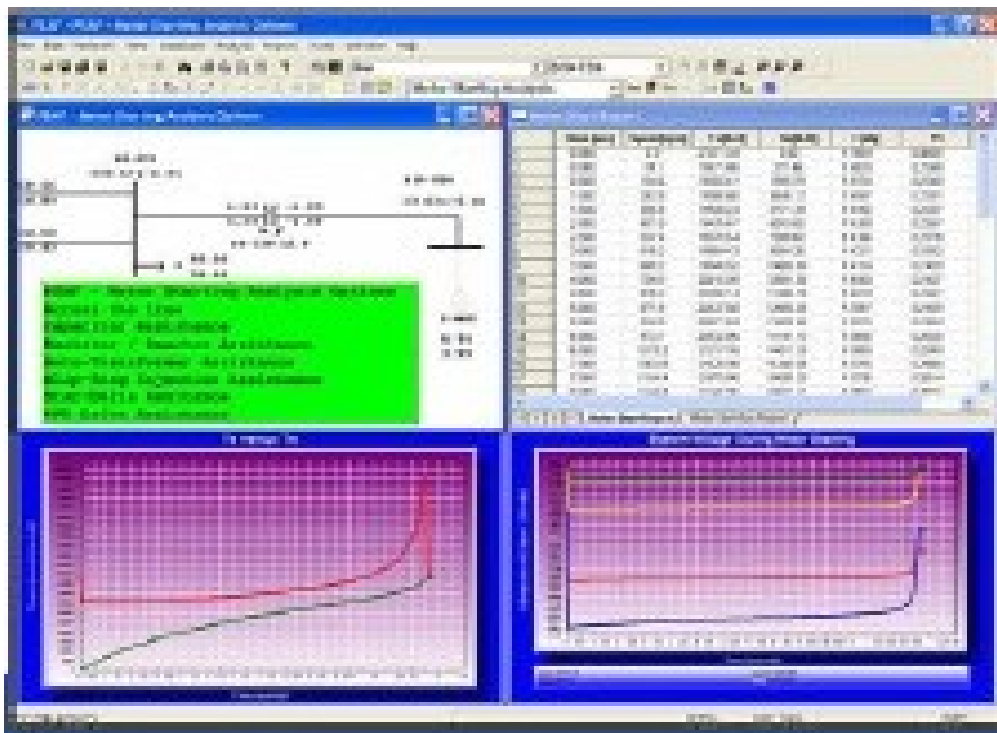


Fig. (I-16) : l'interface du logiciel G.T.A

I-6-4) Logiciel MATLAB :

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, il peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. Matlab contient également une interface graphique puissante, ainsi qu'une

grande variété d'algorithmes scientifiques. Simulink : est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentes des généralités sur la propulsions électriques, on donne ces différents composants, puis on a fait une étude sur la stabilité et le comportement de réseau leur de différents régimes. Et on termine par les méthodes de modélisation et quelque logiciel de simulation.

CHAPITRE II

*PRESENTATION ET MODELISATION DE
LA MACHINE ASYNCHRONE*

Introduction

Le Moteur Asynchrone ou Moteur à Induction, est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principale avantage réside dans l'absence de contacte électrique glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste et facile à construire. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse proche de la vitesse synchrone. Utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante ou variable, et la place qu'il occupe dans ce domaine ne cesse de croître.

Dans ce chapitre on a donné des généralités sur le moteur asynchrone, puis on a fait sa modélisation en utilisant une méthode simplificatrice qui est la transformé de Park, on suite on a construit les différents blocs de simulation sous Matlab Simulink en terminant par donné quelques résultats graphiques.

II.1) Constitution de la machine

La machine Asynchrone et constituée des principaux éléments suivants :

- *Le Stator (partie fixe) constitué de disque en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.*
- *Le Rotor (partie tournante) constitué de disque en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.*
- *Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles. [12], [13]*

II.2) Description de la machine Asynchrone

Le Moteur ASynchrone (MAS) dont nous allons étudier la mise en équation et représenté en figure (II.2), dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. Les armatures du stator et du rotor sont toutes deux cylindriques, munies chacune d'un enroulement triphasé. On distingue par a_s , b_s et c_s les trois enroulements de phase du stator, a_r , b_r et c_r ceux du rotor qui sont court-circuités et la tension à leurs bornes est nulles. [11]

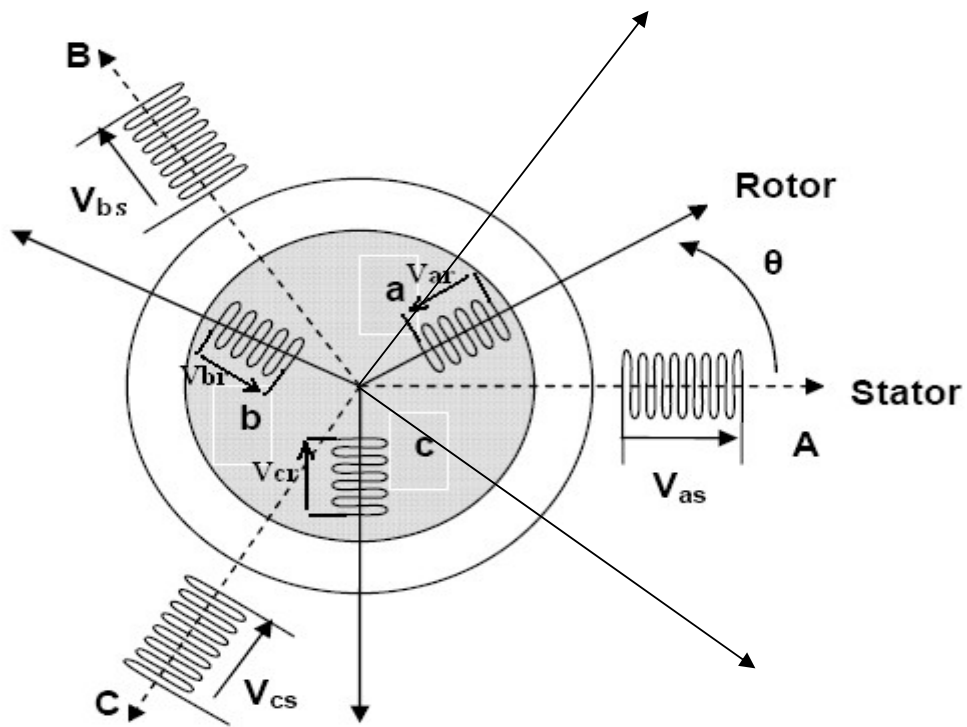


Fig. (II.2) : Représentation schématique des enroulements d'une MAS triphasée

Ainsi, nous définissons les angles suivants dans le sens trigonométrique :

$$(O_{as}, O_d) = \theta_s$$

$$(O_{bs}, O_d) = \theta_s - (2\pi/3)$$

$$(O_{cs}, O_d) = \theta_s - (4\pi/3)$$

$$(O_{ar}, O_d) = \theta_r$$

$$(O_{br}, O_d) = \theta_r - (2\pi/3)$$

$$(O_{cr}, O_d) = \theta_r - (4\pi/3)$$

$$(O_d, O_q) = (\pi/2)$$

L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

$$\omega_r = d(\theta_s)/dt - d(\theta_r)/dt = d(\theta)/dt.$$

II.2.1) Hypothèses simplificatrices et conventions de signes

La modélisation de la Machine Asynchrone est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

- *L'entrefer est d'épaisseurs uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.*
- *Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.*
- *Le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.*
- *Le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.*
- *La saturation est négligeable.*

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer : L'additive des flux, la constance des inductances propres, la loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

Les conventions de signe que nous adapterons sont les suivantes :

La MAS est majoritairement utilisé en moteur, nous adopterons les conventions suivantes :

- *Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.*
- *Une f.é.m. positive fait circuler un courant positif.*
- *Les angles et les vitesses sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.*
- *Le stator est considéré comme générateur et le rotor comme récepteur*

II.3) Equations générales de la machine non saturée

On suppose que notre moteur asynchrone n'est pas saturé, et on respectant les hypothèses citées si dessus on construit des déferents modèles en plan abc et dq.

II.3.1) Modèle en plan abc

Par application de la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine représentée dans la figure (II-2) on obtient les différentes équations rotorique et statorique suivantes [13], [14] :

a. Equations électriques de stator

$$\begin{cases} v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \\ v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (II.1)$$

r_s : Résistance d'une phase statorique

b. Equations électriques de rotor

$$\begin{cases} v_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \\ v_{br} = r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \\ v_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (II.2)$$

r_r : Résistance d'une phase rotorique

c. Equations des flux magnétique

Étant donné que la MAS est constitué de 6 enroulements (voire fig (II.12)) couplés magnétiquement, il existe entre les flux totaux à travers les enroulements et courants une relation matricielle de type :

$$[\lambda] = [L] [I]$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

Avec:

$$(\lambda_s^{abc}) = (\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs})^t$$

$$(\lambda_r^{abc}) = (\lambda_{ar}, \lambda_{br}, \lambda_{cr})^t$$

$$(i_s^{abc}) = (i_{as}, i_{bs}, i_{cs})^t$$

$$(i_r^{abc}) = (i_{ar}, i_{br}, i_{cr})^t$$

Les éléments de la diagonale de la matrice inductance représentent les inductances propres des enroulements. Les autres termes sont introduits par le couplage magnétique de ces systèmes d'enroulement, l'un par rapport à l'autre. En tenant compte des hypothèses de construction de la machine il résulte la représentation matricielle suivante :

$$[L_{ss}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

$$[L_{rr}^{abc}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

$$[L_{sr}^{abc}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

$$[L_{rs}^{abc}] = [L_{sr}^{abc}]^t \quad (II.7)$$

Avec :

$L_{as} = L_{ls} + L_{ss}$: Inductance propre d'une phase statorique.

$M_{as} = L_{sm}$: Inductance mutuelle entre deux phases statorique.

$L_{ar} = L_{lr} + L_{rr}$: Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_{ar} = L_{rm}$: Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables, l'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse. Vu le grand nombre de variables, on utilise alors des transformations mathématiques qui permettant de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

II.4) Transformation de Park

La Transformation de Park consiste à appliquer aux grandeurs telles que courants, tension et flux, un changement de variables, faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q. [9]

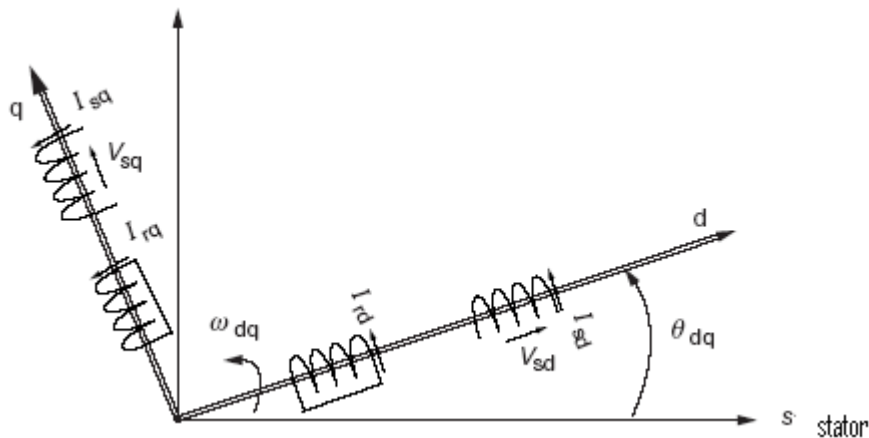


Fig. (II.2) : Représentation de la machine dans le plan dqo

a. Matrice directe de PARK

$$[T(\Theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{II.8}$$

b. Matrice inverse de PARK

$$[T(\Theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

Le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ pour une conservation de puissance.

Ces matrices sont les mêmes pour les grandeurs rotoriques et statorique en spécifiant l'angle par l'indice (s) ou (r).

II.4.1) Equations des tensions dans le plan dqo

L'expression de l'équation des tensions du stator dans le plan abc peut s'écrire comme suite :

$$(V_s^{abc}) = \frac{d}{dt} [\lambda_s^{abc}] + [r_s^{abc}] (i_s^{abc}) \quad (II.10)$$

$$[T_{dqo}(\theta_s)]^{-1} (V_s^{dqo}) = \frac{d}{dt} ([T_{dqo}(\theta_s)]^{-1} [\lambda_s^{dqo}] + [r_s^{dqo}] ([T_{dqo}(\theta_s)]^{-1} (i_s^{dqo})) \quad (II.11)$$

$$[T_{dqo}(\theta_s)]^{-1} (V_s^{dqo}) = [T_{dqo}(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} [\lambda_s^{dqo}] + \frac{d}{d\theta_s} ([T_{dqo}(\theta_s)]^{-1}) \frac{d\theta_s}{dt} [\lambda_s^{dqo}] + [r_s^{dqo}] [T_{dqo}(\theta_s)]^{-1} (i_s^{dqo}) \quad (II.12)$$

On multipliant cette fonction par $[T_{dqo}(\theta_s)]$ on obtient les formules suivantes

$$(V_s^{dqo}) = \frac{d}{dt} [\lambda_s^{dqo}] + \{ [T_{dqo}(\theta_s)] \frac{d}{d\theta_s} ([T_{dqo}(\theta_s)]^{-1}) \} \frac{d\theta_s}{dt} [\lambda_s^{dqo}] + [r_s^{dqo}] (i_s^{dqo}) \quad (II.13)$$

Avec:

$$\{ [T_{dqo}(\theta_s)] \frac{d}{d\theta_s} ([T_{dqo}(\theta_s)]^{-1}) \} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (II.14)$$

$$\text{et : } \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (II.15)$$

En remplaçant les équations (II.14) et (II.15) dans (II.13) l'équation nous aurons le système d'équations suivant:

$$(V_s^{dqo}) = \omega_s \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\lambda_s^{dqo}] + \frac{d}{dt} [\lambda_s^{dqo}] + [r_s^{dqo}] (i_s^{dqo}) \quad (II.16)$$

Avec :

$$[r_s^{dqo}] = r_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

$$(V_s^{dqo}) = (V_{ds} \ V_{qs} \ V_{os})^t$$

$$(i_s^{dqo}) = (i_{ds} \ i_{qs} \ i_{os})^t$$

D'où:

$$\begin{cases} V_{qs} = \frac{d\lambda_{ds}}{dt} + \lambda_{qs} \frac{d\theta_s}{dt} + r_s i_{ds} \\ V_{ds} = \frac{d\lambda_{qs}}{dt} - \lambda_{ds} \frac{d\theta_s}{dt} + r_s i_{qs} \\ V_{os} = \frac{d\lambda_{os}}{dt} + r_s i_{os} \end{cases} \quad (II.18)$$

De la même manière nous obtiendrons les équations de tension rotorique en remplaçant l'angle θ_s par l'angle θ_r :

On aura :

$$(V_r^{dqo}) = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\lambda_r^{dqo}] + \frac{d}{dt} [\lambda_r^{dqo}] + [r_r^{dqo}] (i_r^{dqo}) \quad (II.19)$$

Avec :

$$[r_r^{dqo}] = r_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

$$\begin{aligned}
(V_r^{dqo}) &= (V_{dr} \ V_{qr} \ V_{or})^t \\
(i_r^{dqo}) &= (i_{dr} \ i_{qr} \ i_{or})^t \\
\text{et } \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r
\end{aligned} \tag{II.21}$$

D'où:

$$\begin{cases}
V_{dr} = \frac{d\lambda_{dr}}{dt} + \lambda_{qr} \frac{d\theta_r}{dt} + r_r i_{dr} \\
V_{qr} = \frac{d\lambda_{qr}}{dt} - \lambda_{dr} \frac{d\theta_r}{dt} + r_r i_{qs} \\
V_{or} = \frac{d\lambda_{or}}{dt} + r_r i_{or}
\end{cases} \tag{II.22}$$

II.4.2) Equations des flux dans le plan dqo

On applique la Transformé de Park aux équations des flux (II.3) dans le plan abc on aura [14]:

$$[\lambda_s^{dqo}] = [T_{dqo}(\theta_s)] [L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc}] \tag{II.23}$$

On transforme les courants de plan abc au plan dqo :

$$[\lambda_s^{dqo}] = [T_{dqo}(\theta_s)] [L_{ss}^{abc}] [T_{dqo}(\theta_s)]^{-1} [i_s^{dqo}] + [T_{dqo}(\theta_s)] [L_{sr}^{abc}] [T_{dqo}(\theta_r)]^{-1} [i_r^{dqo}] \tag{II.24}$$

$$= \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} [i_s^{dqo}] + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [i_r^{dqo}] \tag{II.25}$$

De meme:

$$[\lambda_r^{dqo}] = [T_{dqo}(\theta - \theta_r)] [L_{rs}^{abc}] [T_{dqo}(\theta)]^{-1} [i_s^{dqo}] + [T_{dqo}(\theta - \theta_r)] [L_{rr}^{abc}] [T_{dqo}(\theta - \theta_r)]^{-1} [i_r^{dqo}]$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\dot{i}_s^{dq0}] + \begin{bmatrix} L_{lr} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} [\dot{i}_r^{dq0}] \quad (II.26)$$

On aura donc dans une structure globale :

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{os} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

II.5) Expression de la puissance et de couple dans les axes d et q

La détermination du couple instantané dans une machine peut être effectuée de deux manières

- Par un bilan de puissance instantanée.
- Par la méthode dite « des travaux virtuels ».

La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statorique et rotorique en fonction des grandeurs d'axes abc est donnée par l'expression suivante [15] :

$$P_{in} = V_{as} i_{as} + V_{bs} i_{bs} + V_{cs} i_{cs} - V_{ar} i_{ar} - V_{br} i_{br} - V_{cr} i_{cr} \quad (II.28)$$

$$P_{in} = (i_s^{abc})^t (V_s^{abc}) - (i_r^{abc})^t (V_r^{abc}) \quad (II.29)$$

$$P_{in} = ([T(\theta_s)]^{-1} i_s^{dq0})^t ([T(\theta_s)]^{-1} V_s^{dq0}) - ([T(\theta_r)]^{-1} i_r^{dq0})^t ([T(\theta_r)]^{-1} V_r^{dq0}) \quad (II.30)$$

$$P_{in} = (i_s^{dq0})^t \{([T(\theta_s)]^{-1})^t ([T(\theta_s)]^{-1})\} (V_s^{dq0}) - (i_r^{dq0})^t \{([T(\theta_r)]^{-1})^t ([T(\theta_r)]^{-1})\} (V_r^{dq0}) \quad (II.31)$$

Avec :

$$\{([T(\theta_s)]^{-1})^t ([T(\theta_s)]^{-1})\} = \{([T(\theta_r)]^{-1})^t ([T(\theta_r)]^{-1})\} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

En injectant les équations (II.18), (II.22) et (II.32) dans l'équation (II.31) puis l'en développe en trois termes comme suite :

$$P_{in} = -\frac{3}{2} \left\{ \frac{d\lambda_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{\lambda_{qs}}{dt} i_{qs} + 2 \frac{d\lambda_{os}}{dt} i_{os} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} i_{dr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} i_{qr} + 2 \frac{d\lambda_{or}}{dt} i_{or} \right\} \\ + \frac{3}{2} \left\{ (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \frac{d\theta_s}{dt} + (\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr}) \frac{d\theta_r}{dt} \right\} - \frac{3}{2} \{ r_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2 + 2i_{os}^2) + r_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2 + 2i_{or}^2) \} \quad (\text{II.33})$$

Avec P_{in} : La puissance électrique.

Cette équation est sous la forme :

$$P_{in} = P_{em} + P_{mec} + P_J \quad (\text{II.34})$$

- Le premier terme représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée par unité de temps.
- Le deuxième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique.
- Le troisième terme correspond aux pertes joule.

$$\text{Sachant que : } (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = - (\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr})$$

Le deuxième terme de l'équation (II.33) devient

$$\frac{3}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \left\{ \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \right\} = \frac{3}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \left\{ \frac{d\theta}{dt} \right\} = \frac{3}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \omega_r \quad (\text{II.35})$$

Le couple magnétique est égal au rapport du second terme divisé sur la vitesse de rotation ω_r

$$T_{em} = \frac{3}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.36})$$

Dans le cas des machines a plusieurs paire de poles, le couple s'exprime comme suite

$$T_{em} = \frac{3}{2} p1 (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II. 37})$$

$p1$ est le nombre de paire de poles.

II.6) Equation mécanique de la MAS

L'équation mécanique de la MAS est :

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (\text{II.38})$$

Où :

T_{mech} : Couple résistant incluant les frottements et le couple de charge.

T_{em} : Couple électromagnétique.

T_{damp} : Couple résistant.

II.7) Choix de référentiel

Le référentiel est le système (O_d , O_q) associé à la vitesse de rotation choisie pour lui. Trois type de référentiels sont intéressants en pratique, le choix se faisant en fonction du problème à étudier. [13], [18] On distingue par :

ω_s : vitesse électrique du champ tournant (pulsation des courants statoriques).

ω_r : vitesse de rotation électrique de rotor.

g : glissement défini par : $g = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$

a. Référentiel immobile par rapport au rotor

Il est régi par les conditions suivantes : $d(\Theta_s)/dt = \omega_s$; $d(\Theta_r)/dt = 0$.

Ce référentiel est préférable dans le cas où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

$$d(\Theta_s)/dt = \omega_s \quad d(\Theta_r)/dt = \omega_s - \omega_r = g \omega_s$$

$g \omega_s$: pulsation des courants rotoriques en régime asynchrone.

Intéressant aussi dans le cas où la fréquence d'alimentation des moteurs est constante. Il est souvent utilisé même dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrones à fréquence faible,

b. Référentiel immobile par rapport au stator

Il se traduit par : $d(\Theta_r)/dt = \omega_r$; $d(\Theta_s)/dt = 0$.

Ce référentiel est intéressant dans le cas de variations importantes de la vitesse de rotation.

c. Référentiel lié au synchronisme

Dans ce cas, la vitesse repère d q est la vitesse du synchronisme ω_s (vitesse du champ tournant),

$$d(\Theta_s)/dt = \omega_s \quad , \quad d(\Theta_r)/dt = \omega_s - \omega$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation.

II.8) Régime permanent asynchrone, schéma équivalent

Le rotor est en court circuit.

Soit un plan complexe, où l'axe q est pris comme axe des réels et l'axe d comme celui des imaginaires.

$$\begin{aligned}
 \vec{I}_s \sqrt{2} &= i_{qs} + j i_{ds} = \vec{I}_{qs} + \vec{I}_{ds} \\
 \vec{I}_r \sqrt{2} &= i_{qr} + j i_{dr} = \vec{I}_{qr} + \vec{I}_{dr} \\
 \vec{V}_s \sqrt{2} &= v + j v_{ds} = \vec{V}_{qs} + \vec{V}_{ds} \\
 \vec{V}_r \sqrt{2} &= v_{qr} + j v_{dr} = \vec{V}_{qr} + \vec{V}_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{II.39}$$

D'où :

$$\begin{aligned}
 \vec{I}_{ds} &= j i_{ds} \Rightarrow i_{ds} = -j \vec{I}_{ds} \\
 \vec{V}_{ds} &= j v_{ds} \Rightarrow v_{ds} = -j \vec{V}_{ds} \\
 \vec{I}_{dr} &= j i_{dr} \Rightarrow i_{dr} = -j \vec{I}_{dr} \\
 \vec{V}_{dr} &= j v_{dr} \Rightarrow v_{dr} = -j \vec{V}_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{II.40}$$

Et :

$$\vec{I}_{qs} = i_{qs} ; \vec{I}_{qr} = j i_{qr} ; \vec{V}_{qs} = j v_{qs} ; \vec{V}_{qr} = j i_{qr} ; \overline{E \sqrt{2}} = E \sqrt{2}
 \tag{II.41}$$

En régime permanent avec un référentiel lié au champ tournant les équations de tension rotorique et statorique sont :

$$\begin{cases}
 v_{ds} = -\lambda_{qs} \omega - r_s i_{ds} \\
 v_{dr} = g \omega \lambda_{qr} + r_r i_{dr} \\
 v_{qs} = \lambda_{ds} \omega - r_s i_{qs} \\
 v_{qr} = -g \omega \lambda_{dr} + r_r i_{qr}
 \end{cases}
 \tag{II.42}$$

Nous exprimons cette équation de tension sous forme vectorielle en utilisant les équations précédentes :

a. Au stator

$$\vec{V}_{qs} = -j\omega(\vec{\lambda}_{ds}) - r_s \vec{I}_{qs} \quad (\text{II.43})$$

$$-j \vec{V}_{ds} = -\omega(\vec{\lambda}_{qs}) + j r_s \vec{I}_{ds}$$

$$\Rightarrow j \{-j \vec{V}_{ds}\} = j \{-\omega \vec{\lambda}_{qs} + j r_s \vec{I}_{ds}\} \quad (\text{II.44})$$

$$\vec{V}_{ds} = -j\omega(\vec{\lambda}_{qs}) - r_s \vec{I}_{ds} \quad (\text{II.45})$$

$$\vec{V}_s = \vec{V}_{qs} + \vec{V}_{ds} = -j\omega(\vec{\lambda}_{ds}) - j\omega(\vec{\lambda}_{qs}) - r_s(\vec{I}_{qs} + \vec{I}_{ds})$$

$$\vec{V}_s = -j\omega(\vec{\lambda}_s) - r_s \vec{I}_s \quad (\text{II.46})$$

b. Au rotor

$$g\omega(\vec{\lambda}_{qr}) - j r_r \vec{I}_{dr} = 0 \quad (\text{II.47})$$

$$\Rightarrow j \{g\omega(\vec{\lambda}_{qr}) - j r_r \vec{I}_{dr}\} = 0$$

$$\Rightarrow j g\omega(\vec{\lambda}_{qr}) + j r_r \vec{I}_{dr} = 0 \quad (\text{II.48})$$

$$j g\omega(\vec{\lambda}_{dr}) + r_r \vec{I}_{qr} = 0 \quad (\text{II.49})$$

$$\Rightarrow j g\omega(\vec{\lambda}_{dr} + \vec{\lambda}_{qr}) + r_r(\vec{I}_{dr} + \vec{I}_{qr}) = 0$$

$$J g\omega(\vec{\lambda}_r) + r_r \vec{I}_r = 0 \quad (\text{II.50})$$

Remplaçons les flux par leurs expressions:

$$\begin{cases} (\vec{\lambda}_s) = L_s \vec{I}_s + M \vec{I}_r \\ (\vec{\lambda}_r) = L_r \vec{I}_r + M \vec{I}_s \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

Avec :

$$\begin{cases} L_s = L_{as} - M_{as} \\ L_r = L_{ar} - M_{ar} \\ M = \frac{3}{2} L_{rs} \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

En remplaçant les équations (II.51) dans (II. 46) et (II. 50) on aura :

$$\vec{V}_s = -jL_s\omega\vec{I}_s - jM\omega\vec{I}_r - r_s\vec{I}_s \quad (\text{II.53})$$

$$jg L_r\omega\vec{I}_r - jg M\omega\vec{I}_s - r_r\vec{I}_r = 0 \quad (\text{II.54})$$

c. Schéma équivalent

Calculant le rapport de transformation à vide et prenant ($g=1$) ($\omega_r = 0$), r_s négligeable :

$$k = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_{ro}}{v_{so}} = \frac{-jM\omega\vec{I}_s}{j\omega L_s\vec{I}_s} = -\frac{M}{L_s} \quad (\text{II.55})$$

$$\vec{I}_r = -\frac{L_s}{M}\vec{I}_{r'} \quad (\text{II.56})$$

Nous remplaçant \vec{I}_r dans l'équation (II.53) :

$$\begin{aligned} \vec{V}_s &= -jL_s\omega\vec{I}_s - jM\omega\left(-\frac{L_s}{M}\vec{I}_{r'}\right) - r_s\vec{I}_s \\ \Rightarrow \vec{V}_s &= -jL_s\omega(\vec{I}_s - \vec{I}_{r'}) - r_s\vec{I}_s \end{aligned} \quad (\text{II.57})$$

Nous remplaçant \vec{I}_r dans l'équation (II.54) puis en multiplie par $\frac{L_s}{M}$ nous aurons :

$$-jg L_r\omega\frac{L_s^2}{M^2}\vec{I}_{r'} - jg M\omega\vec{I}_s - r_r\frac{L_s^2}{M^2}\vec{I}_{r'} = 0 \quad (\text{II.58})$$

L'induction de fuite totale est :

$$N_r = L_r - \frac{M^2}{L_s} \quad \text{D'où : } L_r = N_r + \frac{M^2}{L_s}$$

En remplaçant L_r dans l'équation (II.58) puis en pose $N_r' = N_r \frac{L_s^2}{M^2}$ et $r_r' = r_r \frac{L_s^2}{M^2}$ on obtient :

$$jL_s\omega (\vec{I}_s - \vec{I}_{r'}) = j N_r' \omega \vec{I}_{r'} + \frac{r_r'}{g} \vec{I}_{r'} \tag{II.59}$$

Des équations (II.57) et (II.59) on a construit le schéma équivalent

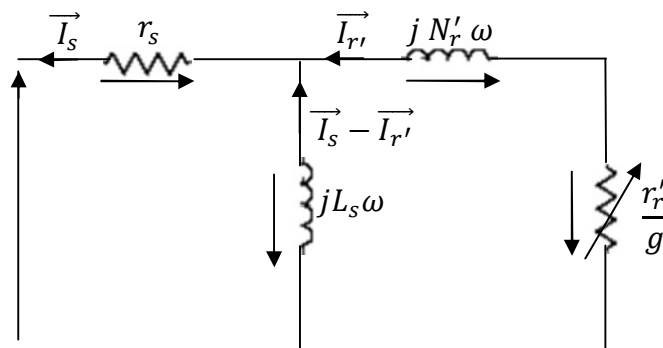


Fig. (II.3) : schéma équivalent d'une machine asynchrone [11]

II.10) Modèle de simulation de la MAS

La simulation de notre machine se fera sur la base des équations définies précédemment, c'est équations seront exprimées en unités réduites en utilisant les grandeurs de base suivantes :

$$I_b = \frac{2S_b}{3V_b} ; \quad Z_b = \frac{V_b}{I_b} ; \quad T_{emb} = \frac{S_b}{\left(\frac{2\omega_b}{P}\right)} ; \quad \psi = \omega_b \lambda ; \quad x = \omega_b L .$$

Avec :

S_b, V_b, ω_b , sont les grandeurs de base relative a la puissance apparente, la tension simple et la vitesse, P le nombre de pôles.

Le modèle des équations de la MAS dans le repère stationnaire dqo peut être écrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \psi_{qs}^s = \omega_b \int \{V_{qs}^s + \frac{r_s}{x_{ls}}(\psi_{mq}^s - \psi_{qs}^s)\} dt \\ \psi_{ds}^s = \omega_b \int \{V_{ds}^s + \frac{r_s}{x_{ls}}(\psi_{md}^s - \psi_{ds}^s)\} dt \\ i_{os} = \frac{\omega_b}{x_{ls}} \int \{V_{os} - i_{os} r_s\} dt \end{cases} \quad (II.60)$$

$$\begin{cases} \psi'_{qr}{}^s = \omega_b \int \{V'_{qr}{}^s + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr}{}^s + \frac{r'_r}{x'_{lr}}(\psi_{mq}^s - \psi'_{qr}{}^s)\} dt \\ \psi'_{dr}{}^s = \omega_b \int \{V'_{dr}{}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr}{}^s + \frac{r'_r}{x'_{lr}}(\psi_{md}^s - \psi'_{dr}{}^s)\} dt \\ i'_{os} = \frac{\omega_b}{x'_{lr}} \int \{V'_{or} - i'_{or} r'_r\} dt \end{cases} \quad (II.61)$$

$$\begin{cases} \psi_{mq}^s = x_M \left(\frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}{}^s}{x'_{lr}} \right) \\ \psi_{md}^s = x_M \left(\frac{\psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}{}^s}{x'_{lr}} \right) \end{cases} \quad (II.62)$$

$$\begin{cases} \psi_{qs}^s = x_{ls} i_{qs}^s + \psi_{mq}^s \\ \psi_{ds}^s = x_{ls} i_{ds}^s + \psi_{md}^s \\ \psi'_{qr}{}^s = x'_{lr} i'_{qr}{}^s + \psi_{mq}^s \\ \psi'_{dr}{}^s = x'_{lr} i'_{ds}^s + \psi_{md}^s \end{cases} \quad (II.63)$$

$$\begin{cases} i_{qs}^s = \frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} \\ i_{ds}^s = \frac{\psi_{ds}^s - \psi_{md}^s}{x_{ls}} \\ i'_{qr}{}^s = \frac{\psi'_{qr}{}^s - \psi_{mq}^s}{x'_{lr}} \\ i'_{dr}{}^s = \frac{\psi'_{dr}{}^s - \psi_{md}^s}{x'_{lr}} \end{cases} \quad (II.64)$$

Où :

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}} \quad (II.65)$$

Equation de couple:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_b} (\psi_{ds}^s i_{qs}^s - \psi_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (II.66)$$

L'équation de mouvement de rotor est obtenue par égalité de moment d'inertie au couple de rotation :

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (II.67)$$

Quand on fait usagé conjointement avec l'équation (II.67), la vitesse de l'unité et $(\frac{\omega_r}{\omega_b})$ on

aura : Avec $\omega_r = \frac{p}{2} \omega_{rm}$

$$\frac{2J\omega_b}{p} \frac{d(\frac{\omega_r}{\omega_b})}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (II.68)$$

Et la constante d'inertie H égale :

$$H = \frac{J \omega_{bm}^2}{2S_b} \quad (II.69)$$

L'équation (II.69) dans (II.68) on aura :

$$2H \frac{d(\frac{\omega_r}{\omega_b})}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp}. \quad (II.70)$$

II.11) Implémentation du modèle de la machine asynchrone en vue de sa simulation

A partir des équations de différentes machines étudiées dans les chapitres précédents, nous allons construire les schémas blocs de simulation pour chacune, puis le schéma global du

système sous MATLAB/SIMULINK, ainsi que les résultats de la simulation et leurs interprétations.

II.11.1) Les schémas blocs

1) Schéma bloc de la transformée de PARK

a. La transformée directe

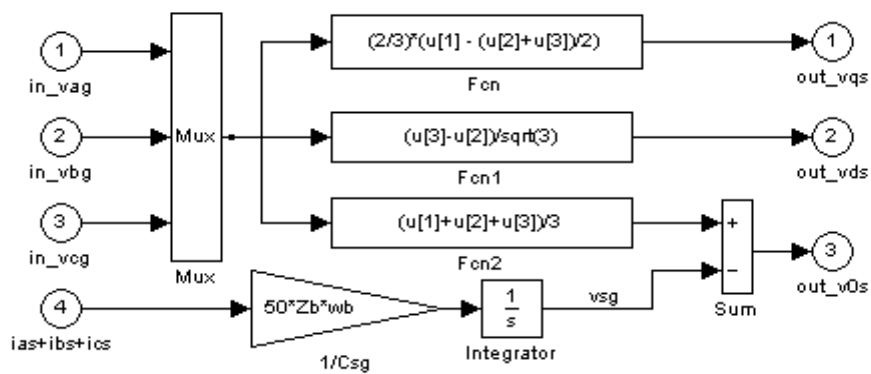


Fig (II.7) : schéma de la transformée directe (abc2dq)

b. la transformée inverse

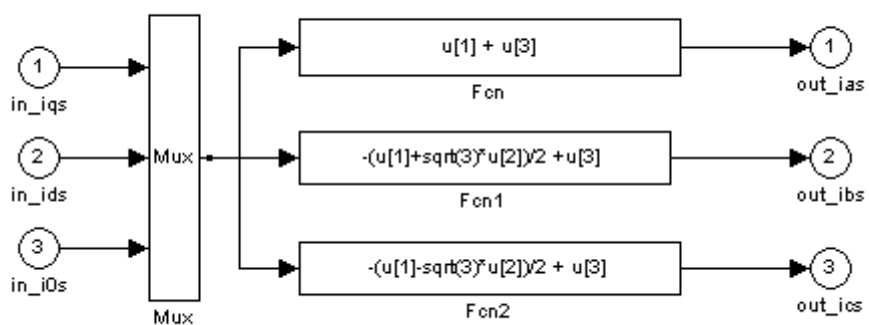


Fig (II.8) : schéma de la transformée inverse (dq2abc)

2) Schéma bloc du rotor de la machine asynchrone

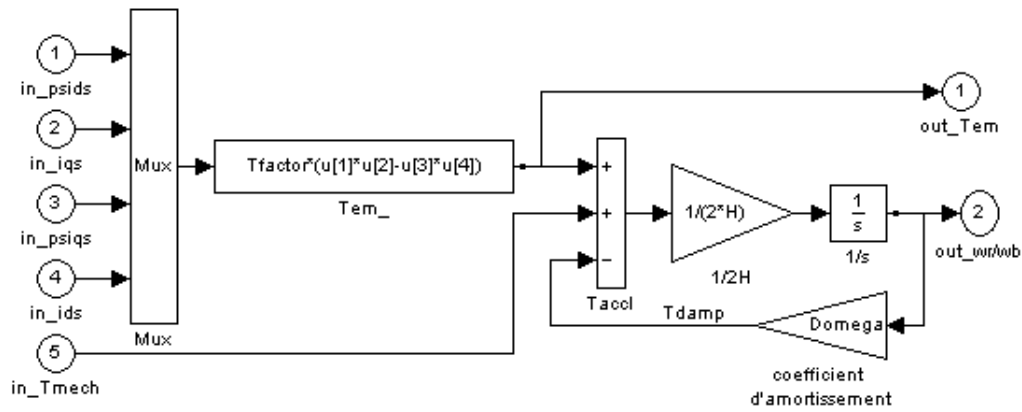


Fig (II.9) : Schéma bloc du rotor.

3) Schéma bloc dans l'axe d

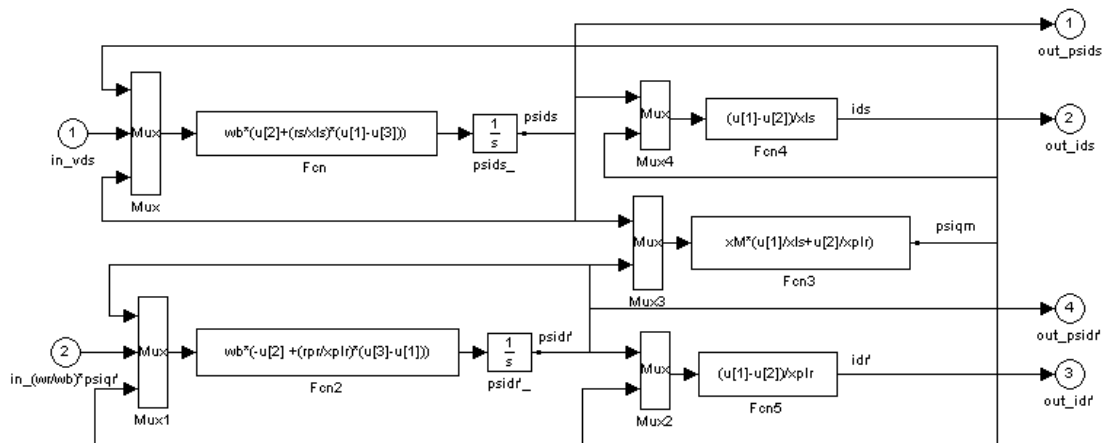


Fig (II-10) : Schéma bloc des équations dans l'axe d (Daxis).

4) Schéma bloc dans l'axe q

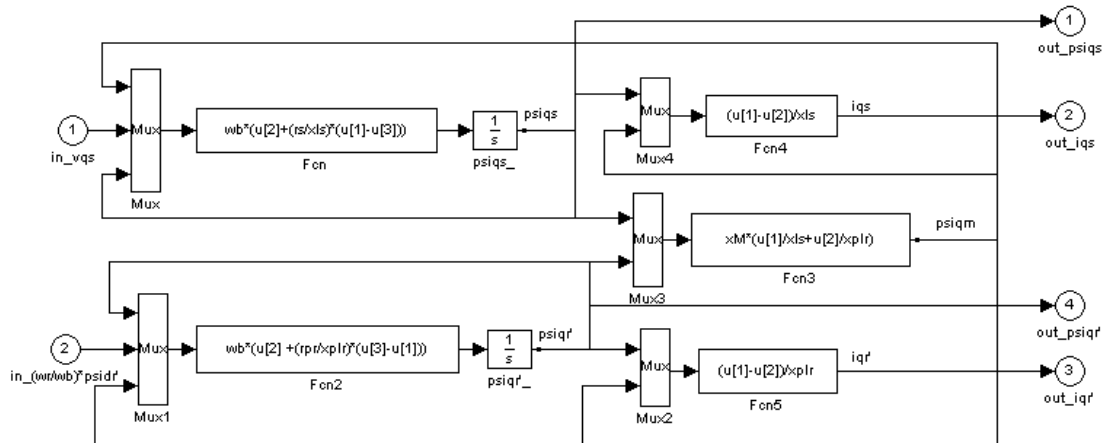


Fig (II.11) : Schéma bloc des équations dans l'axe q (Qaxis)

5) Schéma bloc des composantes homopolaires Zero_seq :

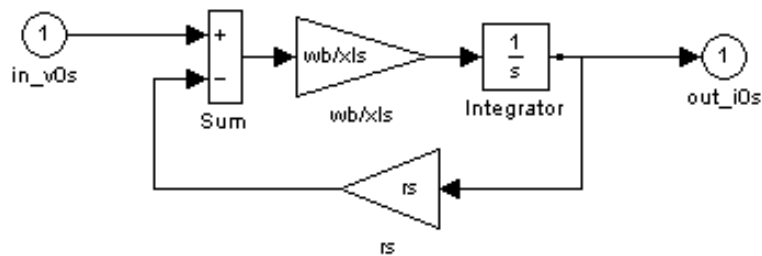


Fig (II.12): Schéma bloc des composantes homopolaires (Zero_seq)

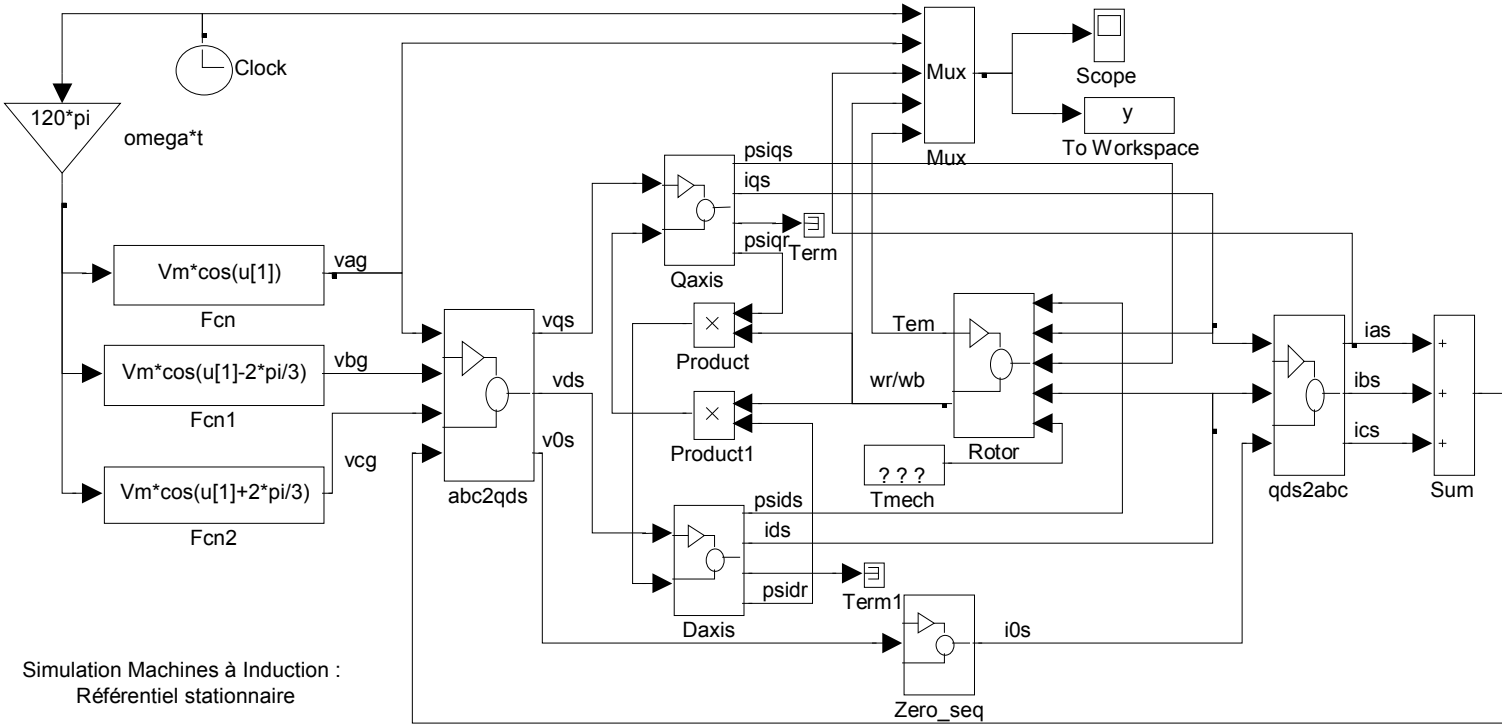


Fig.(II.13) Fig (II.12): Schéma bloc de simulation de la MAS

II-12) Simulation de la machine**a) Les paramètres de la machine**

<i>Désignations</i>	<i>symboles</i>	<i>valeurs</i>
<i>Tension composée (V)</i>	<i>Vrated</i>	200
<i>Puissance absorbée (w)</i>	<i>Prated</i>	750
<i>Facteur de puissance</i>	<i>Pf</i>	0.8
<i>Nombre de paire de pole</i>	<i>P</i>	4
<i>Fréquence (Hz)</i>	<i>frated</i>	50
<i>Resistance statorique (Ohm)</i>	<i>rs</i>	3.35
<i>Resistance du rotor ramenée (Ohm)</i>	<i>rpr</i>	1.99
<i>Inertie (kg m²)</i>	<i>J</i>	0.1
<i>Réactance de l'enroulement statorique et rotorique (Ohm)</i>	<i>xls=xlr</i>	2.179
<i>Réactance mutuelle (Ohm)</i>	<i>xm</i>	51.41

b) Résultats de la simulation

Dans le but de valider les différents modèles, nous allons faire la réalisation des tracés de quelques grandeurs principales du système pour machine étudiée.

d. Dans un premier lieu, nous présentons les réponses transitoires relatives des différentes machines.

e. En second lieu nous allons faire une interprétation des différentes courbes obtenues.

L'objectif de cette simulation consiste à montrer l'influence des différentes grandeurs (courant, tension, vitesse, couple) que délivre la machine asynchrone pour entrainer l'hélice.

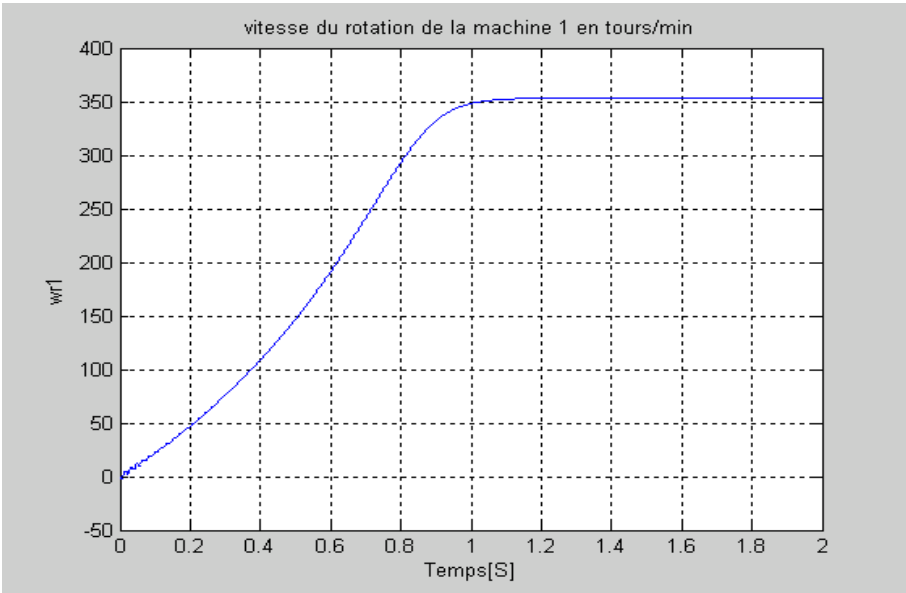


Fig (II.14)

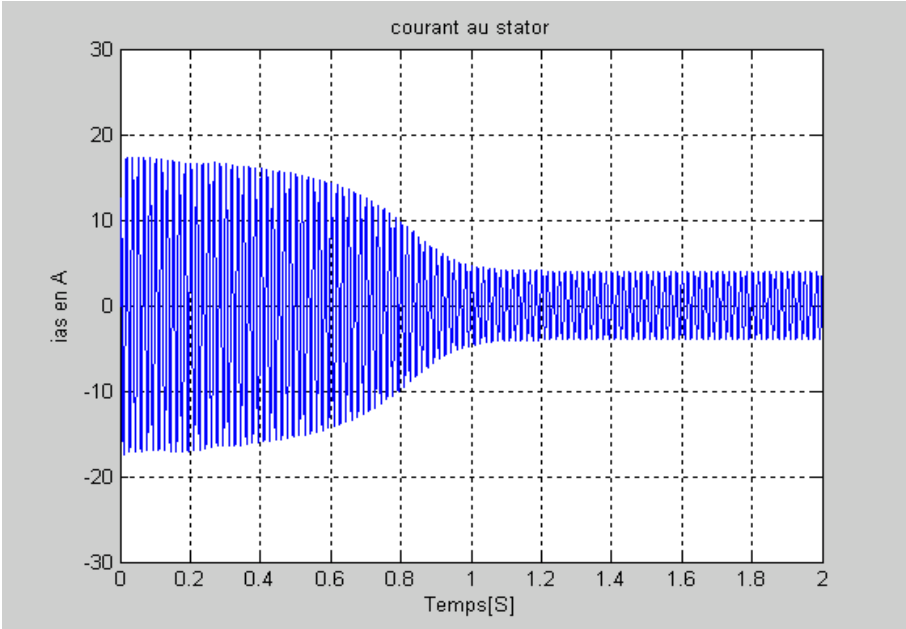


Fig (II.15)

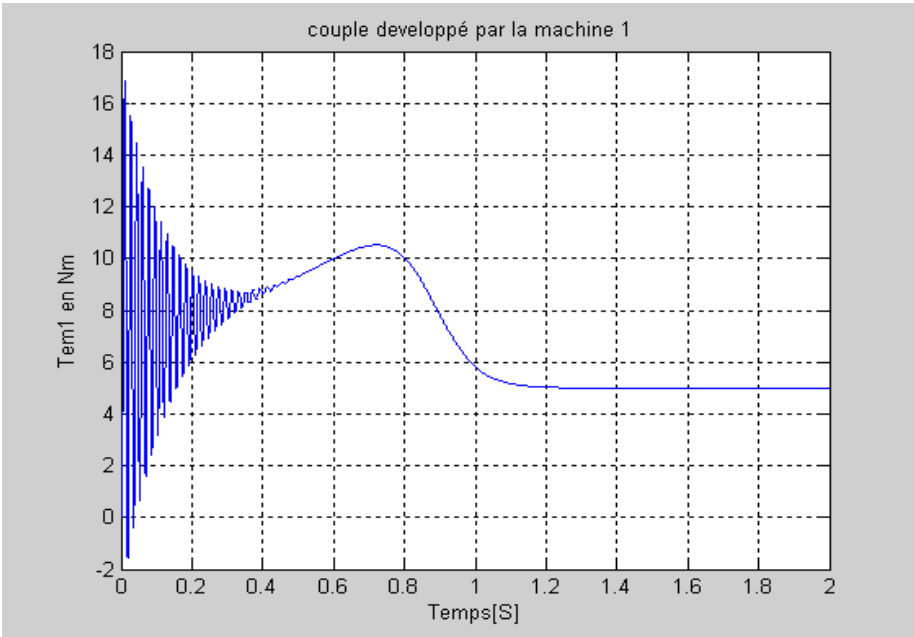


Fig (II.16)

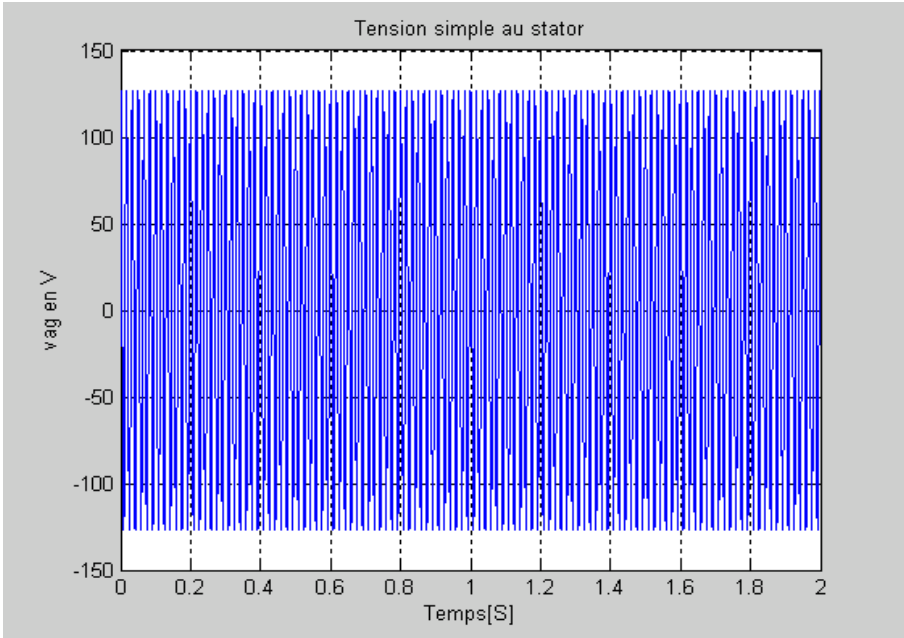


Fig (II.17)

c) Les interprétations des résultats

D'après les résultats obtenus, on constat que le régime transitoire est environ « 1 seconde. ».

a- La figure (II.14) représente l'évolution de la vitesse en fonction de temps, son allure nous montre qu'elle atteint la vitesse nominale au bout d'une seconde pour un couple résistant nominal et de l'inertie totale ramenée à l'arbre du moteur ($J=0.1 \text{ kg m}^2$).

b- La figure (II.15) représente l'allure du courant (i_{sa}) d'une phase de stator, pendant la période du démarrage on remarque que ce courant atteint une forte valeur pendant environ une seconde puis décroît pour atteindre le régime forcé permanent égal au régime statique.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons définis la description de la machine asynchrone, et un aperçu général sur sa modélisation, et cela en faisant appel à la transformation de Park.

Nous avons adaptés pour notre étude un référentiel liées au stator, de fait qu'il est intéressant dans le cas de variation de vitesse.

Puis on a fait une simplification aux équations de la machine asynchrone afin d'effectuer les différents calculs des paramètres, et en fin on a traduit les différentes équations aux schémas de simulation sous Matlab.

CHAPITRE III

*PRESENTATION ET MODELISATION DE LA
MACHINE SYNCHRONE*

Introduction

La majorité des générateurs à courant alternatif sont des alternateurs, leurs puissances apparentes sont comprises entre quelques centaines de [VA] pour les plus petites et plus de 1600 MVA pour les plus grosses unités. L'alternateur transforme en énergie électrique, l'énergie mécanique qui lui est fournie par la machine qui l'entraîne. Il est conçu pour produire des tensions et des courants sinusoïdaux. Le rotor de l'alternateur est entraîné mécaniquement par un moyen quelconque (turbine, moteur diesel...etc.) à la vitesse angulaire ω . Le courant continu circulant dans l'enroulement de rotor engendre dans l'entrefer un champ magnétique dont la composante fondamentale est sinusoïdale et comporte $2p$ pôles.

*Dans ce présent chapitre, nous présentons la modélisation de la **Machine Synchrone**(MS) à travers la mise en équations des relations électriques, magnétiques et mécaniques. Cette mise en équations nous conduit à la résolution des systèmes différentiels qui peuvent être exprimés en termes variables d'états (courants, flux, vitesse) qui sont liées entre elles et faisant intervenir des coefficients pouvant varier aussi bien en fonction des phénomènes électriques, magnétiques et mécaniques. Pour surmonter ces difficultés, deux démarches sont adoptées. La première consiste à poser des hypothèses simplificatrices relatives aux paramètres électriques et magnétiques. La seconde consiste en une transformation mathématique qui permet de décrire le comportement des différentes grandeurs régissant le fonctionnement de la MS en linéarisant les équations différentielles, c'est la transformation de Park.*

L'objet de ce chapitre est d'avoir une mise en équations de la MS et d'obtenir un modèle simplifié en vue de réaliser des simulations de son fonctionnement en régimes transitoire.

III.1) Structure des machines synchrone à inducteur bobine

Le générateur synchrone, est une machine tournante qui contient, un inducteur tournant appelé « rotor », et un induit statique appelé « stator » qui sont séparés par un entrefer cylindrique. Le stator composé de trois enroulements identiques décalés de 120° dans l'espace. Ces trois enroulements sont couplés en étoile, ce qui annule la composante homopolaire du courant. Le rotor est constitué de pôles, autour desquels est bobiné l'enroulement inducteur. Cet enroulement est traversé par un courant continu, et donne naissance à une force magnétomotrice le long de l'entrefer. En régime permanent, la vitesse de rotation du rotor est identique à celle du champ tournant créé par le stator, d'où l'appellation « machine synchrone ». Il est constitué aussi de deux enroulements amortisseurs qui ont la forme de barre en cuivre dont les extrémités, de chaque côté, sont reliées par des conducteurs de faible résistance.

Pour les hypothèses simplificatrices, elles sont identiques à celles faites pour la machine Asynchrone. Bien que la machine asynchrone vue dans le chapitre II soit utilisée en moteur, nous adopterons les mêmes conventions de signe que pour la machine asynchrone. (Voir chap. II)
[13], [14]

III.2) Description de la machine synchrone

La machine synchrone triphasée à pôles saillants et inducteur bobiné possède:

- *Trois enroulements statoriques fixes, repérés « abc » ;*
- *Un enroulement inducteur tournant, repéré f ;*
- *Deux enroulements amortisseurs tournants, repérés (kd) et (kq) . Ces enroulements sont en court-circuit. **[13], [16]***

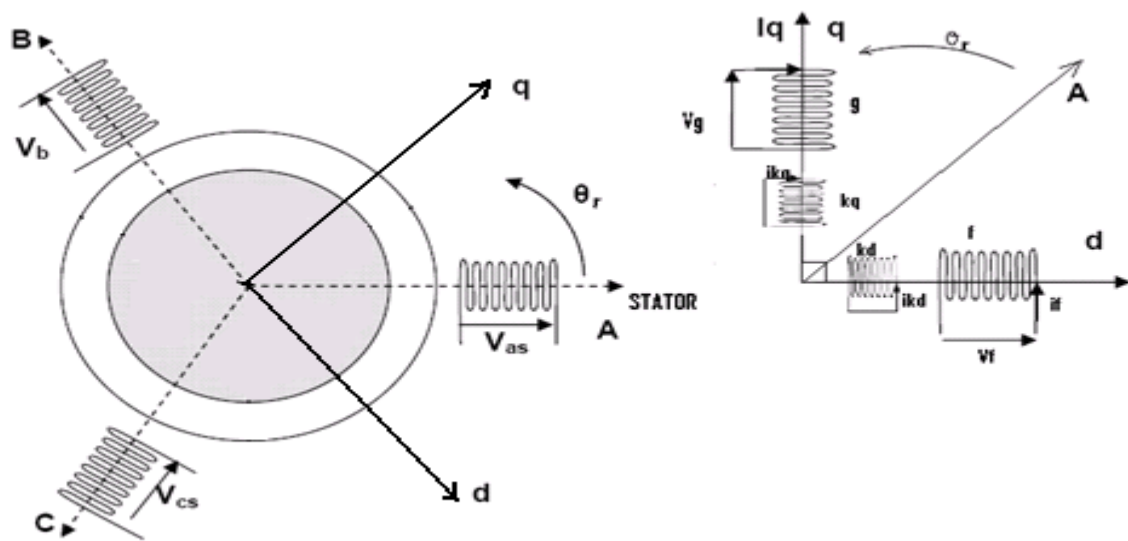


Fig. (III.1) : Schéma équivalent de la machine synchrone dans le plan dq

$$(Oa, Od) = \theta; \quad (Oc, Od) = \theta - (2\pi/3); \quad (Ob, Od) = \theta - (4\pi/3).$$

On définit les axes suivants :

L'axe Od est l'axe du bobinage inducteur, et l'axe Oq est situé entre deux pôles. D'un point de vue électrique, ces deux axes sont en quadrature. En effet, les angles mécaniques et électriques sont liés par le nombre de paires de pôles ($\omega_r = \omega/P = 2\pi f/P$ soit $\theta_{mec} = \theta_{ele}/P$).

Ces axes sont également ceux des enroulements amortisseurs. Ils sont liés au rotor et tournent avec lui.

ω_r : La vitesse de rotation du rotor.

θ : représente l'écart angulaire de l'axe Od du rotor par rapport à l'axe Oa du stator.

Durant un fonctionnement nominal de la machine, l'amortisseur en court-circuit ne sert à rien, en effet il tourne à la même vitesse que les champs tournants ; il n'est par conséquent, soumis à aucune force électromotrice et n'est parcouru par aucun courant, donc leurs influences peuvent être négligées. En effet, ils interviennent essentiellement dans les régimes subtransitoires, et ne jouent aucun rôle significatif dans l'étude des régimes transitoires.

D'autre part les Alternateurs synchrones étant quasiment toujours autopilotée, (il n'y a pas des changements brusque de courant ou de fréquence de l'alimentation), les vitesses de rotation du champ tournant et du rotor sont liées, ce qui réduit considérablement le rôle des amortisseurs.

III.3) Modèle en abc du la machine synchrone

Le modèle en abc découle directement des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement du la machine synchrone. Ces équations s'obtiennent par application de la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine. [15]

III.3.1) Equations électriques

Comme toutes les machines électriques alternatives, les équations électriques de la MS s'expriment en fonction des différents courants dans ces enroulements et de la dérivée de leurs flux. [12]

a) Equations électriques de stator

Les équations des tensions de stator sont :

$$\begin{cases} V_{as} = r_s i_{as} + \frac{d}{dt}(\lambda_{as}) \\ V_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d}{dt}(\lambda_{bs}) \\ V_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d}{dt}(\lambda_{cs}) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

*Où : V_{as}, V_{bs}, V_{cs} représente les tensions sources aux bornes des enroulements,
 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} , les courants qui les parcourent*

b) Equations électriques de rotor

Les équations des tensions de rotor sont :

$$\begin{cases} V_f = r_f i_f + \frac{d}{dt}(\lambda_f) \\ V_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{d}{dt}(\lambda_{kd}) \\ V_g = r_g i_g + \frac{d}{dt}(\lambda_g) \\ V_{kq} = r_{kq} i_{kq} + \frac{d}{dt}(\lambda_{kq}) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

r_s : Résistance d'une phase de l'induit.

r_r : Résistance d'une phase de l'inducteur.

r_f : Résistance propre de l'enroulement d'inducteur d'axe d

r_g : Résistance propre de l'enroulement d'inducteur d'axe q

r_{kd} : Résistance propre de l'enroulement amortisseur d'axe d

r_{kq} : Résistance propre de l'enroulement amortisseur d'axe q

c) Equations des flux magnétique

Les équations des flux sont données par :

$$\begin{cases} [\lambda_s] = [L_{ss}][i_s] + [L_{sr}][i_r] \\ [\lambda_r] = [L_{sr}]^t [i_s] + [L_{rr}][i_r] \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$\begin{cases} [i_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t \\ [i_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t \end{cases}$$

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_o + L_{ms} \cos \theta_r & -\frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{ls} + L_o - L_{ms} 2 \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi) \\ -\frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_o - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_o - L_{ms} 2 \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lf} + L_{mf} & L_{fkd} & 0 & 0 \\ L_{fkd} & L_{lkd} + L_{mkd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lg} + L_{mg} & L_{gkd} \\ 0 & 0 & L_{kqg} & L_{lkq} + L_{mkq} \end{bmatrix} \quad (III.5)$$

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sf} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r & L_{sg} \cos \theta_r & L_{skq} \cos \theta_r \\ L_{sf} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sg} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sf} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sg} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

L_{ls} : Inductance de fuite de stator

L_{lf} : Inductance de fuite propre a l'enroulement inducteur d'axe d

L_{lg} : Inductance de fuite propre a l'enroulement inducteur d'axe q

L_{lkd} : Inductance de fuite de l'amortisseur dans d'axe d

L_{lkq} : Inductance de fuite de l'amortisseur dans d'axe q

L_{mf} : Inductance de magnétisation propre de l'enroulement d'axe d

L_{mg} : Inductance de magnétisation propre des enroulements d'axe q

L_{mkd} : Inductance de magnétisation propre des enroulements amortisseurs d'axe d

L_{mkq} : Inductance de magnétisation propre des enroulements amortisseurs d'axe q

III-4) Choix des différents repères

La transformation de Park se rattache à un système d'axes déterminé, il est primordial d'en recenser le privilège. Ceux-ci sont au nombre de trois, liés au stator, soit au rotor, soit aux champs tournants dans l'entrefer. Pour la machine synchrone, il paraît naturel de fixer la transformation par rapport au rotor. [16]

Pour se placer dans ces repères privilégiés les angles de transformation sont fixes à :

Dans le cas d'un repère lié au rotor :

$$\theta_s = \theta \quad , \quad \theta_r = 0$$

Dans le cas d'un repère lié au stator :

$$\theta_s = 0 \quad , \quad \theta_r = -\theta$$

III-5) Modèle de la MS dans le plan dqo

De la même manière que pour la MAS, à travers la transformation des variables par la matrice $[T(\theta)]$ (matrice de la transformation de Park), les équations des tensions au stator(III.1) deviennent [12], :

$$V_s^{dqo} = [T(\theta_r)] r_s [T(\theta_r)]^{-1} [i_s^{dqo}] + [T(\theta_r)] \frac{d}{dt} [T(\theta_r)]^{-1} [\lambda_s^{dqo}] \quad (\text{III.7})$$

Toutes en sachant que : $r_a = r_b = r_c = r_s$. On compare les termes de l'équation (III.7) à l'équation précédente(III.1) on aura :

$$[T(\theta_r)] r_s [T(\theta_r)]^{-1} [i_s^{dqo}] = r_s [i_s^{dqo}] \quad (\text{III.8})$$

Le développement du deuxième terme de droite de l'équation (III.7) exprimant la variation des flux s'écrit comme suit :

$$[T(\theta_r)] \frac{d}{dt} [T(\theta_r)]^{-1} [\lambda_s^{dqo}] = [T(\theta_r)] \left\{ \left(\frac{d}{dt} [T(\theta_r)]^{-1} \right) [\lambda_s^{dqo}] + [T(\theta_r)]^{-1} \frac{d}{dt} [\lambda_s^{dqo}] \right\} \quad (\text{III.9})$$

En simplifiant le premier terme de l'expression (III.9), toutes en détaillant l'écriture matricielle on aura :

$$\frac{d}{dt} [T(\theta_r)]^{-1} [\lambda_s^{dqo}] = \omega_r \begin{bmatrix} -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} [\lambda_s^{dqo}] \quad (\text{III.10})$$

Avec:

$$[T(\theta_r)] \frac{d}{dt} [T(\theta_r)]^{-1} [\lambda_s^{dqo}] = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\lambda_s^{dqo}] \quad (\text{III.11})$$

Où:

$$d(\theta_r) / dt = \omega_r$$

Le second terme de l'expression (III.9) se réduit à:

$$[T(\theta_r)] [T(\theta_r)]^{-1} \frac{d}{dt} [\lambda_s^{dqo}] = \frac{d}{dt} [\lambda_s^{dqo}] \quad (\text{III.12})$$

L'introduction des expressions (III.8), (III.11), (III.12) dans les équations des tensions au stator(III.7), nous conduit aux expressions dans les axes d-q, qui s'écrivent comme suit :

$$V_s^{dqo} = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\lambda_s^{dqo}] + \frac{d}{dt} [\lambda_s^{dqo}] + [r_s^{dqo}] [i_s^{dqo}] \quad (\text{III.13})$$

Cette équation (II.13) présente deux termes de variation des flux.

$\frac{d}{dt} [\lambda_s^{dq0}]$: exprime une f.e.m de transformation, qui est un terme relatif à la variation dans le temps.

$[\lambda_s^{dq0}]$: exprime une f.e.m de rotation (variation de la position de rotor)

III-6) L'équation des flux statorique dans le plan dqo

La correspondance entre les relations de flux $[\lambda_s^{dq0}]$ et les courants dans le plan dqo peut être obtenue par la transformation des équations de flux au stator (III.3) comme suit : [12]

$$[\lambda_s^{dq0}] = [T(\theta_r)]L_{ss} [T(\theta_r)]^{-1}[i_s^{dq0}] + [T(\theta_r)]L_{sr}[i_r^{abc}] \quad (\text{III.14})$$

III-6-1) Etablissement des équations électriques

En tenant compte des changements de variables des inductances propre et mutuelle de stator suivants [12] :

$$\begin{cases} \lambda_q = \{L_{ls} + \frac{3}{2}(L_o - L_{ms})\}i_q + L_{sg}i_g + L_{skq}i_{kq} \\ \lambda_d = \{L_{ls} + \frac{3}{2}(L_o + L_{ms})\}i_d + L_{sf}i_f + L_{skd}i_{kd} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Les inductances de rotor restent les mêmes :

$$\begin{cases} \lambda_f = \frac{3}{2}L_{sf}i_d + L_{ff}i_f + L_{fkd}i_{kd} \\ \lambda_{kd} = \frac{3}{2}L_{skd}i_d + L_{fkd}i_f + L_{kdkd}i_{kd} \\ \lambda_g = \frac{3}{2}L_{sg}i_q + L_{gg}i_g + L_{fkq}i_{kq} \\ \lambda_{kq} = \frac{3}{2}L_{skq}i_q + L_{gkq}i_g + L_{kqkq}i_{kq} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

D'après ces équations on remarque que les courants statoriques i_d , i_q ont un facteur de $(3/2)$ qui rend le coefficient de la matrice inductance des enroulements dq non symétrique. Pour avoir la symétrie on applique le changement suivant aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} \underline{i}_f = \frac{3}{2} i_f \\ \underline{i}_{kd} = \frac{3}{2} i_{kd} \\ \underline{i}_g = \frac{3}{2} i_g \\ \underline{i}_{kq} = \frac{3}{2} i_{kq} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Pour avoir l'équilibre magnétique des inductances pour les enroulements statoriques dans les axes d et q , on a remplacés les inductances L_{md} et L_{mq} dans l'équation (III.15) par :

$$\begin{cases} L_{md} = \frac{3}{2} (L_o + L_{ms}) \\ L_{mq} = \frac{3}{2} (L_o - L_{ms}) \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

L_{mq} : Inductance de magnétisation de stator axe q

L_{md} : Inductance de magnétisation de stator d'axe d

On substituant ces équations (III.14), (III.15), (III.16), (III.17) on aboutés aux équations des tensions statoriques et rotoriques dans le plan dqo lié au rotor sont :

$$\begin{cases} V_q = r_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \lambda_d \frac{d\theta_r}{dt} \\ V_d = r_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \lambda_q \frac{d\theta_r}{dt} \\ V_o = r_s i_o + \frac{d\lambda_o}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

$$\begin{cases} V'_f = r'_f i'_f + \frac{d\lambda'_f}{dt} \\ V'_{kd} = r'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\lambda'_{kd}}{dt} \\ V'_g = r'_g i'_g + \frac{d\lambda'_g}{dt} \\ V'_{kq} = r'_{kq} i'_{kq} + \frac{d\lambda'_{kq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Les expressions de la liaison des flux sont :

$$\begin{cases} \lambda_q = L_q i_q + L_{mq} i'_g + L_{mq} i'_{kq} \\ \lambda_d = L_d i_d + L_{mq} i'_f + L_{md} i'_{kd} \\ \lambda_o = L_{ls} i_o \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

$$\begin{cases} \lambda'_f = L_{md} i_d + L_{md} i'_{kd} + L'_{ff} i'_f \\ \lambda'_{kd} = L_{md} i_d + L_{md} i'_f + L'_{kdkd} i'_{kd} \\ \lambda'_g = L_{mq} i_q + L'_{gg} i'_g + L_{mq} i'_{kq} \\ \lambda'_{kq} = L_{mq} i_q + L_{mq} i'_g + L'_{kqkq} i'_{kq} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

III-6-2) Etablissement de l'équation de couple

L'expression de couple électromagnétique est obtenue à partir de la puissance instantanée de la machine.

$$P_{in} = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c + V_f i_f + V_g i_g \quad (\text{III.23})$$

On fait la transformation des quantités des phases statoriques vers un référentiel dqo liée au rotor, ou la vitesse de rotation est : $d(\Theta_r)/dt = \omega_r$

On aura :

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{3}{2} (V_q i_q + V_d i_d) + 3V_o i_o + V_f i_f + V_g i_g \\ P_{in} &= \frac{3}{2} \left(r_s (i_q^2 + i_d^2) + i_q \frac{d\lambda_q}{dt} + i_d \frac{d\lambda_d}{dt} + \omega_r (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \right) \\ &\quad + 3i_o^2 r_o + 3i_o \frac{d\lambda_o}{dt} + i_f^2 r_f + i_f \frac{d\lambda_f}{dt} + i_g^2 r_g + i_g \frac{d\lambda_g}{dt} \end{aligned} \quad (\text{III.24})$$

Comme on le voit, la puissance électrique sortant de l'induit est composée de trois termes :

$$P_{in} = P_J + P_{em} + P_{me} \quad (\text{III.25})$$

P_{em} : correspond à la variation de l'énergie magnétique emmagasinée par unité de temps.

P_{me} : puissance mécanique qui résulte de la transformation de la puissance électrique.

P_J : pertes Joule

On néglige les pertes Joule (les chutes ohmiques) dans l'expression de la puissance instantané de la machine on aura la puissance électromagnétique comme suit :

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega_r (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (\text{III.26})$$

Pour une machine à P -pôles, $\omega_r = \frac{p}{2} \omega_{rm}$ on aura :

$$P_{em} = \frac{3P}{2} \omega_{rm} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (\text{III.27})$$

On divisant la puissance électromagnétique sur la vitesse de rotation ω on aura l'expression de couple électromagnétique de la machine.

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_m} = \frac{3p}{2} (\lambda_q i_q - \lambda_d i_d) \quad (\text{III.28})$$

III-7) Equation mécanique

L'équation mécanique de la MS est défini par [12]:

$$T_{em} + T_{mech} - T_{damp} = J \frac{d\omega_{rm}(t)}{dt} = \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r(t)}{dt} \quad (\text{III.29})$$

P : Nombre de pôles.

T_{em} : Représente le couple électromagnétique.

T_{mech} : Représente le couple résistant.

J : Moment d'inertie des parties tournantes

III.8) Schéma équivalents de la MS

Les figures(III.2), (III.3), (III.4) représentent les schémas équivalents de la MS en régime transitoire dans les axes (d,q,o) , tel qu'explicité par les relations des tensions (II.19), (II.20) des flux (II.21), (II.22). [12]

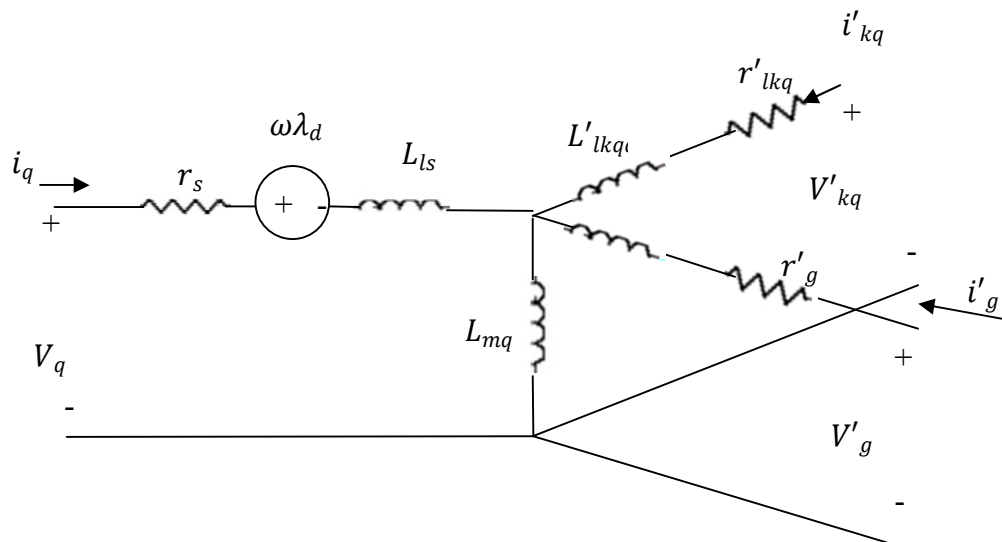


Fig. (III.2) : schéma équivalent de la MS sur l'axe q

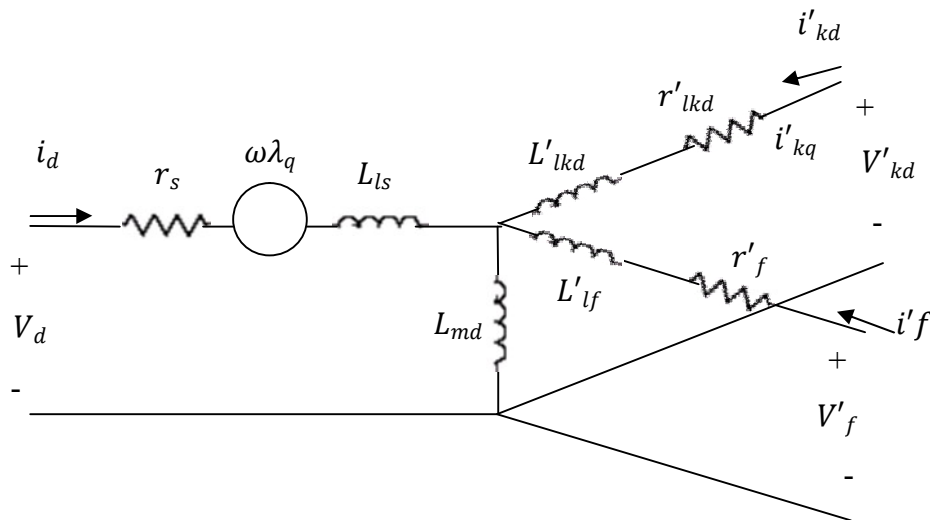


Fig. (III.3) : schéma équivalent de la MS Sur l'axe d

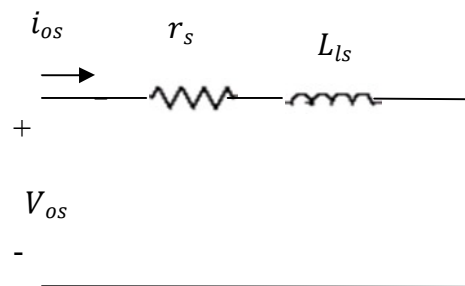


Fig. (III.4) : schéma équivalent de la MS Sur l'axe homopolaire

III-9) Diagrammes vectoriels en régime permanent

Lorsque les grandeurs de la machine ne variant pas en fonction de temps, on dit que la machine fonctionne à son régime permanent. La connaissance de ces grandeurs à ce régime permet d'ajuster certains paramètres de simulation et d'élaborer des relations simplifiées reliant les différentes grandeurs entre elles. [12]

On considère que la machine est alimentée par des courants triphasés sinusoïdaux, et son rotor est entraîné par la vitesse angulaire ω .

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos(\omega_e t + \phi) \\ i_a = I_m \cos(\omega_e t + \phi - \frac{2\pi}{3}) \\ i_a = I_m \cos(\omega_e t + \phi - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

$$E_f = x_{md} \frac{V'_f}{r'_f} \quad (\text{III.31})$$

Avec: E_f : champs d'excitation de stator de la MS.

$$x_{md} = \frac{L_{md}}{\omega}$$

ϕ : Déphasage entre la tension et le courant.

Aux conditions initiales la machine tourne à sa vitesse de synchronisme ω_e .

$$d(\theta_r) / dt = \omega_r(t) = \omega_e$$

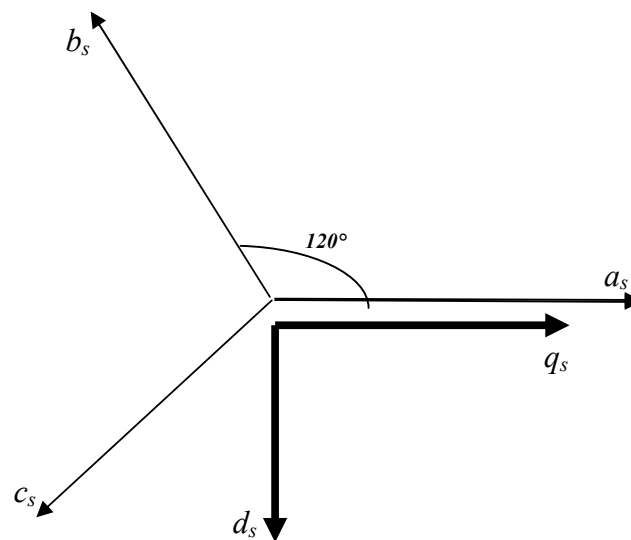


Fig (III.5) : Les axes statoriques.

Le repère stationnaire synchrone est noté q_s et le repère de rotation du rotor et noté q_r .

Soit un plan complexe, ou l'axe q est pris comme l'axe des réels et d comme celui des imaginaires. A partir des équations (III.30), (III.31) on peut écrire les vecteurs phaseurs de la tension et de courant dans le repère stationnaire (q_s, d_s) tel que :

$$\begin{cases} V_q^e - jV_d^e = V_m + j0 = V_m e^{j0} \\ i_q^e = I_m \cos \varphi + jI_m \sin \varphi = I_m e^{j\varphi} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

Les équations (III.19), (III.20) pour le régime permanent s'écrivent comme suit :

Sachant que les tensions rotoriques sont nulles, le rotor tourne à la vitesse de synchronisme $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_e$, les courants statoriques atteignent des valeurs constantes ce qui annule la variation des flux en fonction de temps :

$$\begin{cases} V_q = r_s i_q + \omega_e L_d i_d + E_f \\ V_d = r_s i_d - \omega_e L_q i_q \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

La combinaison des relations (III.33) en notation complexe donne :

$$\begin{aligned} V_q - jV_d &= r_s i_q + \omega_e L_d i_d + E_f - jr_s i_d + j\omega_e L_q i_q \\ &= r_s (i_q - ji_d) + E_f + \omega_e L_d i_d + j\omega_e L_q i_q + \omega_e L_q i_d - j^2 \omega_e L_q i_d \end{aligned}$$

On trouve :

$$V_q - jV_d = (r_s + j\omega_e L_q)(i_q - ji_d) + \omega_e (L_d - L_q)i_d + E_f \quad (\text{III.34})$$

L'expression (III.34) est exprimée dans le repère stationnaire (q_s, d_s). sachant qu'en régime permanent le rotor peut être dans une position décalée par rapport au repère stationnaire, alors le repère solide du rotor (q_r, d_r) sera dans une position telle que donnée par le diagramme de la figure (III.6):

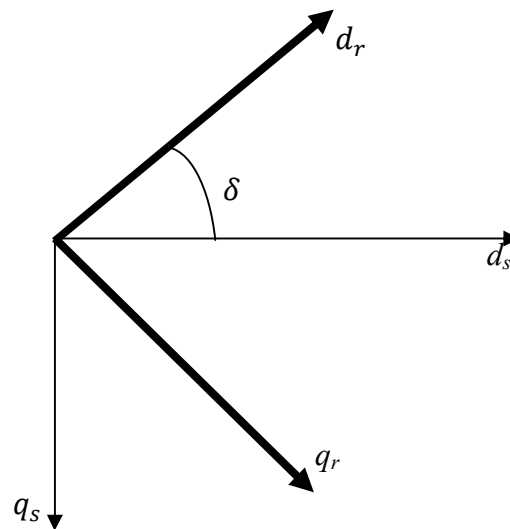


Fig. (III.6): Axes rotoriques

Les équations (III.32) s'écrivent dans le repère solide de rotor comme suite :

$$\begin{cases} v_q^s - jv_d^s = (v_q - jv_d)e^{-j\delta} = V_m e^{-j\delta} = \sqrt{2}V_a e^{-j\delta} \\ i_q^s - ji_d^s = (i_q - ji_d)e^{-j\delta} = I_m e^{-j(\varphi-\delta)} = \sqrt{2}I_a e^{-j(\varphi-\delta)} \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

$$\delta(t) = \theta_r(t) - \theta_e(t)$$

Comme :

$$\bar{V}_a e^{-j\delta} = \left(\frac{v_q}{\sqrt{2}} - j \frac{v_d}{\sqrt{2}} \right) = \bar{V}_q - j\bar{V}_d \quad (\text{III.36})$$

$$\bar{I}_a e^{-j\delta} = \left(\frac{i_q}{\sqrt{2}} - j \frac{i_d}{\sqrt{2}} \right) = \bar{I}_q - j\bar{I}_d \quad (\text{III.37})$$

Avec :

$$\bar{V}_a = \frac{V_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta} , \quad \bar{I}_a = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi}$$

En fin on obtient la forme vectoriel des tension dans le repère (d_r, q_r) solide de rotor, comme suite :

$$\begin{cases} \vec{V}_q = r_s \vec{I}_q + \omega_e L_d \vec{I}_d + \vec{E}_f \\ \vec{V}_d = r_s \vec{I}_d - \omega_e L_q \vec{I}_q \end{cases} \quad (III.38)$$

En convention génératrice :

$$\vec{V}_a = -r_s \vec{I}_a - \omega_e L_d \vec{I}_d + j\omega_e L_q \vec{I}_q + \vec{E}_f \quad (III.39)$$

Avec :

$$\vec{V}_a = \vec{V}_q - j\vec{V}_d \quad \text{et} \quad \vec{I}_a = \vec{I}_q - j\vec{I}_d$$

En basant sur l'équation (III.36) on donne le diagramme vectoriel suivant

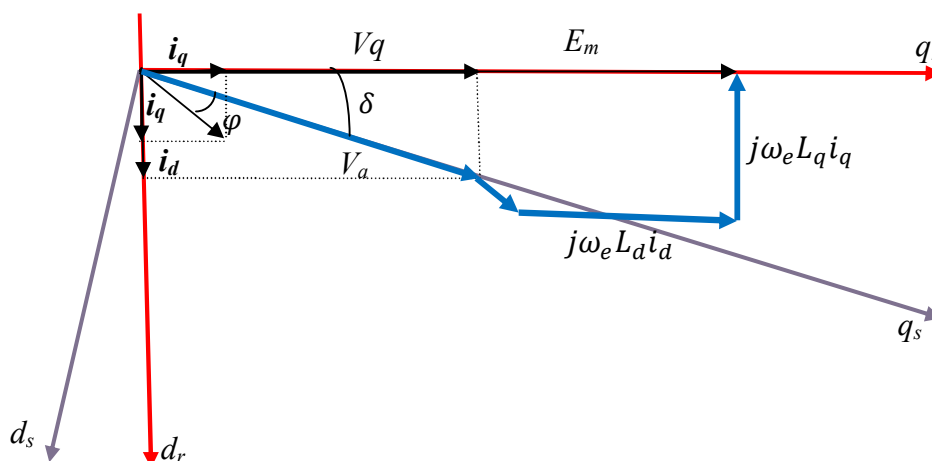


Fig. (III.7) Diagramme vectoriel du générateur

III.10) Modèle de la simulation de la machine synchrone

La simulation de notre machine se fera sur la base des équations définies précédemment ou celles ci seront exprimées en unités réduites. Pour cela on fait les changements suivant : [12]

(Avec : $\psi = \omega_b \lambda$ et $x = \omega_b L$).

$$\begin{cases} \psi_q = \omega_b \int \left\{ V_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_q) \right\} dt \\ \psi_d = \omega_b \int \left\{ V_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_d) \right\} dt \\ \psi_o = \omega_b \int \left\{ V_o - \frac{r_s}{x_{ls}} \psi_o \right\} dt \end{cases} \quad (III.40)$$

$$\begin{aligned} \psi'_{kq} &= \frac{r'_{kq} \omega_b}{x'_{lkq}} \int (\psi_{mq} - \psi'_{kq}) dt \\ \psi'_{kd} &= \frac{r'_{kd} \omega_b}{x'_{lkd}} \int (\psi_{md} - \psi'_{kd}) dt \\ \psi'_f &= \frac{r'_f \omega_b}{x_{md}} \int \left(E_f + \frac{x_{md}}{x'_{lf}} (\psi_{md} - \psi'_f) \right) dt \end{aligned} \quad (III.41)$$

Avec:

$$\begin{aligned} \psi_{mq} &= \omega_b L_{mq} (i_q - i_{kq}) \\ \psi_{md} &= \omega_b L_{md} (i_q + i_{kd} + i'_f) \\ E_f &= x_{md} \frac{V'_f}{r'_f} \end{aligned} \quad (III.42)$$

A partir des expressions des flux mutuels on peut déterminer les courants :

$$\begin{aligned} i_q &= \frac{\psi_q - \psi_{mq}}{x_{ls}} \\ i_d &= \frac{\psi_d - \psi_{md}}{x_{ls}} \\ i'_{kd} &= \frac{\psi'_{kd} - \psi_{md}}{x'_{lkd}} \\ i'_{kq} &= \frac{\psi'_{kq} - \psi_{mq}}{x'_{lkq}} \\ i'_f &= \frac{\psi'_f - \psi_{md}}{x'_{lf}} \end{aligned} \quad (III.43)$$

D'après les équations (III.42), (III.43) Les flux mutuels s'écrivent comme suite :

$$\psi_{mq} = x_{MQ} \left(\frac{\psi_q}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{kq}}{x'_{lkq}} \right) \quad (\text{III.44})$$

$$\psi_{md} = x_{MD} \left(\frac{\psi_d}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{kd}}{x'_{lkd}} + \frac{\psi'_f}{x'_{lf}} \right)$$

Couple électromagnétique :

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{\omega_b} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (\text{III.45})$$

Le couple électromagnétique en valeurs réduites s'écrit :

$$T_{em}(pu) = \frac{T_{em}}{T_{emb}} = \frac{\frac{3}{2} \frac{p}{\omega_b} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)}{\frac{3}{2} \left(\frac{V_b I_b}{\left(\frac{2\omega_b}{P} \right)} \right)}$$

On exprime ψ_d et ψ_q en unités réduites, sachant que lorsqu'on exprime le terme $(\psi_d i_q - \psi_q i_d)$ par des variables en unités réduites, un produit $V_b I_b$ apparaît le couple électromagnétique s'exprime donc :

$$T_{em}(pu) = (\psi_{d(pu)} i_{q(pu)} - \psi_{q(pu)} i_{d(pu)})$$

En divisant l'équation mécanique par le couple de base, on obtient une équation mécanique dans laquelle la vitesse sera exprimée en unités réduites.

$$T_{em}(pu) + T_{mech}(pu) - T_{damp}(pu) = 2H \frac{d \left\{ \frac{\omega_r - \omega_e}{\omega_b} \right\}}{dt} \quad (\text{III.46})$$

Avec :
$$H = \frac{1}{2} J \frac{\omega_{bm}^2}{s_b} \quad \text{et} \quad \omega_{bm} = \frac{\omega_b}{P/2}$$

III-11) Implémentation du modèle de la MS en vue de sa simulation

Finalemnt en défini les déférentes blocks de la MS :

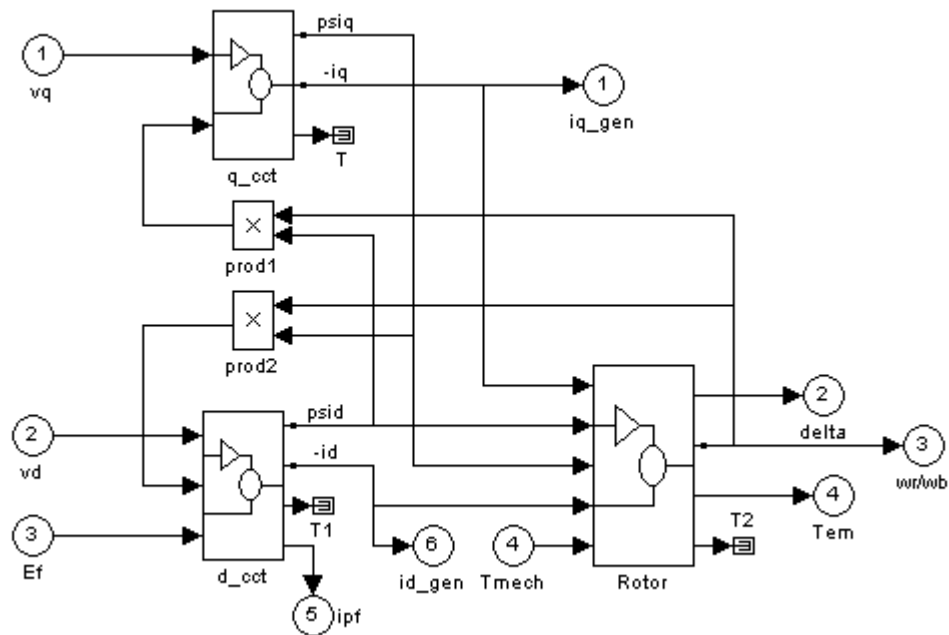


Fig (III.8): « Schéma bloc du flux »

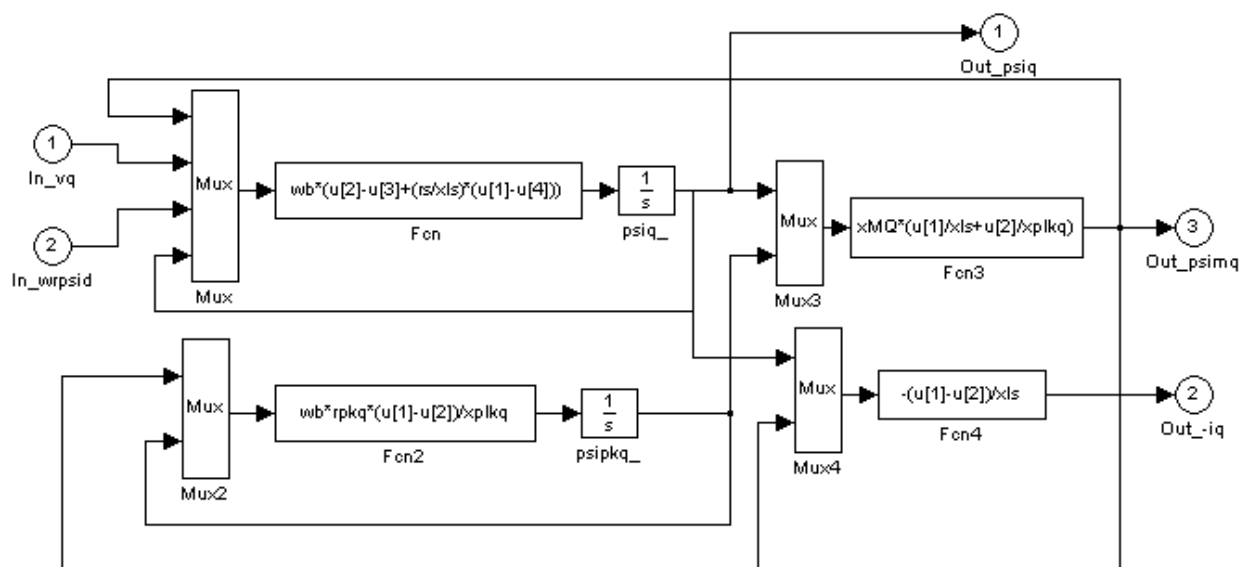


Fig (III.9): « Schéma bloc du flux dans l'axe q »

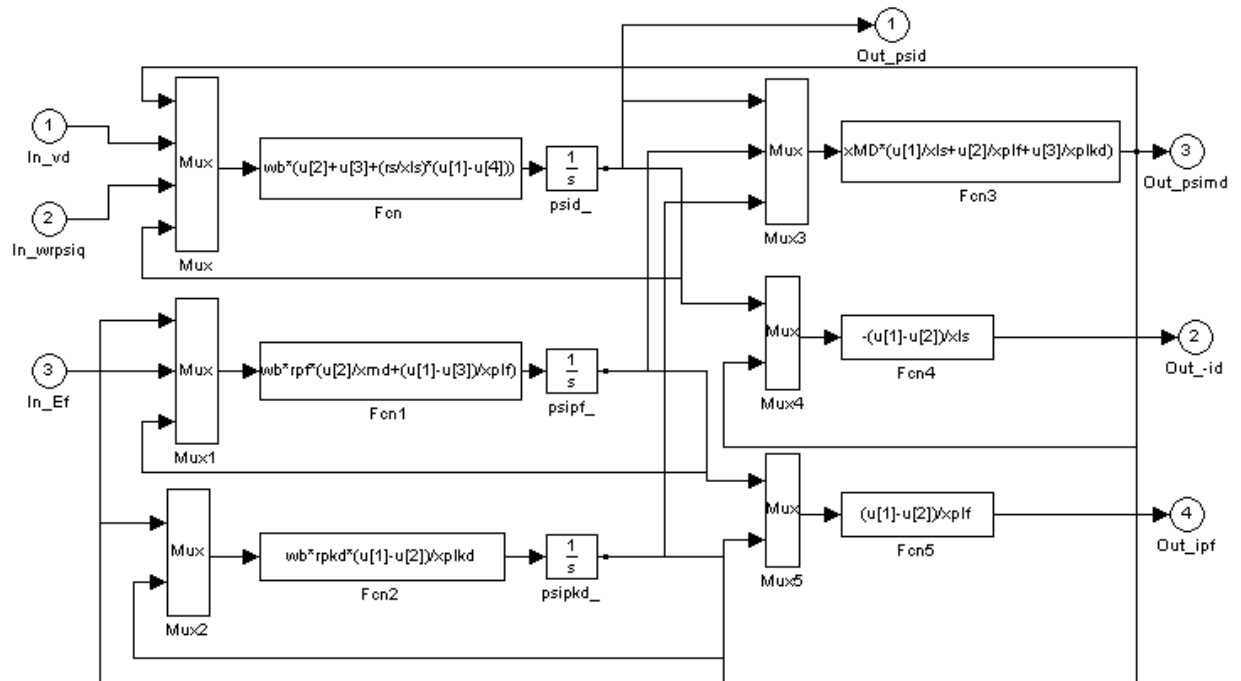


Fig (III.10): « Schéma bloc du flux dans l'axe d »

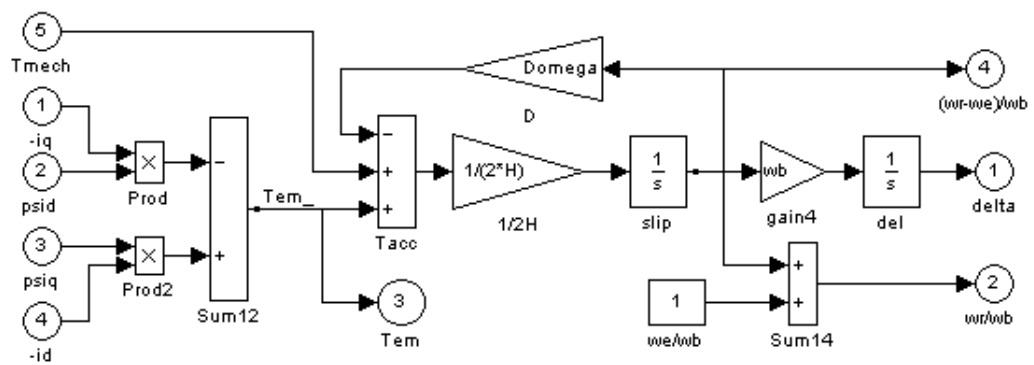


Fig (III.11): « Schéma bloc de rotor »

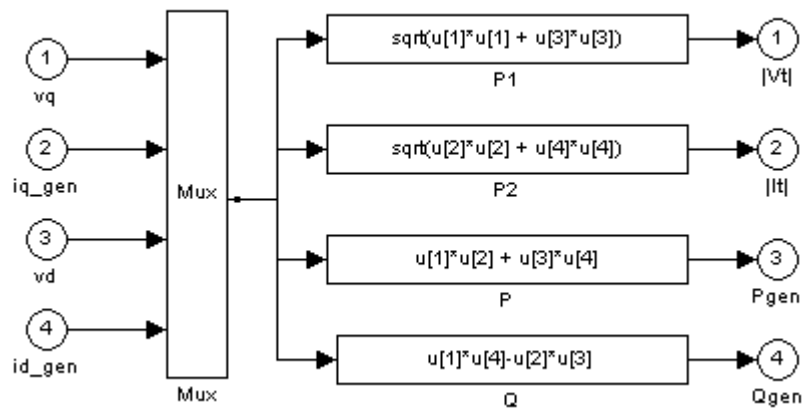


Fig (III.12): « Schéma bloc des puissances »

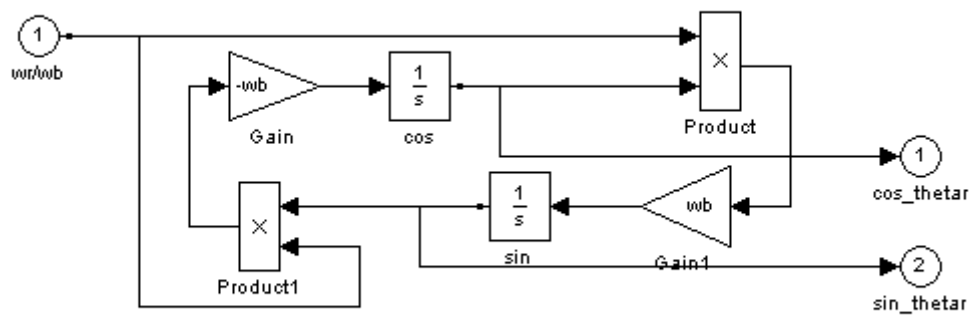


Fig (III.13): « Schéma bloc de l'angle θ_r »

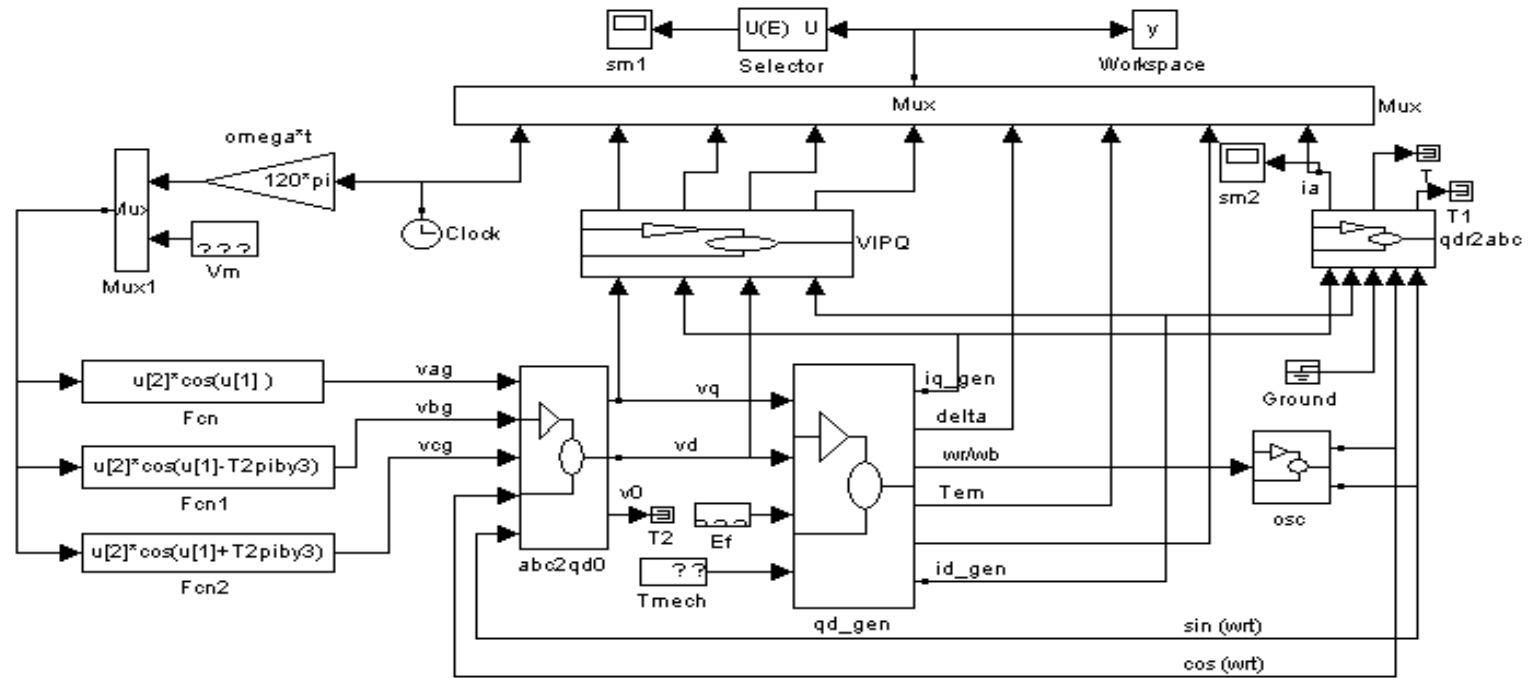


Fig. (III.14) : Schéma globale de la machine synchrone

III-12) simulation de la machine

La simulation de la MS nous permet de contrôler les grandeurs (tension, courant) qui sont délivrées au réseau. Pour ce la on a utilisés les paramètres suivants en unité réduit.

1) Les paramètres de la machine :

Les paramètres de la MS utilisé dans la modélisation sont définis comme suit :

Désignations	symboles	Valeurs
Tension composée (V)	V	200
Puissance absorbée (w)	Pa	750
Facteur de puissance	Pf	0.8
Nombre de paire de pole	P	4
Fréquence (Hz)	f	50

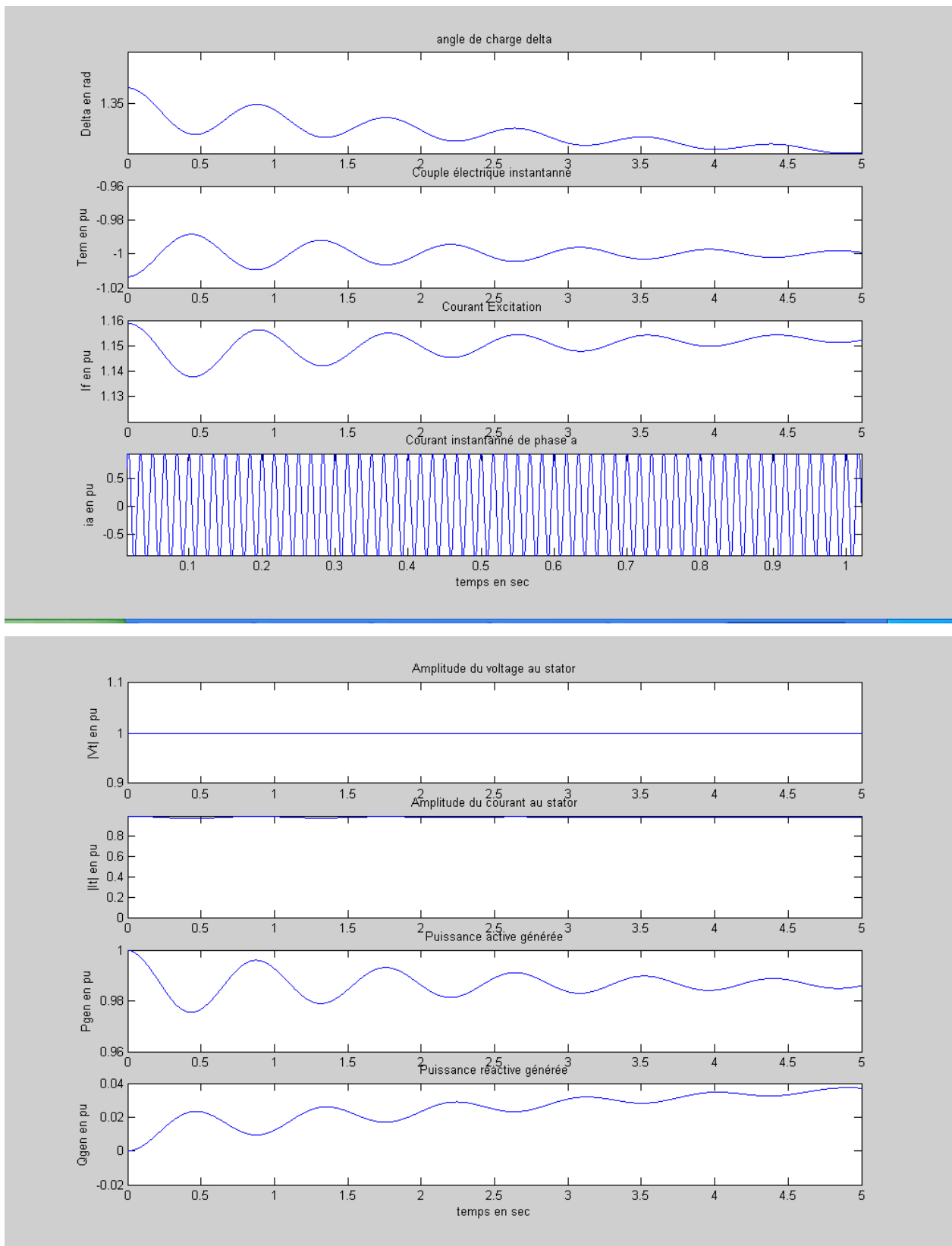


Fig. (III-15) Les résultats de la simulation de la MS à vide.

2) *Les interprétations des résultats*

Les courbes de la Fig. (III-15) représentent les résultats de simulation de la MS pour un démarrage à vide.

Au démarrage à vide, On remarque L'absence de régime transitoire. Donc la machine synchrone lord d'un démarrage à vide attend directement son régime permanent.

On constate que les déférentes courbes attendent un régime permanent après une légère perturbation (régime transitoire de la machine).d'ou la négligence de cette partie lord de démarrage à vide de la machine

Conclusion

Dans ce chapitre nous avant fait une modélisation complète de la machine synchrone, on donnant les différentes équations électriques, magnétiques et mécanique de cette machine. Pour simplifier la résolution de c'est équations on a opté la transformation de Park comme outil de simplification de calculs.

CHAPITRE IV

*PRESENTATION ET SIMULATION DE
RESEAU EMBARQUE*

Introduction

L'objectif du concept du Navire Tout Electrique (NTE) consiste à globaliser tous les besoins en énergie et, avec les mêmes générateurs, à fournir l'électricité à la propulsion, au réseau de bord.

Il concerne toute la chaîne de puissance et, d'une manière générale, il comporte:

- *Plusieurs sources d'énergie électrique dont le nombre et le type sont définis en fonction des besoins du navire (diesel-alternateurs, turbine à gaz – alternateurs), ces sources fonctionnent en parallèle. Le nombre de sources couplées est déterminé par la puissance électrique consommée par le navire.*
- *Un réseau de distribution HT. Ce réseau est constitué des tableaux et des câbles HT. Les tableaux sont équipés des dispositifs de coupure, de protection et de couplage.*
- *Des consommateurs HT, qui ont généralement besoin de puissances importantes (1 MW). Il s'agit essentiellement des systèmes de propulsion principale.*
- *Des convertisseurs HT/BT (transformateurs, convertisseurs électroniques de puissance et groupes tournants), qui équipent aussi le navire associés à des filtres harmoniques passifs ou actifs installés en HT ou en BT.*
- *Un réseau de distribution BT alimenté par les convertisseurs HT/BT. Ce réseau est constitué des tableaux et des câbles BT. Les tableaux sont équipés des dispositifs de coupure, de protection et de couplage.*
- *Des sous-réseaux particuliers alimentés à partir du réseau BT à travers des transformateurs ou des alimentations in interruptibles, qui assurent l'alimentation des différentes charges (éclairage climatisationetc.).*
- *Un système de conduite des installations (informations et actions) qui supervise le fonctionnement de l'ensemble du réseau électrique.*

Dans ce chapitre on a cités les composantes principales du réseau embarqué, puis on représente le schéma globale de réseau embarqué, et cela ce fait en assemblent les déférents machines étudiés ainsi que les déférentes composantes de ce réseau (charge), on respectant les conditions de couplage qui nous assure la sécurité de réseau des risques de court circuit ...etc.

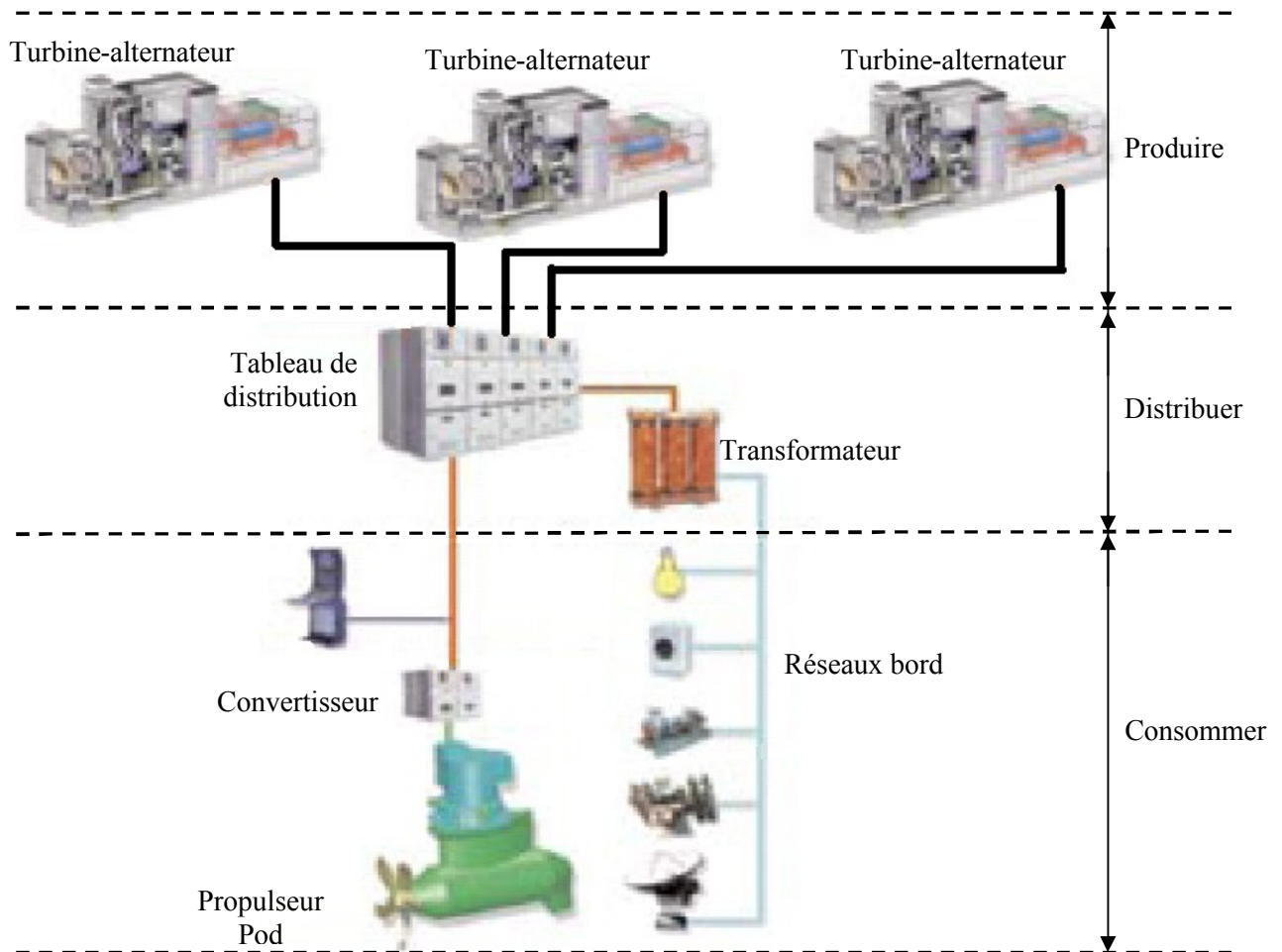


Fig. (IV-1) : Présentation d'un réseau embarqué [17]

IV.1) Présentation générale de la simulation à réaliser

Le système à étudier est un réseau d'un navire tout électrique ; il comprend l'ensemble des éléments qui contribuent au fonctionnement de tous les composants électriques du navire. C'est à dire :

- *la centrale de génération d'énergie électrique (Turbine à gaz / Diesel + Alternateur),*
- *le transport et la distribution d'énergie (Câbles de puissance + Bus de puissance),*
- *la consommation d'énergie (Charge). [18]*

IV.2) Description des modules

IV.2.1) La turbine à gaz ou le diesel

C'est l'organe mécanique qui entraîne l'alternateur. Il comporte notamment un régulateur de vitesse nécessaire pour maintenir la fréquence du réseau. Le principe de cet ensemble peut être décrit comme un système qui gère l'ouverture de la vanne de transmission du carburant de la turbine/diesel en fonction de la puissance active à fournir et de la vitesse mesurée.

IV.2.2) L'alternateur

L'alternateur reçoit une puissance mécanique et la convertit en puissance électrique. C'est cet élément qui définit le plan de tension de tout le réseau électrique en alimentant le bus principal de puissance qui répartit l'énergie dans tout le réseau de distribution et dans les charges. C'est au niveau de l'alternateur que l'on retrouve le régulateur de tension qui contrôle l'excitation en fonction de la tension du réseau et de la puissance réactive nécessaire. Dans le domaine de la génération de l'énergie électrique, on parle rarement de l'alternateur seul ou de la turbine seule ; cet ensemble communément appelé « turbo-alternateur » est un bloc qu'il ne faut pas dissocier. En effet, la régulation des grandeurs électriques principales du réseau est réalisée en agissant sur l'ensemble turbo-alternateur, car il faut prendre en compte autant l'aspect mécanique que l'aspect électrique du groupe.

IV.2.3) Le bus de puissance

Considéré comme le nœud principal du réseau, ce composant reçoit la puissance électrique générée par les turbo-alternateurs et alimente les charges connectées au réseau. C'est notamment au niveau de ce nœud que l'on fera le bilan des puissances actives et réactive. Etant donné que la simulation est basée, en partie, sur l'étude des transitoires de puissances entre la charge et les générateurs, on ne tiendra pas compte des selfs et des capacités des transformateurs, des lignes et des câbles. C'est pourquoi, le bus sera représenté par un nœud non inductif et non résistif.

IV.2.4) Les charges

a. La propulsion électrique

Ce module peut être de plusieurs natures : machine synchrone, machine asynchrone, machine synchrone double étoile, machine asynchrone double étoile, machine asynchrone polyphasée, voire moteur à courant continu dans de rares applications... Nous avons décidé de simuler la propulsion sous un aspect « consommateur » de puissance active/réactive. Cela se justifie de par le souci de généralisation à tous les réseaux des navires tout électrique. Et aussi parce que c'est essentiellement l'impact de charge, d'un point de vue puissance, des turbo-alternateurs qui nous intéresse. De plus, on connaît à l'avance la consommation de la propulsion suivant les allures définies (vitesse de croisière, à vide, en manœuvre ...).

b. La charge hôtelière

Elle représente tous les éléments du réseau (sauf l'air conditionné) qui contribuent au confort des usagers : éclairages des spectacles, casinos, restaurants, cuisines, usages personnels dans les cabines. Nous considérons aussi cet ensemble comme un « consommateur » de puissance active/réactive. Les consommations sont obtenues par prédiction et estimation.

c. Le conditionnement d'air

L'air conditionné utilise un certain nombre de pompes et ventilateurs sous forme asynchrone. De ce fait, on modélise l'installation électrique du conditionnement par une machine asynchrone équivalente. Le modèle sera construit afin de prendre en compte la consommation de puissance active et de puissance apparente du système de climatisation.

IV.3) Modélisation des modules cités

IV.3.1) La turbine à gaz

a. Rappel du principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

Dans les turbines à gaz, la puissance mécanique (résultant de la transformation de l'énergie thermique) est délivrée de façon continue par l'action d'un fluide à énergie élevée, sur les ailettes ou aubes d'une ou plusieurs roues. La turbine à gaz est un moteur rotatif qui transforme l'énergie calorifique en énergie mécanique par un procédé continu qui comprime, chauffe et évacue un gaz.

Les turbines à gaz employées sur les navires, sont des moteurs à 2 arbres à simple cycle, constitués d'un générateur de gaz (moteur à réaction provenant de l'aviation) et d'une turbine de puissance entraînant par un accouplement flexible un arbre qui traverse la conduite d'échappement.

- *Le générateur de gaz est composé d'un compresseur à géométrie variable, d'un brûleur annulaire, d'une turbine haute pression, d'un réducteur et de contrôles et accessoires.*
- *La turbine de puissance est une turbine basse pression à plusieurs étages qui est couplée de façon aérodynamique au générateur de gaz et qui est entraînée par les gaz du générateur.*

Le cycle de la turbine à gaz débute avec l'air entrant dans la conduite d'entrée du générateur de gaz. Cet air est dirigé directement dans le compresseur par des vanes de guidage à pales orientables. L'air comprimé est dirigé vers la zone du brûleur annulaire où il est mélangé avec le combustible. Les gaz chaud de combustion s'écoulent dans la turbine haute pression qui entraîne le rotor du compresseur. La vitesse de service du générateur de gaz est d'environ 4900 à 9800 tr/min. Ces gaz d'échappement s'écoulent ensuite vers la turbine de puissance qui entraîne l'arbre de sortie. [19]

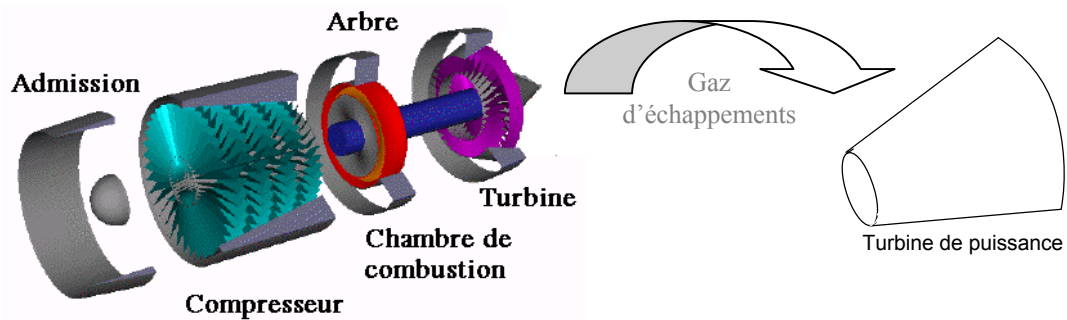


Fig. (IV.3) : Constitution globale d'une turbine à gaz [19]

b. Modélisation

La turbine à gaz sera modélisée avec un aspect mécanique pour la régulation de vitesse, et non suivant un aspect simulation de l'évolution des grandeurs thermodynamiques.

Tout d'abord, on représente la turbine suivant une décomposition fonctionnelle. Nous la développons en plusieurs modules simples, voir Fig. (IV.4) suivante:

Ainsi, nous définissons 6 modules différents (voir l'annexe) :

- *Le régulateur de vitesse (bloc 1).*
- *Le contrôle de l'accélération (bloc 2).*
- *Le système de régulation de l'alimentation en combustible (bloc 3).*
- *L'équation générale de la mécanique des machines tournantes (bloc 4).*
- *Le premier étage de contrôle de la température des gaz d'échappement (bloc 5).*
- *Le second étage de contrôle de la température nominale d'échappement et de l'ouverture de la vanne d'entrée du carburant (bloc 6).*

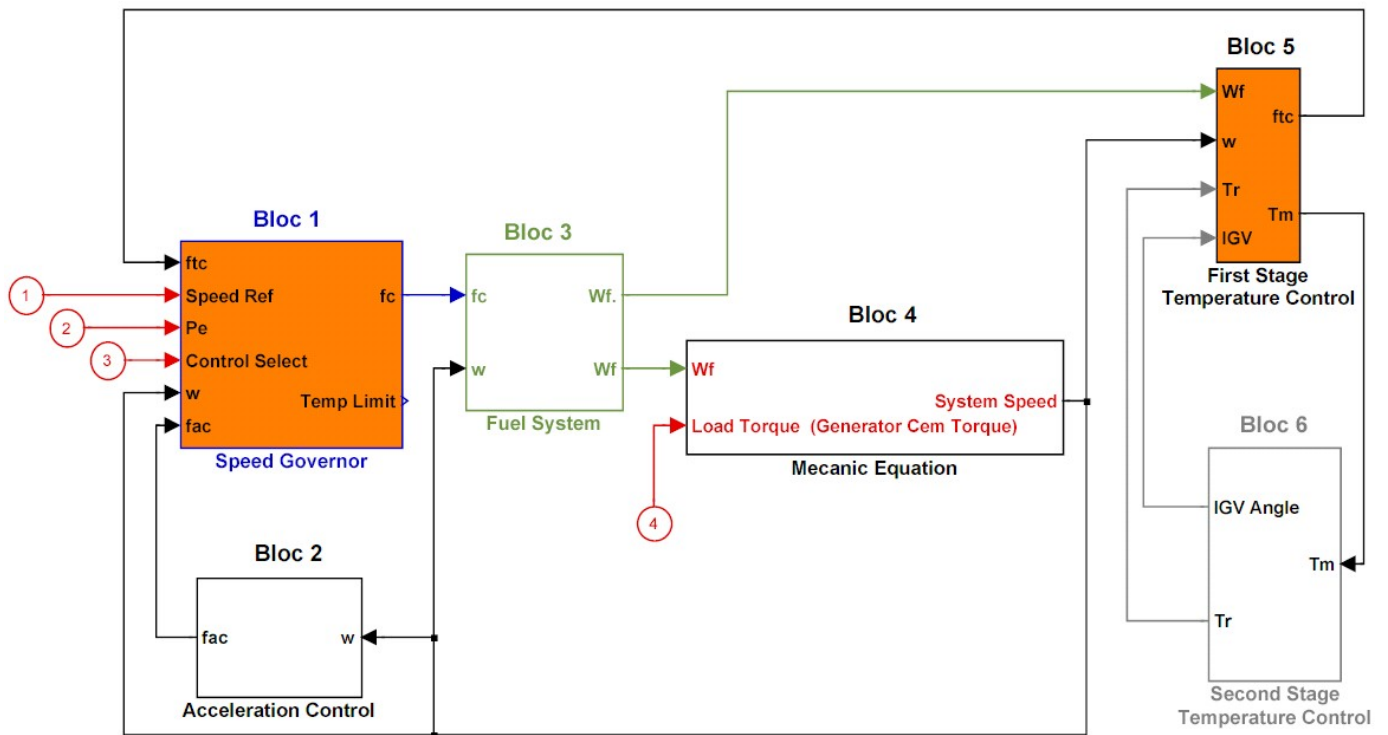


Fig. (IV.4) : Approche fonctionnelle d'une turbine à gaz [19]

Ce modèle mathématique est suffisant pour simuler le fonctionnement d'une turbine et de sa régulation de vitesse en respectant les contraintes thermodynamiques imposées par le constructeur. En effet, c'est surtout l'aptitude du système d'entraînement à maintenir une vitesse quasi constante, c'est à dire une fréquence à $\pm 5\%$, qui est en jeu. C'est pourquoi, ce système qui permet de réguler la vitesse, respectant les limites du matériel, et respectant son fonctionnement physique (constantes de temps, équation thermodynamique donnant la température d'échappement, le transport des différents flux de matière, ...) est bien adapté à notre travail. [19]

IV.3.2) La machine synchrone utilisée en générateur

Les transformations définies dans le **chapitre III** nous permettent d'obtenir un modèle matriciel de la machine synchrone dans le repère (d,q) , facilement exploitable dans le cas d'une simulation de l'évolution des grandeurs telles que la tension statorique, le courant statorique, la f.e.m., le courant d'excitation, le couple électromagnétique, la vitesse du rotor. Afin de mettre en place la simulation du fonctionnement en parallèle des alternateurs, nous limitons

préalablement notre système à l'ensemble « alternateurs + jeu de barres ». Nous inhibons les turbines et considérons des vitesses constantes en entrées de nos alternateurs.

Le synoptique de l'installation, en considérant 3 alternateurs, est présenté sur la Fig. (IV.5) :

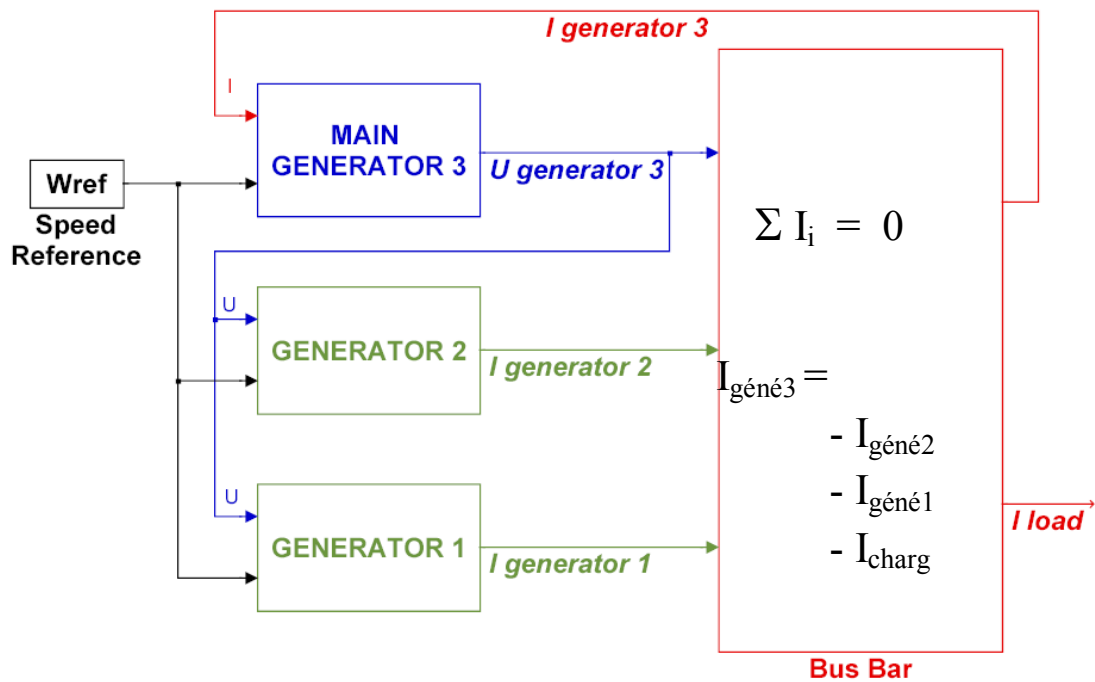


Fig. (IV.5) : Principe de base de la simulation d'alternateurs en parallèle

On distingue sur ce schéma, deux types de modèles pour les alternateurs :

- Un modèle A avec en entrées la vitesse et la tension statorique, en sortie le courant statorique.
- Un modèle B avec en entrées la vitesse et le courant statorique, (Cas de l'alternateur « principal 3 ») en sortie la tension statorique.

IV.3.3) Le bus de puissance

Il n'y a pas de modélisation particulière, nous considérons que le bus se comporte comme un nœud, auquel les règles simples des circuits électriques (Kirchhoff, Thévenin, Millmann, ...) peuvent s'appliquer.

Ainsi, on écrit au niveau du nœud :

$$\sum I_i = 0 ; \quad \sum P_i = 0 ; \quad \sum Q_i = 0 \quad (IV.1)$$

C'est de cette façon que l'on fera les bilans de puissance active et réactive sur le bus, et que l'on calculera le courant statorique de l'alternateur principal.

IV.3.4) La modélisation « P, Q » de la propulsion et de l'hôtellerie

Comme nous l'avons vu en (IV.3.3), on peut modéliser un système électrique par sa consommation en puissance active et en puissance réactive. Etant donné que c'est surtout l'évolution de la puissance électrique qui nous intéresse, on se limite à cette modélisation. De plus, cela nous permet d'élargir l'étude à plusieurs technologies de propulsion électrique. Les caractéristiques de la puissance en fonction de la vitesse sont parfaitement connues. De même, des statistiques permettent d'estimer assez bien la consommation de la charge hôtelière. Ce qui importe, c'est la détermination du courant absorbé par la charge, afin de calculer le courant de l'alternateur principal.

On utilise la propriété suivante :

$$3.I_{eff}^2 = I_d^2 + I_q^2 \quad (IV.2)$$

On introduit la démarche suivante : on fait apparaître le déphasage φ , ce qui nous rapproche de la puissance active/réactive.

$$\begin{aligned} 3.I_{eff}^2 \cdot (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) &= I_d^2 + I_q^2 \\ 3.I_{eff}^2 \cdot \cos^2 \varphi + 3.I_{eff}^2 \cdot \sin^2 \varphi &= I_d^2 + I_q^2 \end{aligned} \quad (IV.3)$$

Or on rappelle les expressions de la puissance active et de la puissance réactive, dans le cas d'un système triphasé équilibré :

$$P = 3.V_{eff} I_{eff} \cdot \cos \varphi ; \quad Q = 3.V_{eff} I_{eff} \cdot \sin \varphi \quad (IV.4)$$

Avec V_{eff} la tension simple efficace et I_{eff} le courant de ligne efficace.

$$D'où : \left(\frac{P}{\sqrt{3}V_{eff}} \right)^2 + \left(\frac{Q}{\sqrt{3}V_{eff}} \right)^2 = I_d^2 + I_q^2 \Leftrightarrow \left\{ I_d = \frac{P}{\sqrt{3}V_{eff}} \text{ et } I_q = \frac{Q}{\sqrt{3}V_{eff}} \right. \quad (IV.5)$$

On représente le système de la manière suivante :

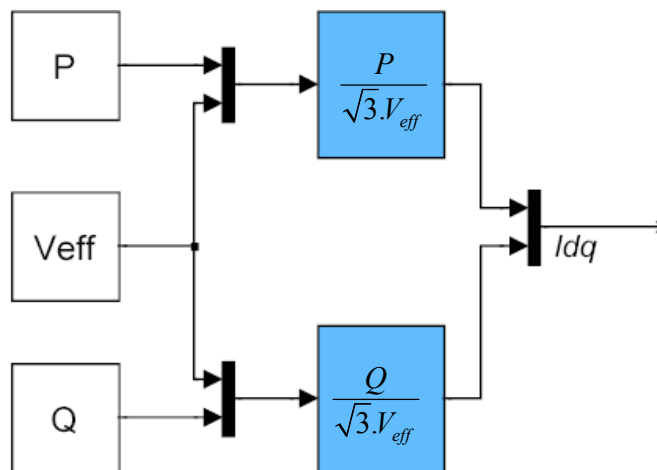


Fig. (IV.6) : Modélisation « PQ »

Le système comprend tous les principaux éléments nécessaires à la régulation de la tension, de l'équilibrage de réactif des alternateurs et de la fréquence. Ces régulateurs ont déjà été calculés. Il y a quelques précautions à prendre pour un couplage d'alternateurs en parallèle : il faut vérifier que la f.e.m. de l'alternateur et la tension entre phases du réseau soient identiques (même amplitude, en phase, même fréquence, même ordre des phases). Dans la simulation, nous avons modélisé un pseudo synchro-coupleur. On suppose que l'ordre des phases est respecté. Avec la régulation en tension des alternateurs, on suppose que les amplitudes sont les mêmes. Et la régulation en vitesse donne des écarts de fréquence raisonnables (+/- 5%). Par contre, on utilise un bloc qui vérifie le déphasage entre la f.e.m. et la tension composée du réseau. Aussi, on définit une certaine fenêtre de couplage (angle) à respecter. Il n'y aura pas ordre de couplage si cette fenêtre est dépassée.

IV.4) Réalisations et résultats

Après l'étude bibliographique et la définition des modèles utilisés pour chaque bloc de la simulation, un ancien travail constituant la base de la modélisation de la turbine à gaz est utilisé pour notre travail.

Bien sûr, une méthode à pas constant est plus rapide. Mais pour ce genre de simulation complexe, contenant beaucoup de sous-systèmes, il est nécessaire d'utiliser une méthode de résolution à pas variable, car les constantes de temps des sous-systèmes n'ont pas toutes le même ordre de grandeur. La méthode de Runge-Kutta 45 est la mieux adaptée.

IV.4.1) Matériel et logiciels utilisés

Les simulations ont été réalisées suivant les conditions matérielles et logicielles ci-dessous :

- Environnement Windows NT version 4.0.*
- Un processeur Intel Pentium IV de 1.3 GHz.*
- 256 Mo de mémoire vive (RAM).*
- Logiciel de simulation : Simulink dans l'environnement Matlab R13.*

IV.4.2) Système simulé

Les simulations, réalisées pour observer le temps d'exécution, sont basées sur le système de départ qu'il fallait optimiser, comprenant :

- 3 alternateurs de vitesse constante,*
- 3 régulateurs de tension des alternateurs,*
- 1 charge hôtelière,*
- la propulsion électrique,*
- et l'air conditionné.*

Les turbines à gaz ne sont pas incluses.

Le temps de simulation est porté à 50 secondes, avec une méthode de résolution « ode45 », de Runge-Kutta 45.

Le pas de calcul maximum : 0,01.

Le pas de calcul minimum : automatique.

Tolérances relative et absolue : 10^{-4} .

IV.5) Simulation du réseau embarqué tout électrique

Les paramètres réels du système sont basés sur le réseau du navire NASSCO Alaska Class Tanker, qui a été livré par Alstom. Les caractéristiques du système sont :

<i>Eléments</i>	<i>Paramètres</i>	
<i>Réseau.</i>	<i>Tension nominale efficace : 6,6 kV.</i>	<i>Fréquence nominale : 60 Hz.</i>
<i>Alternateurs.</i>	<i>Puissance active nominale : 12,2 MW. Puissance apparente nominale : 15,25 MVA.</i>	<i>Tension entre phases nominale : 6,6 kV. Courant nominal : 1334 A. Nombre de paires de pôles : 7.</i>
<i>Machine Asynchrone</i>	<i>Puissance active nominale : 7 MW. Facteur de puissance : 0,917.</i>	<i>Vitesse nominale : 1782 tr/min. Nombre de paires de pôles : 2.</i>
<i>Turbine à gaz</i>	<i>Puissance nominale : 78 MW. Vitesse nominale : 3600 tr/min.</i>	

IV.6) Couplage d'alternateur au réseau et équilibrage des puissances

Nous allons définir les conditions d'un bon couplage, montrer comment utiliser le statisme dans les opérations de couplage d'alternateurs sur le réseau, et présenter les différentes techniques pour assurer la répartition de puissance. Nous verrons qu'une procédure de synchronisme avant couplage est nécessaire afin d'avoir un bon couplage, ce qui facilitera, ensuite, les réglages par statisme. [20]

IV.6.1) Conditions d'un couplage correct d'alternateur au réseau

Pour qu'un alternateur puisse être couplé convenablement il doit respecter le principe suivant : la f.e.m. E de l'alternateur à coupler et la tension U du réseau doivent être identiques.

Il faut vérifier que E et U aient :

- même amplitude,
- même fréquence,
- et un déphasage nul entre elles.

Bien sûr, en triphasé, l'ordre des phases doit être respecté.

En conséquence, un alternateur couplé correctement, ne produit aucune puissance, juste après couplage. Ce résultat est intéressant pour faire une charge progressive sur ce générateur.

IV.6.2) Répartition des puissances entre les turbines des alternateurs

1) Le réglage de la puissance active

Le raisonnement qui suit est vrai pour tout moteur (turbine, Diesel ...) entraînant un alternateur.

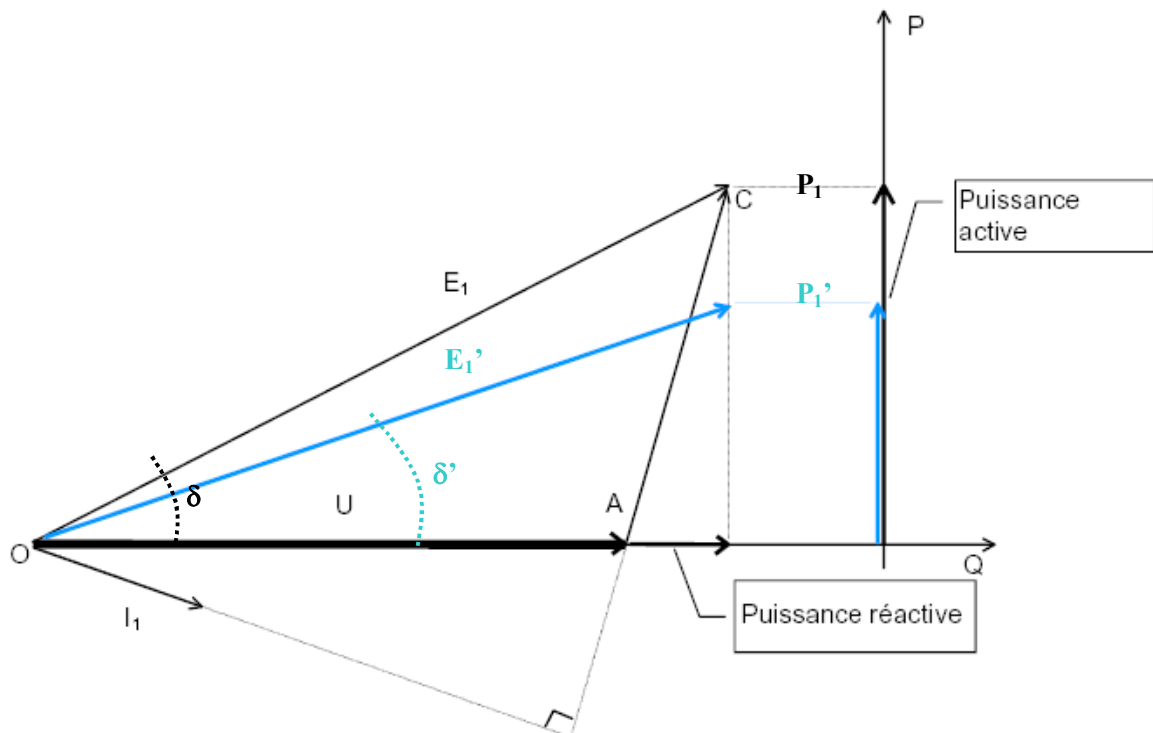


Fig.(IV.7) : Diagramme de Behn Eschenburg, variation d'actif [20]

Sur le diagramme de Behn Eschenburg de l'alternateur synchrone de la Fig (IV.7) (ci dessus), nous remarquons que, pour une même tension U statorique, plus l'angle interne de la machine

augmente, plus la puissance active augmente. Bien sûr nous sommes limités à $\pi/2$. Nous associons l'angle δ à la puissance P_1 , l'angle δ' à la puissance P_1' et nous avons $P_1 > P_1'$.

En conclusion nous pouvons dire que pour charger ou décharger un alternateur qui est couplé au réseau, il faut jouer sur l'angle interne δ de la machine.

Dans le cas d'un alternateur le rotor est décalé de l'angle δ en avance par rapport à la tension statorique. Donc si on augmente le couple moteur, on augmente la vitesse du rotor (transitoire) et on augmente l'angle interne, car le vecteur tension au stator tourne à la fréquence du réseau que l'on considère constante car imposée par les autres alternateurs. Par conséquent, nous avons un moyen de régler la puissance active fournie par l'alternateur : il faut introduire transitoirement un écart de vitesse entre alternateurs.

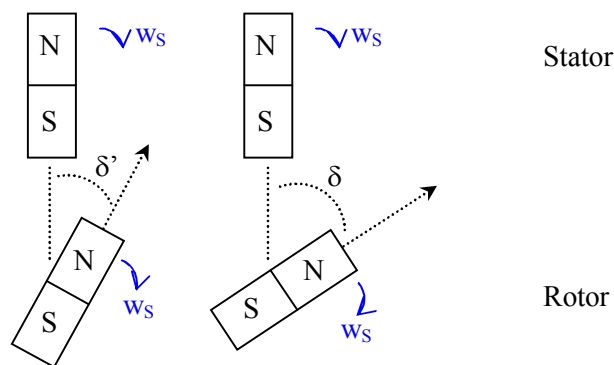


Fig.(IV.8) : Stator-Rotor et angle interne

2) Stabilité du couplage

Nous avons vu dans le travail bibliographique que la machine synchrone a un fonctionnement stable tant que son angle interne δ ne dépasse pas la valeur de $\pi/2$.

On définit la puissance synchronisante d'un alternateur par :

$$P_s = \frac{dP}{d\delta} = \frac{P_1 - P}{\Delta\delta} = \frac{E.U}{L\omega} \cos\delta \quad (\text{IV.6})$$

Pour un décalage électrique $\Delta\delta$ et une variation de puissance $P-P_1$.

Et le couple synchronisant $C_s = \frac{P_s}{\Omega}$ (Ω vitesse de synchronisme).

C'est ce couple qui, comme un couple élastique, ramène au synchronisme tout décalage de la roue polaire, dans les opérations de répartition de la charge active. Donc plus C_S est grand, plus l'équilibrage est stable.

3) Réglage de la puissance réactive

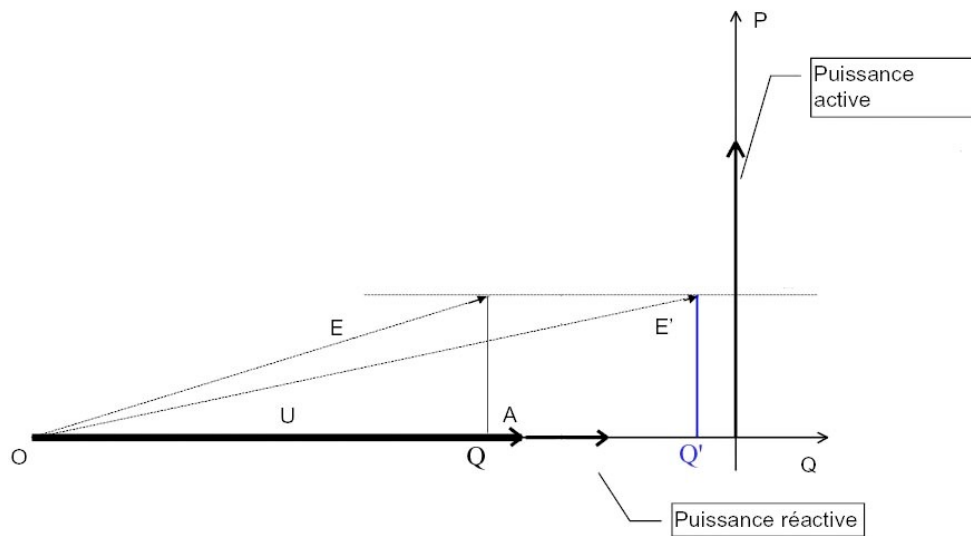


Fig. (IV.9) : Diagramme de Behn Eschenburg, variation de réactif

Sur le diagramme de Behn Eschenburg de l'alternateur synchrone de la Fig), nous remarquons que, pour une même puissance active, nous pouvons varier la puissance réactive en changeant la valeur de la f.e.m. de l'alternateur. Nous associons la f.e.m. E à la puissance Q , la f.e.m. E' à la puissance Q' et nous avons $Q < Q'$. Donc pour la répartition de puissance réactive, nous jouons sur l'excitation.

4) Réglage de l'équilibrage des puissances en pratique

a. Définition du statisme

La méthode d'équilibrage des groupes moteur-alternateurs, couramment utilisée pour répartir les charges sur les alternateurs couplés au réseau, fait appel au principe du « plus vite, moins vite ». Ce procédé repose sur le raisonnement précédent. Il consiste à ralentir le groupe le plus

chargé en actif et à accélérer le moins chargé, en ajustant les références vitesse de chaque groupe.

Quoiqu'il en soit, la variation de fréquence sur le réseau ne doit pas dépasser +/-5%.

La courbe représentative de la vitesse du moteur (muni de son régulateur) en fonction de la puissance a donc l'allure indiquée sur la figure (IV.10) (ci dessous). Nous l'assimilerons à une droite.

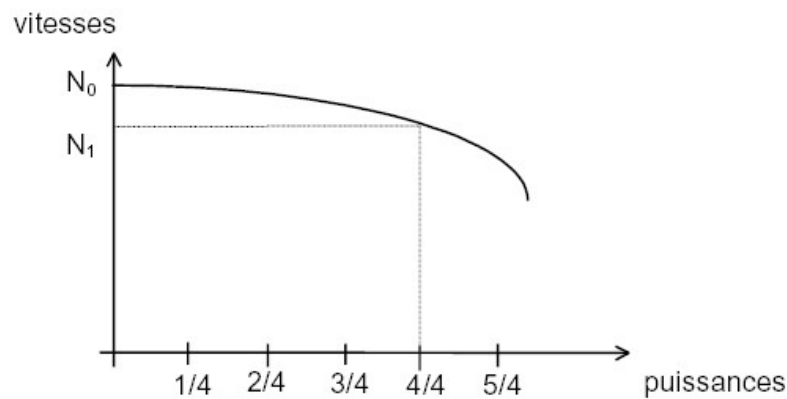


Fig. (IV.10) : Courbe vitesse en fonction de la puissance de l'ensemble moteur+régulateur de vitesse

On appelle statisme du régulateur le rapport :
$$\frac{N_0 - N_1}{(N_0 + N_1)/2} \approx \frac{N_0 - N_1}{N_0} \quad (\text{IV.7})$$

N_0 vitesse à vide, N_1 vitesse en charge.

a) Stabilité de la répartition entre les groupes turbine-alternateurs

La pente de la caractéristique puissance/vitesse $N=f(P)$ doit être négative. Voici la représentation des caractéristiques $N=f(P)$ de deux machines couplées :

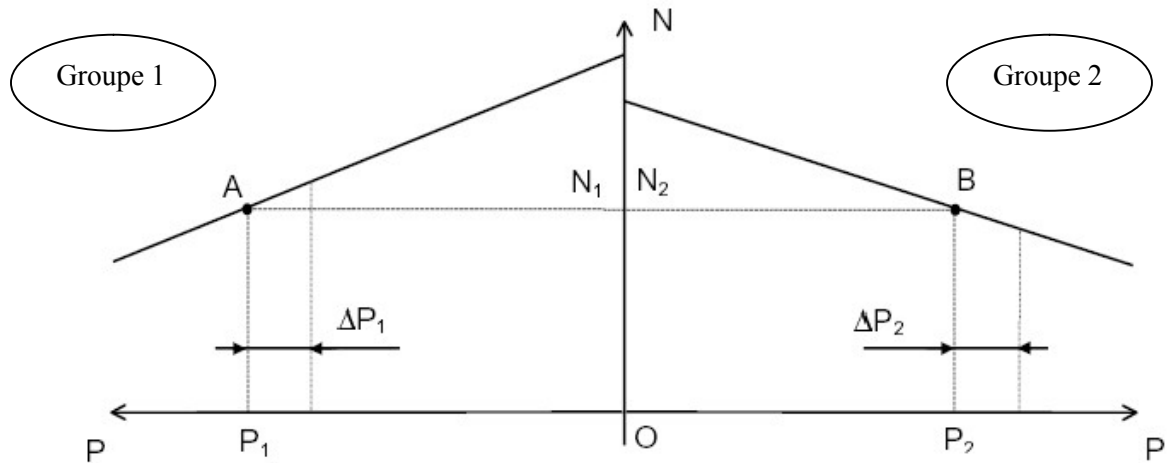


Fig. (IV.11) : Statisme stable de deux machines couplées

On a vu précédemment que pour un couplage correct, il faut que $N_1 = N_2$. Il y a donc une seule répartition possible des puissances sur cette figure. Si P_1 diminue, alors N_1 augmente. Or la puissance P est constante, donc P_2 varie dans le sens inverse et N_2 diminue.

Nous avons vu précédemment qu'une augmentation de la vitesse d'un alternateur impose une augmentation de la puissance active. Nous approximations, au rendement près, la puissance active à la puissance mécanique du moteur. Donc $P_1 \propto N_1$. Donc l'augmentation de N_1 entraîne une augmentation de P_1 . Le point de fonctionnement du groupe 1 retourne au point A initial. Pour la machine 2, c'est le raisonnement inverse : N_2 diminue et entraîne une diminution de P_2 , donc le retour au point B. Par conséquent, on en déduit que le système est stable. Un raisonnement identique pour une pente positive de la caractéristique conduit à la conclusion opposée : le système serait instable. (Fig (IV.12)). Si les caractéristiques sont alignées, alors on est à la limite de stabilité.

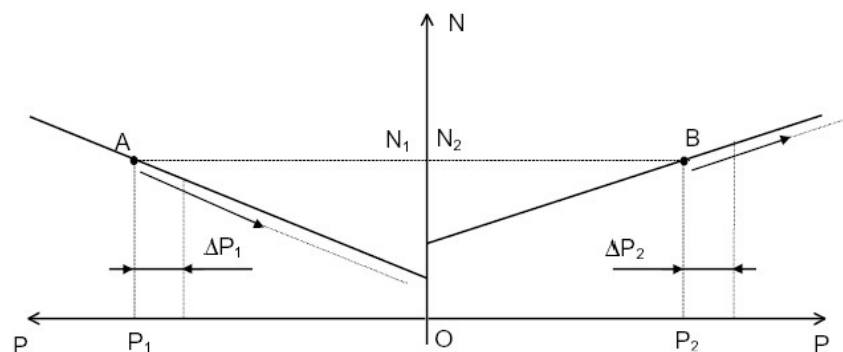


Fig. (IV.12) : Statisme instable de deux machines couplées

Finalemnt, on conclut qu'il faut du statisme, avec une pente négative de la courbe $N=f(P)$. Maintenant que l'on a admis la stabilité de l'équilibrage, il reste à examiner la répartition des charges sur les alternateurs.

b. Répartition de charge des alternateurs couplés en parallèle

Théoriquement, après un couplage correct (i.e. $E=U$), l'alternateur ne débite aucun courant, ne fournit aucune puissance. Il faut par la suite le mettre en charge et lui faire fournir une partie de la puissance électrique demandée par le réseau.

Si l'installation a besoin de plus de puissance, cette puissance supplémentaire sera répartie entre les deux alternateurs en fonction des caractéristiques de leur régulateur.

Un nouvel état d'équilibre s'établira après étouffement du régime transitoire et nous aurons $N = N_1$ (voir Fig (IV.13)). C'est la séquence d'équilibrage.

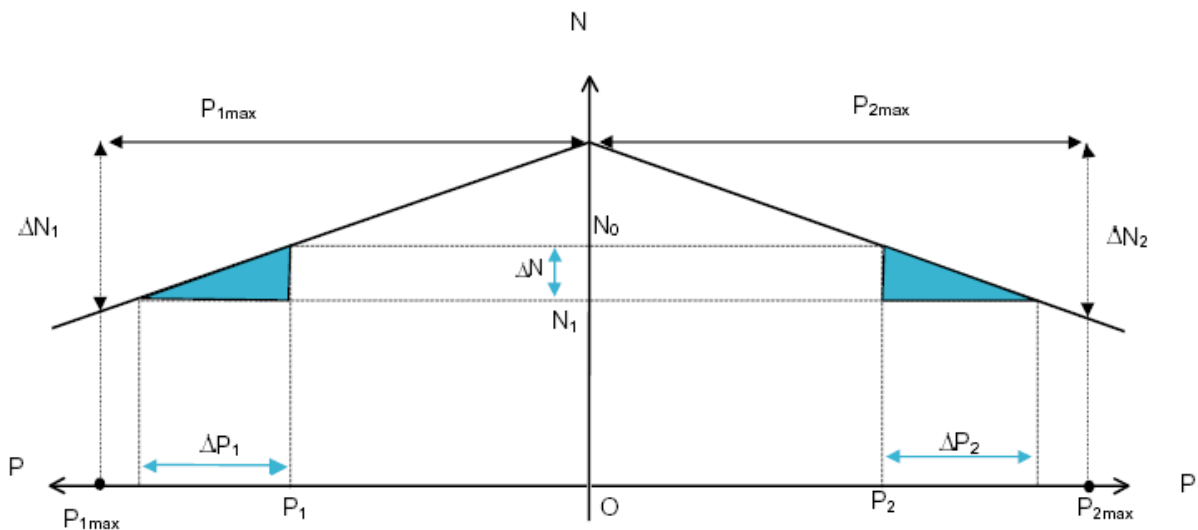


Fig. (IV.13) : Répartition de charge des alternateurs

On considère sur la Fig (IV.13) que les caractéristiques ont la même pente, donc on a :

$$\frac{\text{pente1}}{\text{pente2}} = \frac{\frac{\Delta N}{\Delta P_1}}{\frac{\Delta N}{\Delta P_2}} = \frac{\frac{\Delta N_1}{P_{1\max}}}{\frac{\Delta N_2}{P_{2\max}}} \Rightarrow \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{P_{1\max}}{P_{2\max}} \times \frac{\Delta N_2}{\Delta N_1} \tag{IV.8}$$

On note $\Delta P_{\text{totale}} = \Delta P_1 + \Delta P_2$ la variation de puissance totale au nouvel équilibre.

Ce qui nous donne à partir de l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** les relations suivantes :

$$\Delta P_1 = \Delta P_{totale} \times \frac{\Delta N_2 \cdot P_{1max}}{\Delta N_1 \cdot P_{2max} + \Delta N_2 \cdot P_{1max}} \quad \text{et} \quad \Delta P_2 = \Delta P_{totale} \times \frac{\Delta N_1 \cdot P_{2max}}{\Delta N_1 \cdot P_{2max} + \Delta N_2 \cdot P_{1max}} \quad (IV.9)$$

En conclusion, on peut affirmer que les variations de charge sur chaque alternateur, après couplage, sont proportionnelles à leurs puissances maximales respectives (P_{1max} et P_{2max}) et au statisme de l'autre groupe.

Dans le cas particulier où les groupes n'ont pas la même puissance maximale, on s'arrange pour imposer le même statisme. Ainsi les groupes participent aux variations de puissance, de manière proportionnelle à leur puissance maximale respective, on a :

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{P_{1max}}{P_{2max}} \quad (IV.10)$$

Si les groupes sont identiques, ils se répartissent la même charge : $P_1=P_2$ et $N_1=N_2$.

Par contre, pour des groupes identiques, il est important que les régulateurs de vitesse des groupes aient le même réglage. En effet, si les caractéristiques ne sont pas « alignées », sur une même valeur moyenne, alors la plage de couplage est réduite pour l'un des alternateurs Fig (ci-dessous). Il en résulte que, dans la nouvelle zone de couplage, les puissances sont inégalement réparties.

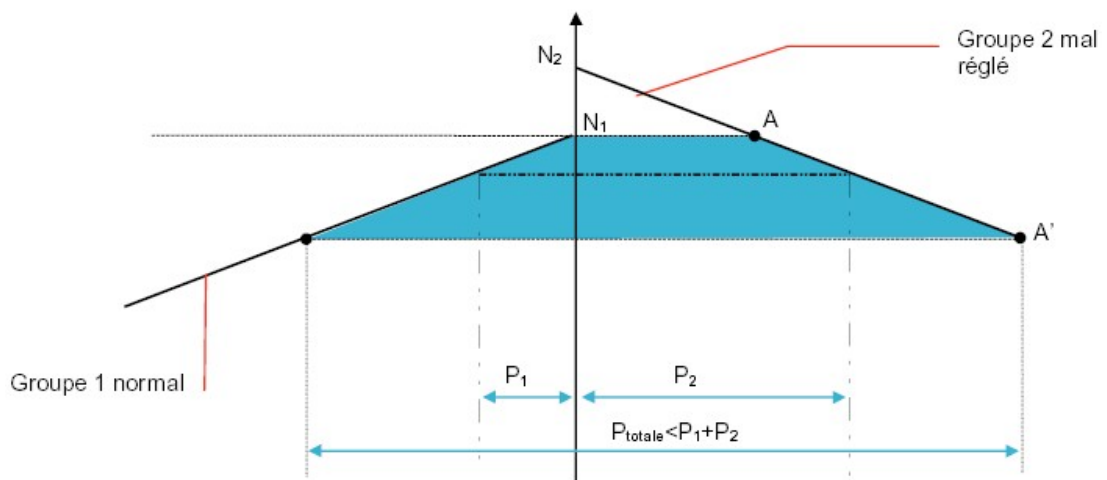


Fig. (IV.14) : Réglage différent de deux groupes

En résumé, si les groupes à coupler sont identiques, leurs caractéristiques doivent être identiques : même ordonnée à l'origine et même pente. Si les groupes ne sont pas identiques, leurs caractéristiques doivent avoir même ordonnée à l'origine et même statisme.

Nous retiendrons que, pour mettre en charge un alternateur que l'on couple au réseau, il faut :

- *augmenter l'admission du moteur d'entraînement et diminuer celle des autres,*
- *diminuer l'excitation de cet alternateur et augmenter celle des autres pour que les courants soient en phase avec ceux du réseau.*

IV.7) Simulation de réseau embarqué

IV.7.1) Simulation du réseau sans les turbines à gaz

Dans ce type de simulation, il y a certains essais qui ne peuvent pas être réalisés, comme la visualisation de l'effet d'un écart de vitesse sur les alternateurs. Car cela correspond à une réaction des turbines qui doivent palier à ce problème. C'est pourquoi dans cette partie, nous nous limiterons à vérifier que le réseau a bien les caractéristiques demandées au niveau de la tension et de la fréquence. On vérifiera aussi que la répartition de la puissance réactive s'effectue convenablement entre les alternateurs.

Les séquences de couplage et de répartition des puissances actives seront abordées avec les turbines à gaz.

IV.7.2) Répartition de la charge

Dans notre système, nous calculons la référence du réactif à fournir pour chaque régulateur de tension de façon à répartir équitablement la production de puissance réactive entre les alternateurs. Pour cette simulation sans turbine, on estime que la puissance active sera répartie de façon égale car les vitesses sont parfaitement égales. Vérifions si c'est le cas tant en actif qu'en réactif. Nous avons définis les demandes de couplage aux instants $t_1=1s$, $t_2=4s$ et de découplage à $t_3=7s$, $t_4=15s$. On obtient les courbes des puissances actives et réactives suivantes :

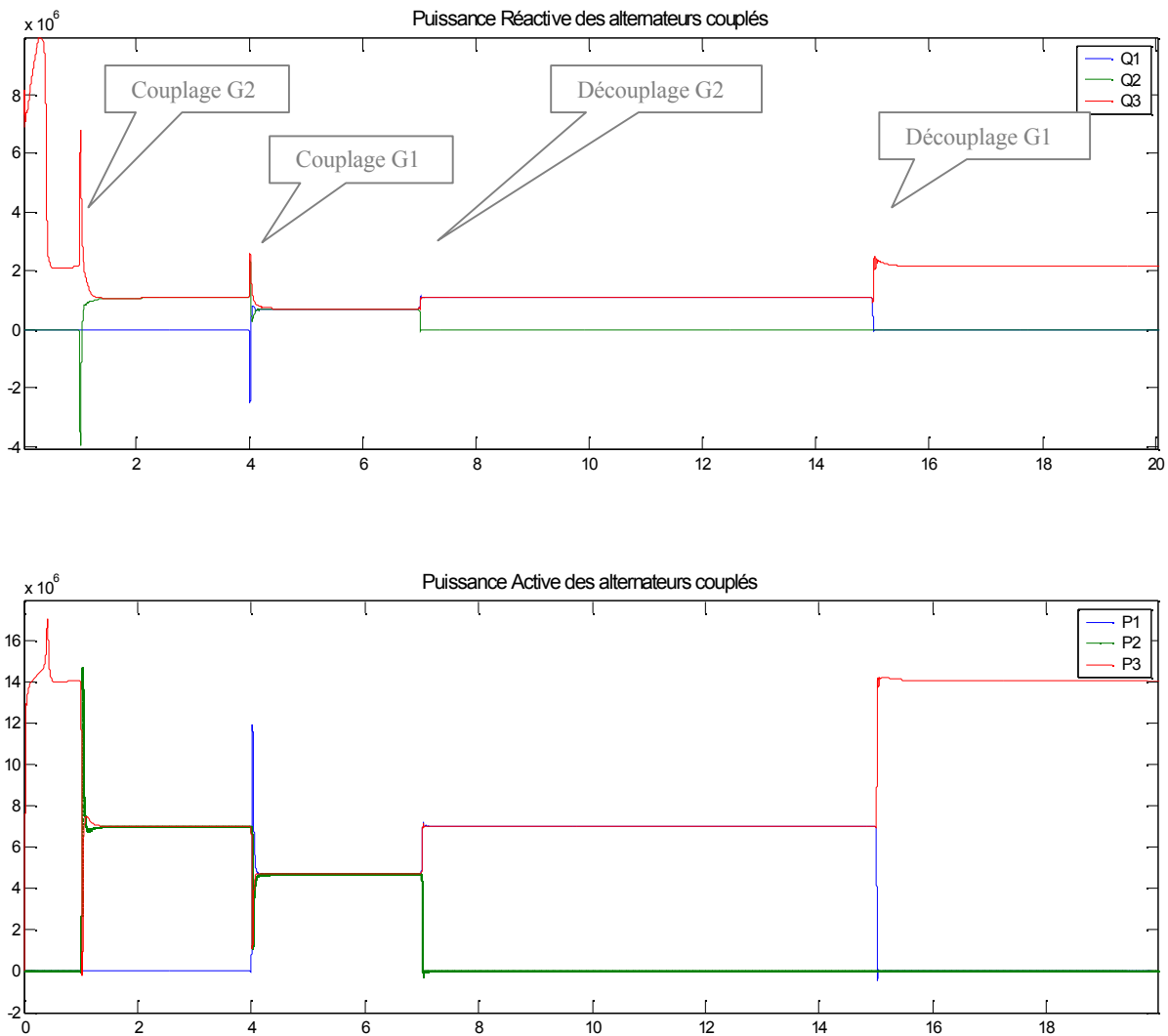


Fig. (VI.15) : Répartition de l'actif et du réactif sur les alternateurs, sans turbines

Nous remarquons que l'équilibre des puissances actives et réactives est parfaitement respecté entre les alternateurs. On vérifie que $PQ_i = PQ_t/2$ (PQ_i : puissance active ou réactive d'un alternateur, PQ_t : puissance active ou réactive totale) quand deux alternateurs sont couplés au réseau et $PQ_i = PQ_t/3$ pour 3 alternateurs couplés. Nous voyons que le couplage est stable étant donné que les pics transitoires de puissance au moment du couplage/découplage sont très faibles.

Le premier pic de réactif, un peu plus long, sur l'alternateur principal, n'existe pas dans la réalité. Il correspond ici à un échelon de référence tension de 100%.

La procédure de synchro-couplage (qui ne couple que si les conditions de couplage sont remplies) n'a pas posé de problème, car les instants de couplage/découplage sont ceux initialement prévus.

IV.7.3) Allure de la tension du réseau avec le couplage/découplage

Nous allons voir si la configuration du réseau, pendant les couplages/découplages des alternateurs, respecte les normes marines en vigueur. [20]

Les sociétés de classification exigent, au maximum, pour les variations de tension :

- + 6%, - 10% en régime permanent.
- +/- 20% en régime transitoire (temps de recouvrement : 1,5s).

Les caractéristiques de la tension du réseau obtenue sont illustrées ci-dessous :

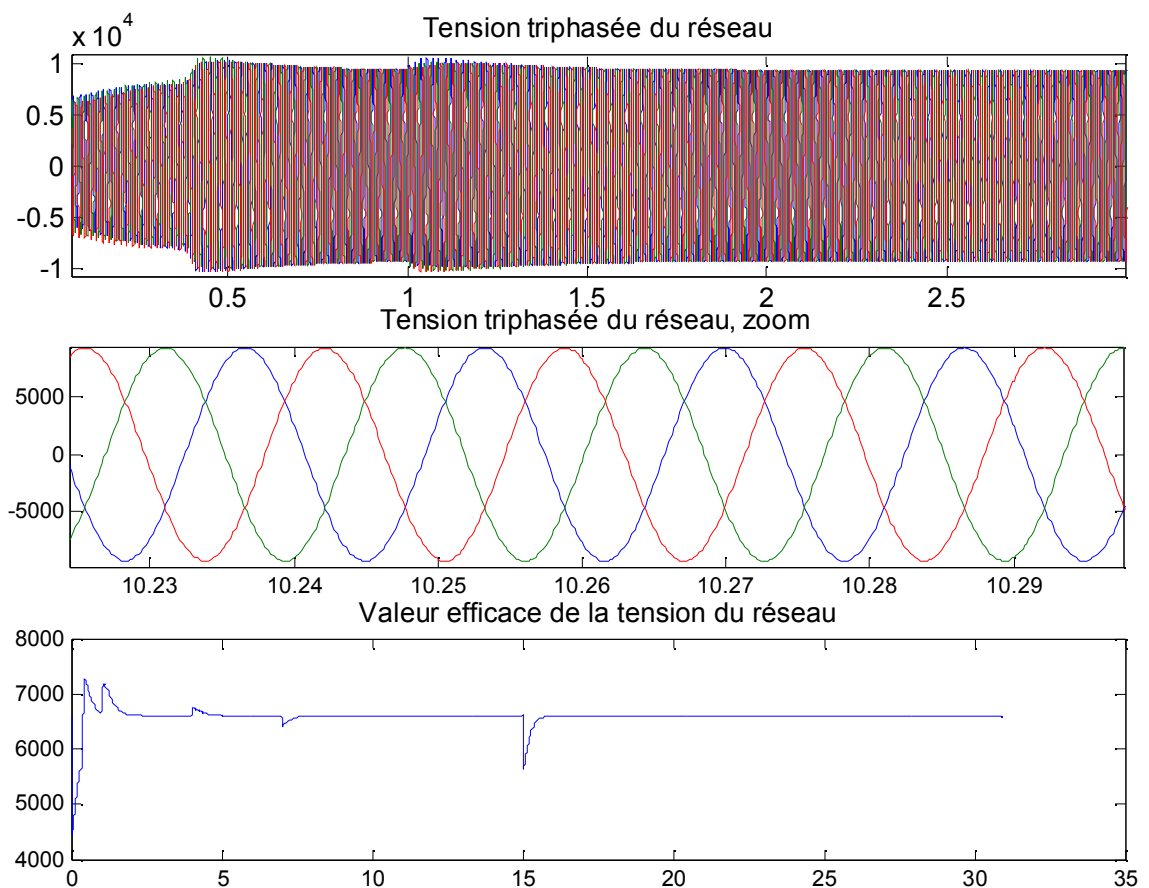


Fig. (IV.16) : Caractéristiques de la tension du réseau lors de couplages/découplages

Nous obtenons un réseau triphasé équilibré sinusoïdal de 60 Hz. Avec la tension efficace qui est égale à la tension nominale demandée (6,6 kV) en régime permanent. Nous avons des transitoires largement inférieurs à 1,5s pendant la variation de tension, et nous respectons les normes.

IV.7.4) Etude du courant de charge lors du couplage/découplage

Ci contre la courbe du courant de charge, avant, pendant et après les procédures de couplage/découplage :

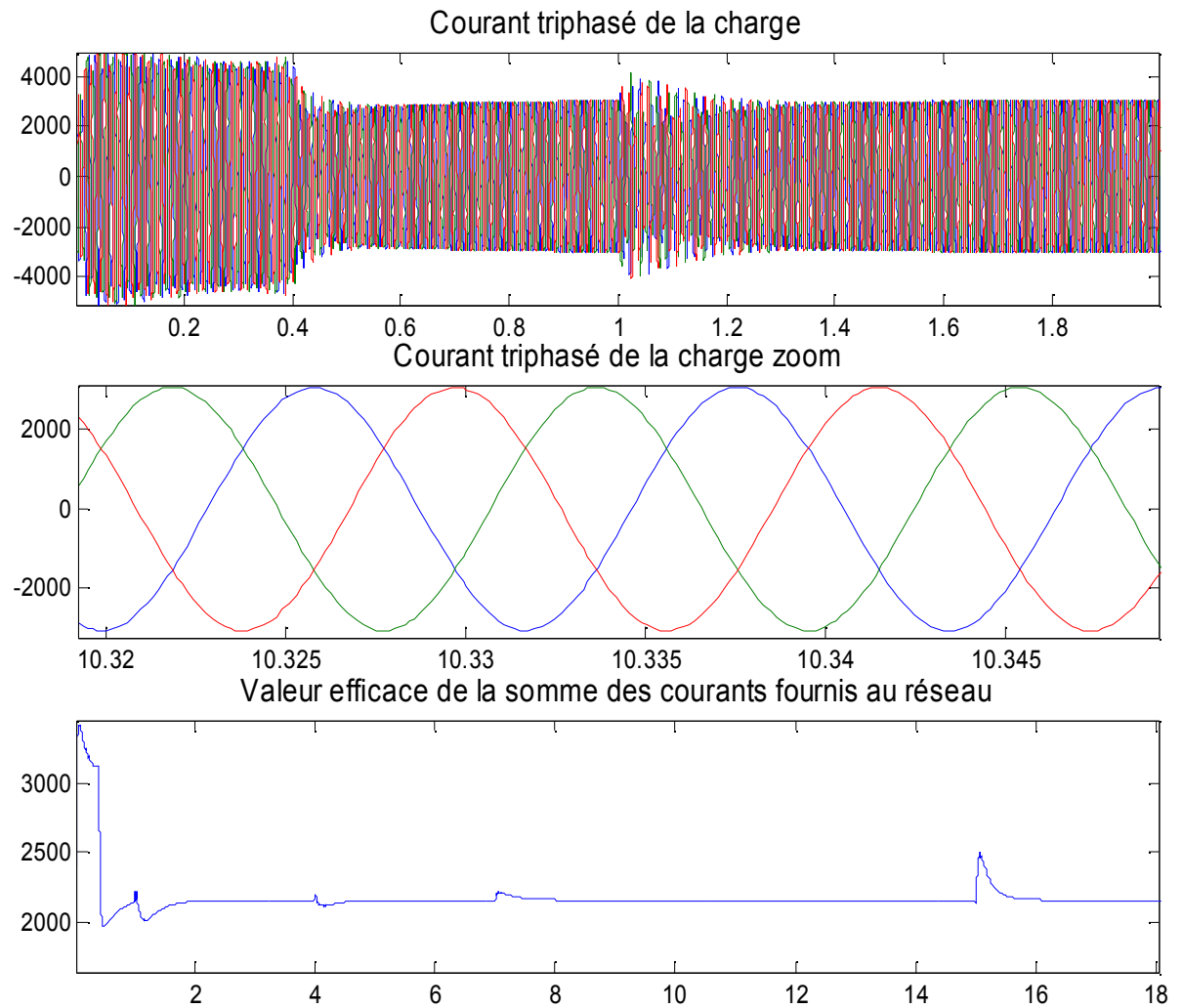


Fig. (IV.16) : Caractéristiques du courant de la charge lors de couplages/découplages

Nous voyons que le courant absorbé, à puissance constante, reste constant. Et le courant total reste inférieur à la somme des courants nominaux des alternateurs.

IV.8) Simulation du réseau avec les turbines à gaz

Dans ce cas on s'intéresse toujours aux caractéristiques du réseau, ainsi qu'aux phénomènes de couplage des groupes turbo-alternateurs en tenant compte du statisme, des charges et décharges.

Nous illustrerons les résultats de notre simulation, en regardant ce qui se passe au niveau de l'équilibrage des alternateurs, l'évolution de la référence vitesse, les effets du couplage, la réaction des amortisseurs des machines synchrones et les performances obtenues pour le respect des normes de tension, de fréquence et d'équilibre du réseau.

IV.8.1) Répartition de la charge avec couplage/découplage

Ce test est utilisé aussi pour voir les conséquences d'impacts de charge. Nous nous intéressons surtout à l'équilibrage d'actif.

Ci-dessous la répartition des charges active et réactive :

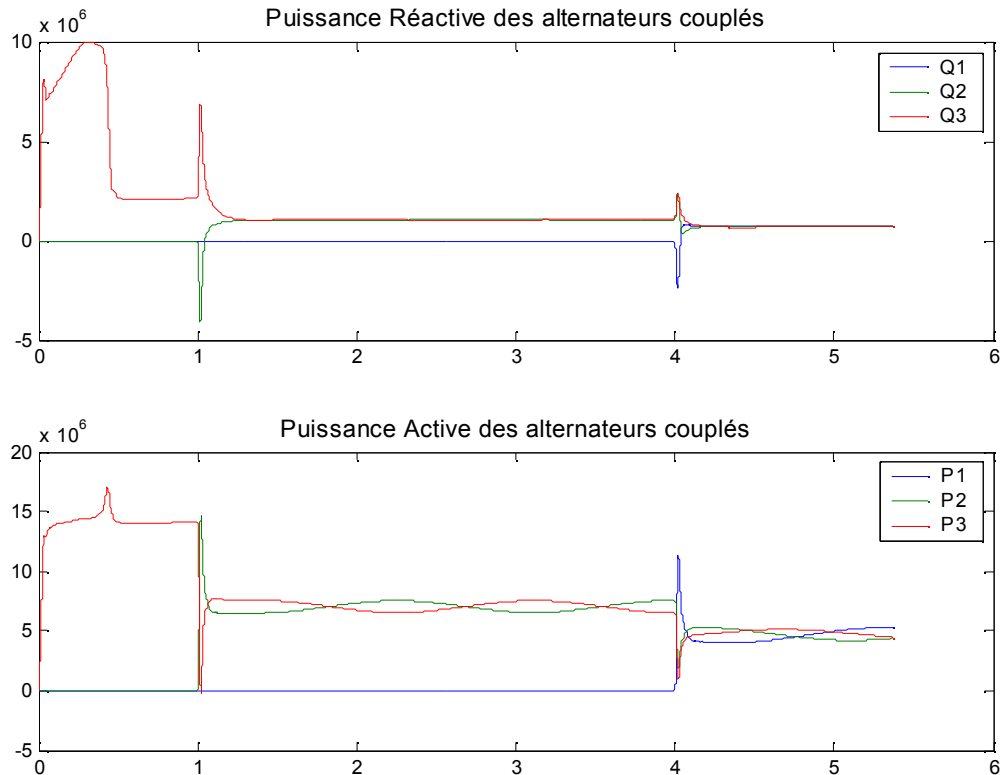


Fig.(IV.17) : Répartition de l'actif et du réactif sur les alternateurs, avec les turbines

Nous remarquons que les puissances actives et réactives sont équilibrées entre les alternateurs. Néanmoins, nous constatons qu'il existe un léger pompage de puissance active entre les groupes. Cela peut être dû à un mauvais dimensionnement des alternateurs pour le système étudié (résistance statorique trop faible). Nous pouvons aussi penser à un mauvais réglage des régulateurs de vitesse qui entretiendraient les oscillations.

En pratique, après un réglage optimal des régulateurs, on utilise des amortisseurs, sous forme mécanique ou électrique, le but étant de dissiper l'énergie échangée entre les générateurs.

IV.8.2) Etude de la tension du réseau avec le couplage/découplage

Nous vérifions toujours si la configuration du réseau, respecte les normes marines en vigueur. Nous obtenons, sur la Fig. (IV.17), un réseau triphasé équilibré sinusoïdal de 60 Hz, avec une tension efficace égale à la tension nominale demandée (6,6 kV) en régime permanent. Nous avons des transitoires inférieurs à 1,5s pendant la variation de tension, et nous respectons les normes (+6%/-10% en permanent, +/-20% en transitoire). Nous avons des résultats convenables pour la tension, malgré les faibles oscillations de puissance active.

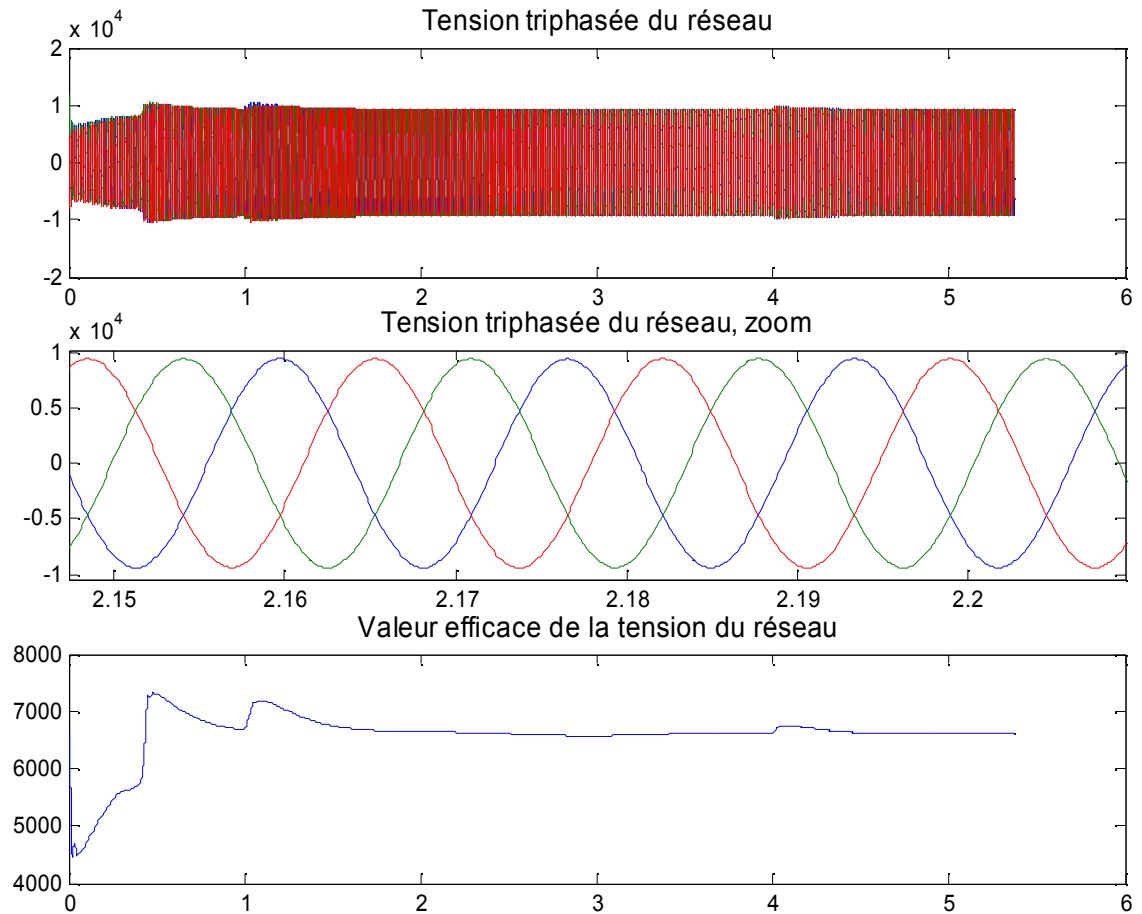


Fig.(IV.18) : Caractéristiques de la tension du réseau, avec les turbines

IV.9) Ramener toute la simulation au référentiel (d,q)

Un des intérêts du référentiel de Park est le travail avec des variables qui ne dépendent pas du temps, si le référentiel est choisi intelligemment. Cela permet, d'un point de vue simulation, de faciliter la résolution des calculs et d'en réduire le temps.

On cherche une transformation qui permette de passer du repère (d,q) local d'un bloc quelconque au repère (d,q) principal défini par l'alternateur principal, dans le but de pouvoir faire les sommes vectorielles des grandeurs sans erreur.

Conclusion

L'analyse des performances des architectures électriques (réseaux embarqués) est réalisée à partir de plates-formes de modélisation et simulation. Celles-ci permettent notamment d'évaluer: La stabilité des réseaux (tension, fréquence), le respect des réglementations et des normes. La répartition des puissances actives et réactives entre les sources (Alternateurs). Le comportement des sources en fonction de leurs caractéristiques propres (inertie et couple nominal). L'influence des régulations de vitesse sur la turbine. La mise en évidence de phénomènes particuliers.

Ces plates-formes sont constituées :

- *D'un logiciel de simulation (Matlab/Simulink) ;*
- *de bases de données de modèles des principaux constituants d'une architecture électrique. Ces modèles paramétrables doivent être qualifiés sur l'aspect représentativité comportementale par corrélation avec des résultats d'essais réels. Ils sont classés par famille : génération d'énergie, distribution haute et basse tension, propulsion électrique et charges.*
- *D'une interface homme-machine pour la gestion des architectures modélisées, les simulations et phénomènes observés.*

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale :

Notre travail nous a permis de découvrir les différentes composantes des réseaux embarqués, qui sont constitués en générale d'une partie de production d'énergie électrique (turbine/ moteur diesel...etc. alternateurs) puis une partie de transport et distribution de l'énergie (jeux de barres, les lignes de transport) puis la partie des charges.

Comme on avait déjà vu notre système embarqué se constitue de trois branches de production d'énergie électrique montées en parallèles, et pour étudier leurs comportements on a modélisé les différentes machines puis on a construit le schéma globale sur Matlab Simulink, d'après les résultats de simulation on constate que le système alternateur-charge fonctionne parfaitement et son comportement permet d'appréhender tout changement de charge et appel de puissance.

Le fonctionnement des alternateurs auxiliaire compense les puissances actives et réactives que l'alternateur principal ne produit pas.

Il s'avère que le temps d'exécution de cette simulation est beaucoup trop long (environ 1h5mn).

Dans une simulation, un temps de calcul long (ralentissement de la simulation) peut avoir plusieurs causes :

- *La simulation comporte une erreur et la solution diverge.*
- *La simulation n'est pas optimisée et met en œuvre trop de paramètres variables dans le temps.*
- *La méthode de résolution est mal choisie pour le problème donné.*
- *L'outil de simulation est mal adapté au temps réel : il utilise trop de ressources mémoire et ne minimise pas les lignes de code pour le calcul.*

Il s'avère que le système modélisé n'est pas optimisé pour réduire le temps de calcul. On remarque que beaucoup de variables sont en fonction du temps, alors qu'il aurait pu en être autrement. En effet, si le choix de modéliser chaque bloc dans le repère (d,q) est judicieux, il n'en est pas de même pour les grandeurs de transit qui dépendent du temps. Plus précisément, toutes les entrées/sorties tensions/courants sont ramenées dans le repère de Concordia (α,β)

Conclusion générale

*afin de travailler dans un repère unique, ce qui permet notamment de sommer les courants.
Or, on sait que les variables du repère (α, β) évoluent dans le temps.*

En fin comme perspectives nous souhaitons que notre travail sera amélioré par d'autres travaux d'autres auteurs et en particulier le temps de simulation du système.

ANNEXE

Annexe

Description sommaire des blocs

Dans cette partie, nous décrivons de manière simple les Entrées/Sorties des différents blocs.[19]

Bloc 1 : le régulateur de vitesse comporte,

• 6 entrées :

-Signal de commande du fuel (ftc), → Minimise la quantité de fuel s'il y a provenant du contrôle de température dépassement de la température limite d'échappement.

-Référence de vitesse (Speed Ref) → Fixée à 1 P.U. (Per Unit).

-Puissance active (Pe) → Correspond à celle de l'alternateur accouplé à la turbine, utilisé pour l'équilibrage en actif synchronisme des alternateurs.

-Sélection du correcteur approprié (Control Select) → Pour choisir le type de correcteur suivant l'utilisation du turbo-alternateur (marche en parallèle, sans statisme, ...).

-Vitesse mécanique en P.U. (w) → Issue de l'équation mécanique.

-Signal de commande du fuel (fac), → Limitation de puissance en cas de forte accélération. provenant du contrôle de l'accélération

• 2 sorties :

-Signal de commande du fuel (fc) → Signal envoyé au bloc 3 qui donne la référence de fuel à fournir.

-Indication de température limite (Temp Limit) → Signal binaire qui indique si on dépasse la température donnée par le constructeur.

Bloc 2 : le contrôle d'accélération comporte,

• 1 entrée :

-La vitesse mécanique en P.U. (w) → Donnée par l'équation mécanique.

• 1 sortie :

-Signal de commande du fuel (f_{ac}), → Limite les contraintes thermiques au démarrage et évite l'emballement de la turbine en cas de délestage de charge.
imposé par le contrôle d'accélération

Bloc 3 : le système de contrôle du flux de fuel comporte,

• 2 entrées :

-Signal de commande du fuel (f_c) → Référence de fuel à fournir.

-La vitesse mécanique en P.U. (w) → Donnée par l'équation mécanique.

• 2 sorties :

-Flux de fuel après la combustion et un délai de transit, en P.U. (W_f) → Pour la détermination de la température d'échappement.

-Flux de fuel après la combustion et la décompression, en P.U. (W_f) → Pour la détermination du couple de la turbine.

Bloc 4 : le système équation mécanique a,

• 2 entrées :

-Flux de fuel en P.U. (W_f) → Vient du système de contrôle de fuel.

-Le couple de charge (Load Torque) → Correspond, dans notre cas, au couple électromagnétique de l'alternateur.

• 1 sortie :

-Vitesse mécanique en P.U. (System Speed) → Correspond à la vitesse de l'alternateur.

Bloc 5 : le premier régulateur de température contient,

• 4 entrées :

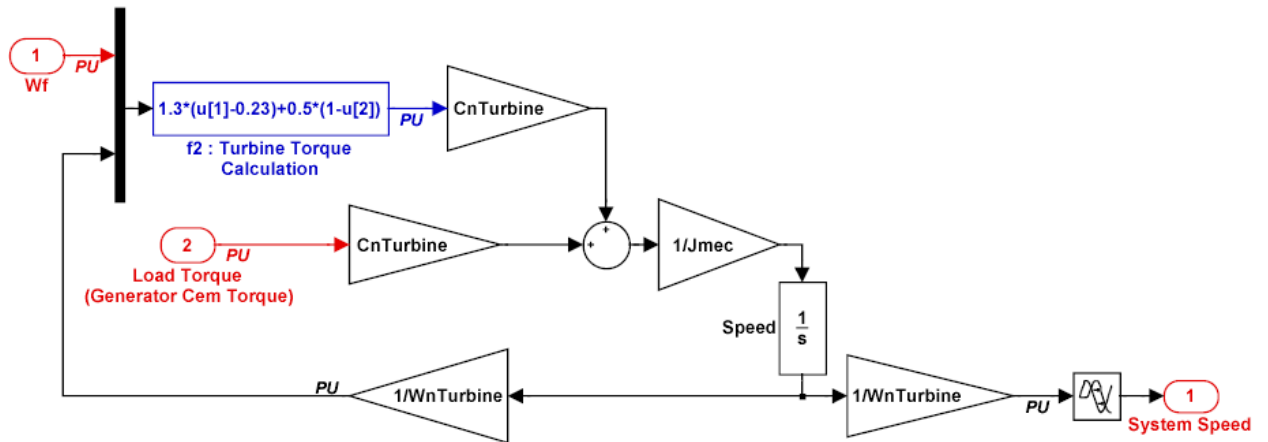
- Flux de fuel en P.U. (W_f) → Vient du système de contrôle de fuel.
- La vitesse mécanique en P.U. (w) → Donnée par l'équation mécanique.
- La température nominale des gaz d'échappement (T_r) → Calculée par le second contrôle de température.
- l'ouverture de la vanne d'entrée du carburant (IGV) → Calculée par le second contrôle de température.
- 2 sorties :
 - Signal de commande du fuel (f_{tc}), provenant du contrôle de température → Minimise la quantité de fuel s'il y a dépassement de la température limite d'échappement.
 - La température mesurée des gaz d'échappement (T_m) → Mesure par thermocouple, simulée.

Bloc 6 : le second régulateur de température contient,

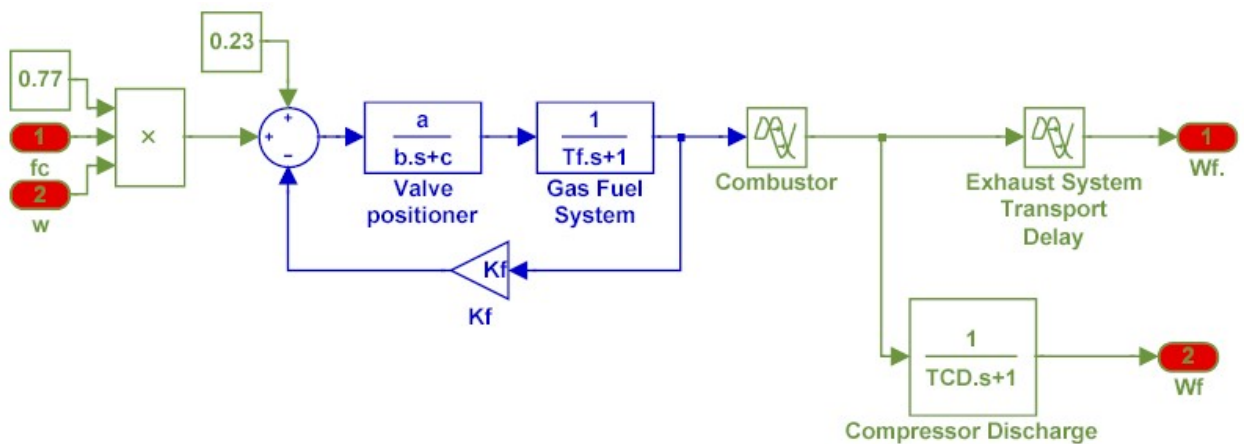
- 1 entrée :
 - La température mesurée des gaz d'échappement (T_m) → Mesurée par thermocouple.
- 2 sorties :
 - La température nominale des gaz d'échappement (T_r) → Sert d'indicateur pour limiter la température d'échappement.
 - l'ouverture de la vanne d'entrée du carburant (IGV Angle) → Contrôle la vanne d'admission du fuel afin de limiter T_r .

Modélisation de la turbine à gaz [19]

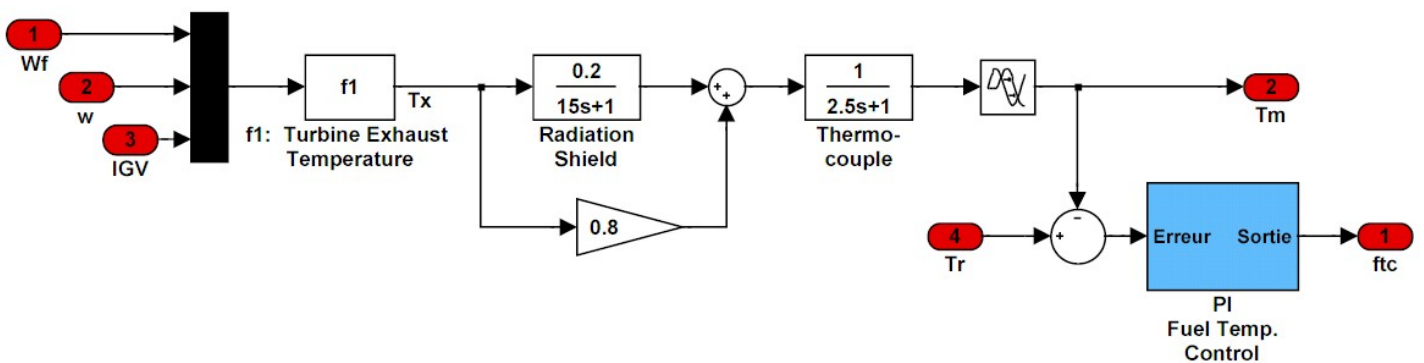
- Bloc de l'équation mécanique :



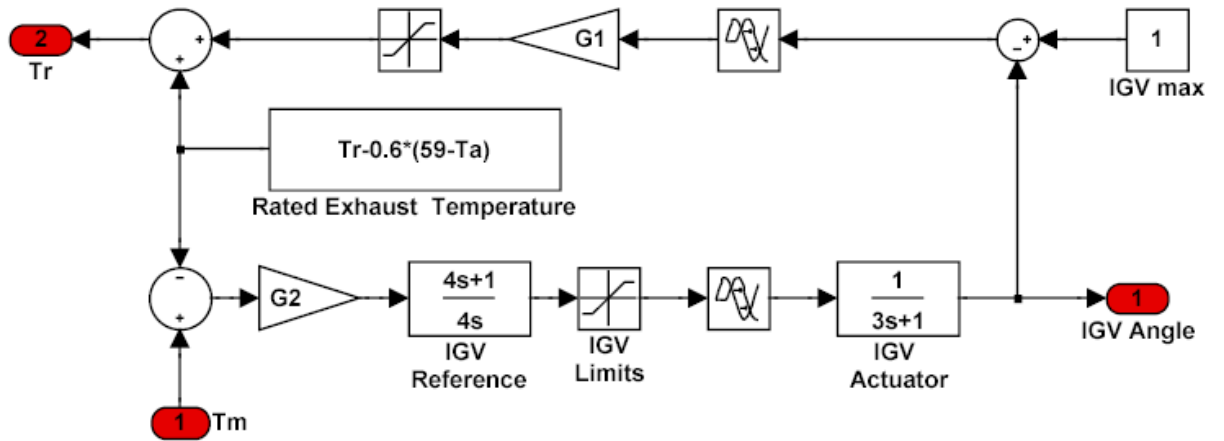
- Bloc du système de positionnement de la valve qui contrôle l'arrivée de fuel, avec la chambre de combustion :



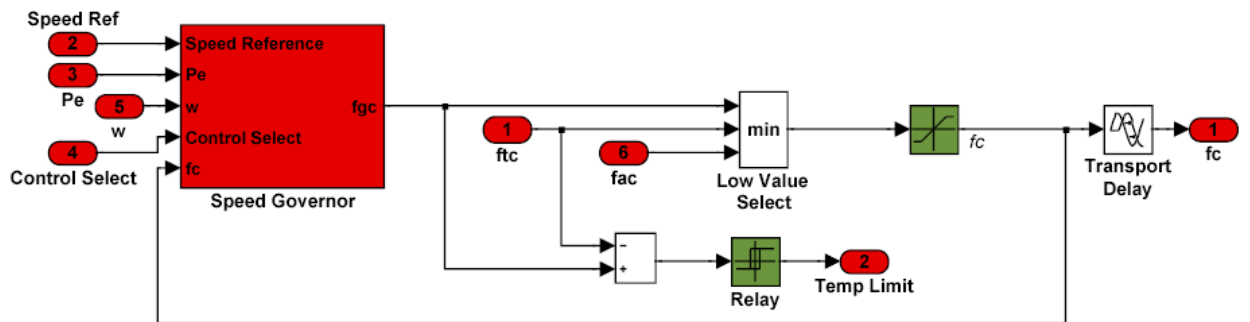
- Premier régulateur de la température mesurée à la sortie des gaz d'échappement :



- *Second régulateur de température qui limite l'ouverture de la vanne d'entrée du fuel :*



- *Module contenant les régulateurs de vitesse :*



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : www.Wikipédia.com « Historiques de la propulsion des navires »

Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre

[2] : **Ramdane LATEB** « Modélisation des machines Asynchrones et synchrones à aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps » (Application à la propulsion marine par pod)

Thèse doctorat de L'I.N.P.L

[3] : *La propulsion électrique des navires 1*

D'après un article de Laurent Mazodier paru dans la Revue de l'Electricité et de l'Electronique.

[4] : **Xavier Kestelyn** « Modélisation vectorielle multimachines pour la commande des ensembles convertisseurs- machines polyphasés ».

Sujet de thèse présenté devant l'université de Lille 1. 2003

[5] : **Michel LAJOIE-MAZENC** « Alimentation des machines synchrones »

CD Technique d'ingénieur D3620.

[6] : **Benoit de METEZ-NOBLAT** « Stabilité dynamique des réseaux électrique industriels »

CD Technique d'ingénieur N185.

[7] : www.Wikipédia.com « Méthode des éléments finis »

Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre

[8] : **Sylvain CANAT** « Simulation temporelle d'un démarrage d'une machine asynchrone à cage »

LEEI/ENSEEIH/INP Toulouse

[9] : : www.Wikipédia.com « Les logiciels de simulation des réseaux électriques »

Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre

[10] : **P.BARRET** « Régimes transitoires des machines tournantes électriques »

Edition Eyrolles, 1982

[11] : **Salah HADDAD** « Régimes transitoires des machines électriques »

[12] : **Chee-Mun Org** « Dynamique simulation of electric machinery using Matlab/Simulink »

School of Electrical and Computer Engineering. Perdue University West Lafayette, Indiana.

Prextice. Hall PTR Vpper saddle river, New Iervey 07458ISBN:0-13-723785-5

[13]: **Michel POLOUJADOFF** « machines électriques et réseaux industriels »

Edition DUNOD (machine 58) 1972.

[14]: **André Genon, Willy Legros** « machines électriques ».

HERMES Science Europe, 2000

[15] : **G.STURTZER** « Modélisation et commande des moteurs triphasés »

Ellipses 2000. (machine 41.)

[16] : **J.CHATLAIN** « Machines électriques »

Edition GEORGIE, Volume 10-1983.

[17] : **Gérard Fillian** « Le navires toutes électriques »

Services des programmes navals,

[18] : **Bureau Veritas**, « Rules for The Classification of Ships », Classification des navires, mai 2003.

[19] : **J. A. Rosencrans**, « Simplified single shaft gas turbine simulation block diagram », *Alstom Power Conversion Paper* , novembre 2001.

[20] : **C. Chevassu**, « Couplage des alternateurs », Cours de l'Ecole Navale de Brest (1997).