



Université Batna -2-

Faculté de Technologie

Département d'Électrotechnique

Mémoire

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MAGISTER en Électrotechnique
Option : Machines Electriques**

Présenté Par :

BOUKHALFA GHOLEM ALLAH

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Batna

Thème

**Expérimentation et Simulation d'un Arbre
Electrique**

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. R. ABDESSEMED	Prof.	Université Batna	Président
Dr. HEDJAZI .DJEMAI	M.C.A.	Université Batna	Rapporteur
Dr. S .BENAGGONE	M.C.A.	Université Batna	Co-rapporteur
Dr. CHAIBA AZZEDINE	M.C.A.	Université Sétif	Examineur
Dr. HARBOUCHE YUCEF	M.C.A.	Université Batna	Examineur

Remerciement

Tout d'abord je remercie DIEU le tout puissant de la bonne santé, la volonté et la patience qu'il nous a donné toutes ces longues années d'études.

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de l'université de Batna notamment à mon encadreur Mr HEDJAZI DJEMAI et Co-encadreur Mr S .BENAGGONE d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé et pour leurs conseils, je tiens notamment, à adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen, qui ont accepté de juger mon travail.

Un grand merci au responsable du laboratoire des machines électriques Je ne peux terminer sans avoir une pensée pour mes parents, ma sœur et mes frères. Ils m'ont toujours soutenu et encouragé. Le parcours que j'ai eu jusqu'à ce jour.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents.

Mes sœurs et leurs enfants.

Mes chers frères.

*Et tous Mes amis, Moufid, Sif, Moussa, Bilel, , Mohammad, Yacine, Fayez,
Hamoudi, Cussama et Alouani*

A Mes amis à l'université

Simulation et expérimentation d'un arbre électrique

Résumé

Cette thèse traite la modélisation, la simulation et l'expérimentation d'un arbre électrique à base de deux machines asynchrones à rotors bobiné doublement alimenté de même puissance connectées directement au réseau les rotors sont couplés électriquement avec une ligne de transmission. Ce type de montage est largement utilisé spécialement dans les montes charge et la télétransmission, nous avons commencé par des généralités sur les SELSYN, en suite nous avons effectué une étude de modélisation et de simulation de la MADA, en troisième lieu nous avons étudié la modélisation de couplage entre les deux MADA d'après les résultats obtenus nous avons confirmé par simulation et expérimentalement la validité de transmission du mouvement entre deux machines mécaniquement indépendante.

Le montage est réalisé au niveau du laboratoire d'électrotechnique, la simulation est conçue par logiciel MATLAB Simulink.

Mots-clés

Arbre électrique, SELSYN, synchro machine, résolveur, machine asynchrone à rotor bobiné doublement alimenté MADA, simulation, convertisseur de fréquence.

Sommaire

Résumé.	IV
Liste des Symboles et Notations.	VIII
Introduction générale	1
CHAPITER - I – État de l’art sur l’arbre électrique	
I.1 Introduction	04
I.2. Principe de Fonctionnement d’un synchro	04
I.3. Classification des synchro machines	08
I.3.1. Catégories fonctionnelles Synchro	09
I.3.1.1. Transmetteur de couple (TX)	09
I.3.1.2. Transmetteur de contrôle. (CX)	09
I.3.1.3. Transmetteur différentiel de couple (TDX)	10
I.3.1.4. Transmetteur différentiel de Control (CDX)	11
I.3.1.5. Couple récepteur (TR)	11
I.3.1.6. Récepteur différentiel de couple (TDR)	12
I.3.1.7. Transformateur de contrôle (CT)	12
I.3.1.8. Couple émetteur-récepteur (TRX)	13
I.3.2. Systèmes de Résolveur	14
I.4. Construction de synchro	14
I.5. Circuit interne de divers types de synchro	16
I.6. Utilisation des Systèmes de synchro machine	16
I.7. Deux moteurs récepteurs connectés avec un seul transmetteur générateur	17
I.8. Fonctionnement d'une machine asynchrone triphasée dans les systèmes de liaison synchro. ..	18
I.8.1. Machines asynchrones à induction double alimentée à rotor bobiné	18
I.8.1. principe de fonctionnement d’un arbre électrique triphasé	19
I.8.3. arbre électrique (synchros de puissance).	22
I.9. Conclusion	23

Sommaire

CHAPITRE -II-

ETUDE ET MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTEE MADA

II.1. Introduction	25
II.2. Rappel sur les champs tournants	25
II.3. Constitution de la machine asynchrone	28
II.3. Principe de fonctionnement de la MADA	28
II.4. Régimes de Fonctionnement de la MADA.	29
II.4.1. Régime de fonctionnement synchrone	29
II.4.2. Régime de fonctionnement asynchrone	29
II.5. Classification des machines asynchrones double alimentées	30
II.6. Variation de la vitesse de rotation	30
II.7. Application de la MADA	32
II.8. Structure de la MADA	32
II.8.1. MADA à rotor bobiné	32
II.8.2. MADA sans balais	33
II.8.3. MADA en cascade	34
II.9. Mode de fonctionnement	34
II.9.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	34
II.9.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	35
II.9.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	36
II.9.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	36
II.10. APERÇU SUR LES CONFIGURATIONS DE LA MADA A ROTOR BOBINE	36
II.11. Avantages et inconvénients de la MADA	41
II.12. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	43
II.13. Conclusion	55

CHAPITRE -III-

Sommaire

ETUDE DE COUPLAGE ENTRE DEUX MADA « ARBRE ELECTRIQUE »

III.1. INTRODUCTION	57
III.2. Principe de fonctionnement	57
III.2.1. Convertisseur asynchrone de fréquence	58
III.2.2. liaison électrique des synchro machines Triphasées	60
III.3. Schéma équivalent simplifié de couplage avec double alimentation	64
III.4. Modélisation de couplage de deux MADA triphasées arbre électrique	64
III.4.1. Modèle de la première machine	65
III.4.2. Modèle de la deuxième machine	66
III.5. Synchro machine monophasé	67
III.5.1. Couple synchronisant	69
III.6. Conclusion	71

CHAPITRE - IV -

SIMULATION ET EXPERIMENTATION DE L'ARBRE ELECTRIQUE

IV.1. Introduction	73
IV.2. Schéma bloc de SYLSYN triphasé	73
IV.3. Simulation et interprétations.	74
IV.3.1. Couplage direct entre deux machines	74
IV.3.2. Entraînement du transmetteur par une vitesse	76
IV.3.2.1 Interprétation des courbes	78
IV.3.3 Simulation couplage inverse	78
IV.3.3.1 Interprétation des courbes	82
IV.4. l'essai expérimentation de l'arbre électrique	82
IV.4.1. Description de la machine utilisée dans l'expérimentation	82
IV.4.3.1. résultats obtenu.	84
IV.4. 4. Essai avec insertion des résistances rotoriques.	85
IV.5. Conclusion	86

Sommaire

Conclusion générale 87

Annexe

Bibliographie

Liste des symboles et notations

MADA	Machine Asynchrone Doublement Alimentée
MASDE	Machine Asynchrone Double Etoile
MAS	Machine Asynchrone
AC	Alternative Current
Ω_s	vitesse du synchronisme (tr/min)
$\Omega_{s\ 1,2}$	vitesse du synchronisme des stators 01 et 02 (tr/min)
ω_s	pulsation des grandeurs électriques statoriques (rd/s)
Ω_r	vitesse mécanique de rotation du rotor (tr/min)
$\omega_{r1, 2}$	vitesse électrique de rotation des rotors 01 et 02 (rd/s)
P	nombre de paires de pôles de machine
p_1	nombre de paires de pôles de la première machine
p_2	nombre de paires de pôles de la deuxième machine
$V_{abc, s1}$	tensions triphasées statoriques (stator 01) (V)
$V_{abc, s2}$	tensions triphasées statoriques (stator 02) (V)
$V_{abc, r1}$	tensions triphasées rotoriques (rotor 01) (V)
$V_{abc, r2}$	tensions triphasées rotoriques (rotor 02) (V)
$I_{abc, s1}$	courants triphasées statoriques (stator 01) (A)
$I_{abc, s2}$	courants triphasées statoriques (stator 02) (A)
$I_{abc, r1}$	courants triphasées rotoriques (stator 01) (A)
$I_{abc, r2}$	courants triphasées rotoriques (stator 02) (A)
$R_{abc, s1}$	résistance d'une phase statorique (stator 01) (Ω)
$R_{abc, s2}$	résistance d'une phase statorique (stator 02) (Ω)
$R_{abc, r1}$	résistance d'une phase rotorique (rotor 01) (Ω)
$R_{abc, r2}$	résistance d'une phase rotorique (rotor 02) (Ω)
$\Phi_{abc, s1}$	flux triphasées statoriques (stator 01) (Wb)
$\Phi_{abc, s2}$	flux triphasées statoriques (stator 02) (Wb)
$\Phi_{abc, r1}$	flux triphasées rotoriques (rotor 01) (Wb)
$\Phi_{abc, r2}$	flux triphasée statoriques (rotor 02) (Wb)
$[v_s], [v_r]$	vecteurs des tensions statoriques et rotoriques (V)
$[i_s], [i_r]$	vecteurs des courants statoriques et rotoriques (A)
$[\phi_s], [\phi_r]$	vecteur des flux statoriques et rotoriques (Wb)
$[L_{ss}]$	matrice d'inductances statoriques (H)
$[L_{rr}]$	matrice d'inductances rotoriques (H)
$[M_{sr}]$	matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor (H)

Liste des symboles et notations

$P[\theta_s]$	matrice de Park
$P[\theta_s]^{-1}$	matrice inverse de Park
$L_{s1,2}$	inductance propre cyclique des stators 01 et 02 (H)
$L_{r1,2}$	inductance propre cyclique des rotors 01 et 02 (H)
L_m	inductance mutuelle cyclique du stator par rapport rotor (H)
ϕ_{ds1}, ϕ_{ds2}	flux du stator 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (Wb)
ϕ_{qs1}, ϕ_{qs2}	flux du stator 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (Wb)
ϕ_s, ϕ_r	flux homopolaire du stator et rotor (Wb)
ϕ_{dr1}, ϕ_{dr2}	flux du rotor 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (Wb)
ϕ_{qr1}, ϕ_{qr2}	flux du rotor 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (Wb)
ϕ	flux d'excitation (Wb)
V_{ds1}, V_{ds2}	tension du stator 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (Wb)
V_{qs1}, V_{qs2}	tension du stator 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (Wb)
V_s, V_r	tension homopolaire du stator et du rotor (Wb)
v_{dr1}, v_{dr2}	tension du rotor 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (Wb)
v_{qs1}, v_{qs2}	tension du rotor 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (Wb)
i_{ds1}, i_{ds2}	courant du stator 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (Wb)
i_{qs1}, i_{qs2}	courant du stator 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (Wb)
i_{dr1}, i_{dr2}	courant du rotor 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (Wb)
i_{qr1}, i_{qr2}	courant du rotor 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (Wb)
$\theta_{obs}, \theta_{os}, \theta_s$	angles d'un axe lie au champ tournant par rapport au repère du stator (rd)
θ_r	position du stator 01 par rapport au rotor (rd)
σ	angle électrique de décalage entre les deux stators (rd)
$[Z]$	Impédance du système (Ω)
$[L]$	matrice d'inductance du système (H)
C_e ou C_{em}	couple électromagnétique (N.m)
C_{e1}	couple électromagnétique de la première machine (N.m)
C_{e2}	couple électromagnétique de la deuxième machine (N.m)
C_r	couple résistant (N.m)
f	coefficient de frottement (N.m.s/rd)
J	inertie ($kg.m^2$)
$P_{s1,2}$	puissances électriques actives du stator 01 et 02 (W)
σ	coefficient de dispersion total

Liste des symboles et notations

g_1	glissement de la première machine
g_2	glissement de la deuxième machine
g	glissement de la MADA
$Q_{s1,2}$	puissances électriques réactives du stator 01 et 02 (W)
Λ	permeance
t	temps (s)
φ_d	flux instantanée
f_q	Fmm instantanée
C	constante géométrique
TX	transmetteur de couple
CX	transmetteur de contrôle
TDX	transmetteur différentiel de couple
CDX	transmetteur différentiel de contrôle
TR	couple récepteur
TDR	récepteur différentiel de couple
CT	transformateur de contrôle
TRX	couple émetteur-récepteur

Introduction Générale

La première utilisation documentée des systèmes de résolveur avec émetteur et récepteur synchronisés était de 1914 à 1915 aux écluses du canal de Panama pour le transfert des serrures de porte, permettant le réglage du niveau d'eau. Ces premiers systèmes travaillent avec du courant continu. Ils utilisent un potentiomètre de précision spécial. Ce résolveur DC a été utilisé pour des applications simples, [37,40].

De 1918 à 1920, l'ingénieur Edward Hewlett a développé le résolveur General Electric à courant alternatif, fonctionnant sur le principe de l'induction, destiné au contrôle d'armes. Ce dernier est beaucoup plus précis que les systèmes à courant continu, [42].

General Electric a développé un système de contrôle à distance qui a été désigné par la marque SELSYN. Ce système de détection de rotation est utilisé dans de nombreuses applications à distance ; par exemple pour l'éclairage et le contrôle dans la salle de théâtres de Rockefeller Center à New York. Le système a été installé en 1922, [41].

Le bloc de SELSYN, est une adaptation de moteur à induction à rotor bobiné, permettant le contrôle d'un mouvement angulaire à distance avec une grande précision, en utilisant uniquement une connexion électrique. Les caractéristiques de ces unités sont brièvement décrites dans le présent mémoire, et les méthodes de calcul de leur performance sont offertes. Les applications typiques du dispositif SELSYN sont également données.

Le dispositif SELSYN est utilisé pour reproduire à distance un mouvement angulaire de commande électrique. Le mot SELSYN est une abréviation de l'expression "auto-synchrone" et indique l'utilisation normale de l'appareil.

Le fonctionnement du système est SELSYN lorsqu'il transmet le mouvement par des moyens électriques entre deux points qui ne peuvent être commodément reliés entre elles mécaniquement, [44].

OBJECTIF DU TRAVAIL

Le but de notre travail est d'établir un modèle mathématique d'un arbre électrique constitué de deux moteurs asynchrones à rotors bobinés identiques reliés électriquement.

Le système arbre électrique se compose d'un transmetteur et d'un récepteur, dont les rotors sont couplés électriquement et leurs stators sont alimentés par un réseau triphasé.

Selon le montage arbre électrique le transmetteur et le récepteur ne sont que deux machines doublement alimentées (MADA). Le transmetteur fonctionne en mode générateur et le récepteur doit fonctionner en régime moteur.

STRUCTURE DU MEMOIRE

Ce mémoire se compose de quatre chapitres essentiels :

Dans le premier chapitre, nous présentons une étude générale sur les synchro machines leur structure et leur domaine d'application.

Le deuxième chapitre présente une étude générale et la modélisation mathématique de la machine asynchrone à double alimentation suivies d'une simulation numérique dont le but de valider le modèle de la machine proposée.

Le troisième chapitre est consacré à l'assemblage électrique de deux MADA constituant l'arbre électrique. Nous présenterons également une étude théorique du couplage et sa modélisation mathématique.

Le quatrième chapitre est réservé aux résultats expérimentaux et à la simulation de l'arbre électrique.

Enfin, le travail est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE - I - Etat de l'art sur l'arbre électrique

I.1. INTRODUCTION

Les dispositifs électromécaniques à induction destinés au téléaffichage d'angle dans les systèmes de transmissions synchrones (en anglais: self synchronizing) à courant alternatif sont appelés SELSYNS ou synchronomachines.

Ce Dispositif est un type de transformateur électrique rotatif qui est utilisé en général par paire, et sert à transmettre un couple par l'intermédiaire d'une connexion électrique analogique, Ce système est très utilisé pour afficher des mesures, dans le domaine de l'aviation. De nombreux systèmes exigent une synchronisation de positions angulaires de deux arbres à des endroits différents par réception d'une indication d'un mouvement angulaire pour être reproduit à distance.

Le mot SELSYN est une abréviation de l'expression "auto-synchrone" et indique l'utilisation normale de l'appareil. Le fonctionnement du système est SELSYN lorsque le mouvement entre deux points ne peut être transmis qu'électriquement vu la complexité de la liaison mécanique, [35]

Dans son principe de fonctionnement, le capteur de rotation constitue d'un transformateur rotatif, dans lequel la rotation du rotor provoque une variation continue de l'inductance mutuelle entre les enroulements du transformateur, qui apparaît entre le premier enroulement monophasé (enroulement d'excitation) et les trois phases de l'enroulement secondaire (synchronisation d'enroulement).

Il existe un SELSYN composé de deux enroulements secondaires décalés d'un angle de 90° l'un de l'autre, appelé résolveur.

Les SELSYNS monophasés sont exploités pour la transmission d'un couple faible, la transmission des forts couples nécessite des SELSYNS triphasé, [6].

I.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN SELSYN

La figure (I-1) représente le branchement d'un SELSYN transmetteur et d'un SELSYN récepteur. Les enroulements d'excitation EE du transmetteur et du récepteur sont connectés à un réseau commun de tension AC et les extrémités des phases de même nom des enroulements de synchronisation ES sont électriquement couplées entre elles, [9].

Si les angles θ_{sr1} et θ_{sr2} des pôles des rotors du transmetteur et du récepteur, par rapport aux axes des phases de même nom sont identiques ($\theta_{sr1} = \theta_{sr2}$), les f.é.m. induites par le champ excitateur pulsatoire dans les phases de même nom des enroulements de synchronisation du transmetteur et du récepteur le sont également :

$$E_{st1} = E_{sr1} \quad E_{st2} = E_{sr2} \quad E_{st3} = E_{sr3}$$

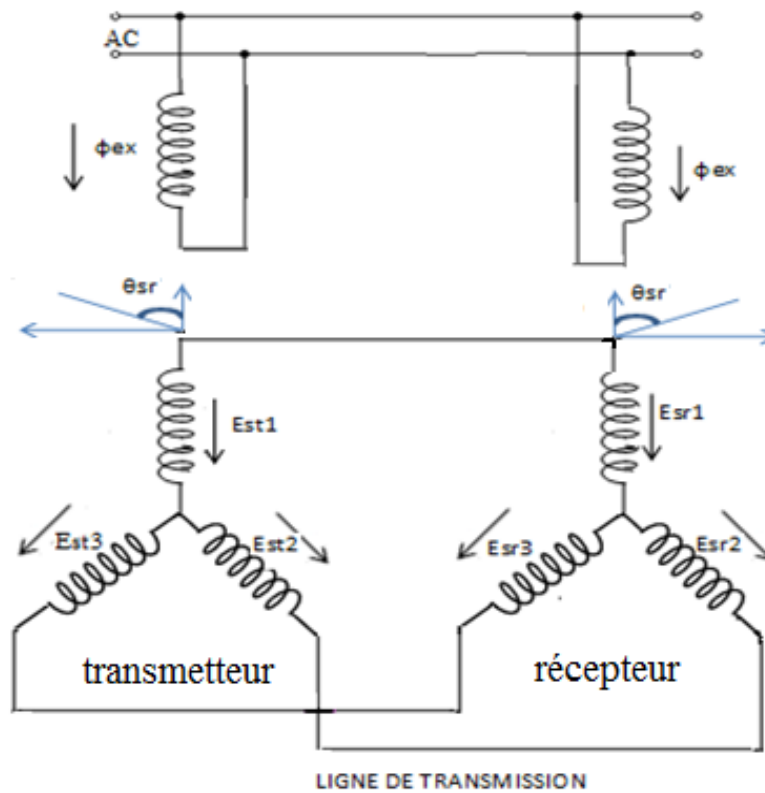


Figure (I.1) : Fonctionnement d'un SELSYN monophasé, [9].

Comme les f.é.m. induites dans les circuits constitués par les phases des enroulements couplés entre elles sont en opposition, aucun courant ne circule dans les enroulements de synchronisation et les couples électromagnétiques des SELSYNS sont nuls. Si la position angulaire des pôles des rotors par rapport aux axes des phases de même nom n'est pas la même et donc, l'écart angulaire $\Delta\theta = \theta_T - \theta_r$ n'est pas nul, les f.é.m. induites dans les phases de même nom ne sont plus égales ($E_{st1} \neq E_{sr1}$, etc.). Des courants commencent à circuler dans les enroulements de synchronisation, les courants des enroulements d'excitation deviennent différents et l'interaction entre les courants statoriques et rotoriques crée des couples électromagnétiques M_T et M_r qui s'exercent sur les rotors du transmetteur et du récepteur. En appliquant les règles bien connues sur les signes des f.é.m. et des forces électromagnétiques, il est facile d'établir que les couples exercés sur les rotors du transmetteur et du récepteur sont dirigés dans des sens opposés, de sorte que leur action tend à diminuer l'écart angulaire, [6,9].

Si le couple résistant sur l'arbre du récepteur est nul, le rotor de ce SELSYN prend exactement la même position que le rotor du transmetteur et l'écart angulaire entre les deux rotors $\Delta\theta = 0$.

Dans les montages pratiques, le rotor du SELSYN récepteur subit un certain couple de freinage dû au frottement dans les paliers et sur les bagues ainsi qu'au couple résistant du mécanisme accouplé à l'arbre du SELSYN (aiguille de l'appareil indicateur, contact glissant d'un potentiomètre, etc.). La transmission de l'angle se fait, donc toujours avec une certaine erreur $\Delta\theta$. Les imperfections d'usinage, la structure discrète de la couche active des armatures magnétiques, etc., sont aussi des causes d'erreurs. Selon leur classe de précision, les SELSYNS permettent le téléaffichage d'angle avec une erreur maximale admissible de $0,25^\circ$ à $2,5^\circ$, [31].

Quant aux SELSYNS sans balais, il existe deux types: les SELSYNS à pôles lisses à transformateur annulaire et les SELSYNS à pôles en forme des griffes. Dans la première modification, l'enroulement d'excitation monophasé *EE* placé sur le rotor est alimenté à l'aide d'un transformateur annulaire; sa constitution reste la même que celle des transformateurs rotatifs sans balais, [9].

Dans un des arrangements les plus simples, l'émetteur et le récepteur ont à la fois un seul enroulement de phase situé sur le rotor et un enroulement triphasé connecté en Y situé dans les encoches du stator. Les enroulements monophasés sont connectés en parallèle à une alimentation commune, et les deux enroulements triphasés sont reliés les uns aux autres. Si les rotors de l'émetteur et du récepteur sont SELSYN dans des positions telles que les FEM dans les enroulements de synchronisation sont égales en amplitude mais de sens opposé, il n'y aura pas de courant dans le circuit de synchronisation donc le couple est nul, [44].

Si le rotor de l'émetteur est en mouvement, la résultante des f.e.m n'est pas nulle et un courant électrique apparaît dans le circuit de synchronisation. Des deux machines, des couples seront générés à la suite de l'interaction entre les flux magnétiques dans les enroulements d'excitation avec les courants dans les enroulements de synchronisation. Au niveau du récepteur, ce couple tend à faire tourner le rotor d'un angle égal à l'angle de rotation de l'émetteur, Le couple a tendance à déplacer le rotor dans une position telle que les forces électromotrices induites lors la synchronisation est annulée.

Remarque

- Pour la simplicité de fabrication et la robustesse de ce type de dispositif le rotor doit porter l'enroulement primaire; par contre le secondaire est bobiné sur le stator;
- Bien que les enroulements du secondaire soient montés comme sur un moteur ou un alternateur triphasé, on ne peut pas parler de triphasé, car leurs sorties ne sont pas déphasées entre elle et ne diffèrent que par leur amplitude.

Le primaire est alimenté par une tension alternative sinusoïdale. Les amplitudes des tensions secondaires dépendent alors de la position angulaire du rotor, figure (I.2.a).

Lors du décalage du rotor du transmetteur, figure (I.2.b), les tensions de sorties varient, ce qui provoque le passage d'un courant dans la ligne de transmission créant ainsi un couple d'interaction dans le récepteur qui permet le réalignement des deux synchros, figure (I.2.c).

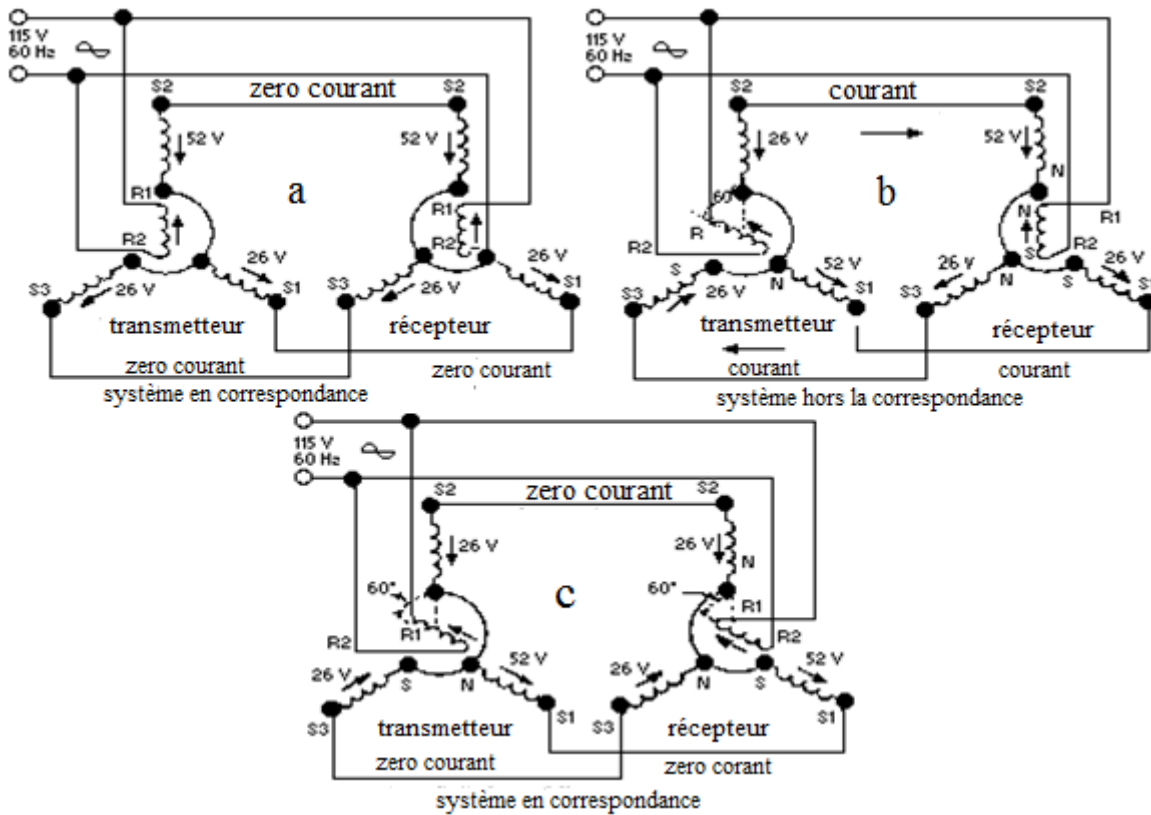


Figure (I.2. a, b, c) : Schéma de principe d'un arbre électrique, [40].

Les tensions aux bornes du stator triphasé représentées dans la figure (I.3) en fonction de la position du rotor sont alternatives.

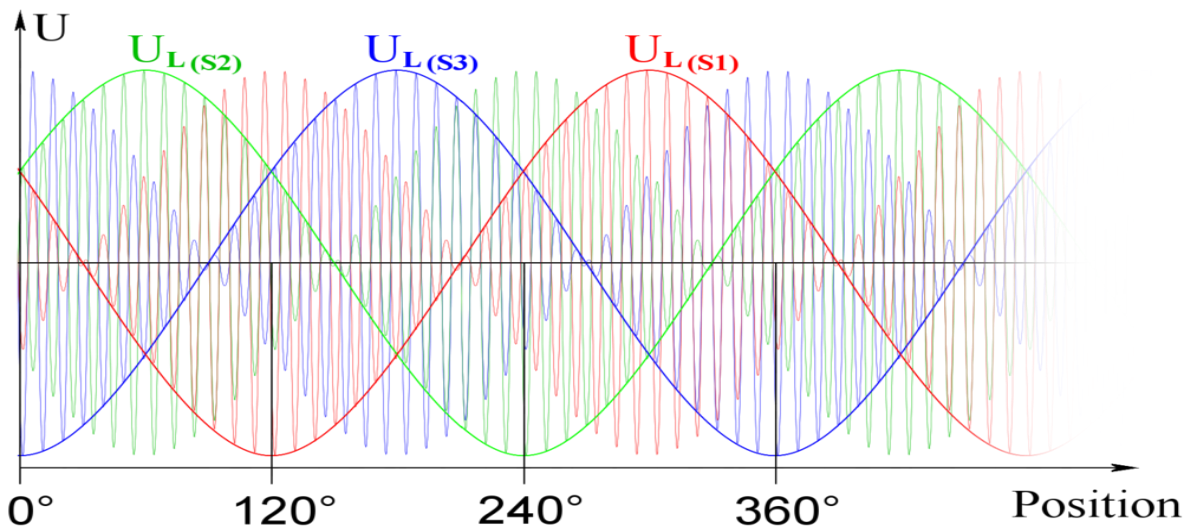


Figure (I.3) : Variation de tension induite dans le stator en fonction de la position du rotor, [42].

Le changement du sens de rotation dépend de la connexion entre les bobines du stator, figure (I.4.a.b).

La liaison des bornes S1, S3 et lors du mouvement du rotor transmetteur dans un sens entraine la rotation du rotor récepteur dans le sens opposé.

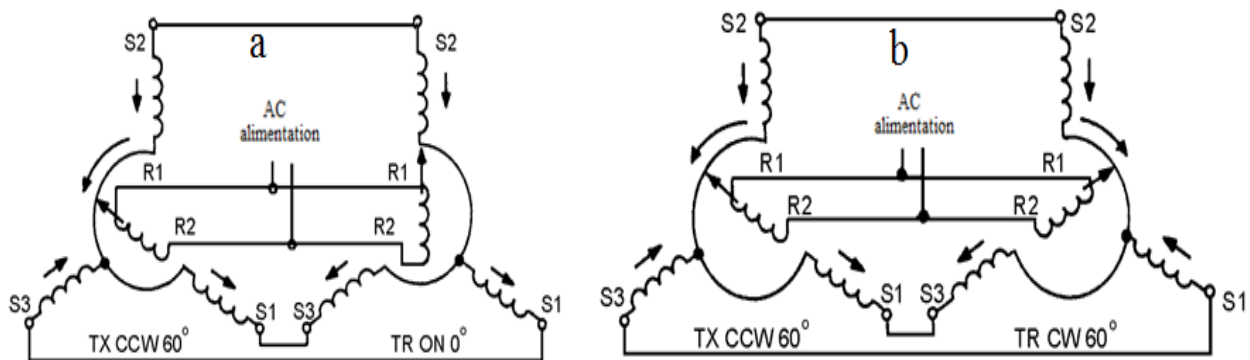


Figure (1-4. a, b) : Effet de l'inversion de la connexion entre la borne S1 de l'émetteur et la borne S3 du récepteur, [41,46].

I.3. CLASSIFICATION DES SYNCHRO MACHINES

Les Synchro machines travaillent en groupe, qui peuvent être constituées de deux ou plusieurs synchro interconnectées électriquement formant ainsi un système (synchro).

Il existe deux types de système synchro : Système de couple et système de contrôle.

Le système synchro classifié couple est destiné à l'entraînement de faibles charges.

Les systèmes de contrôle sont utilisés dans les systèmes de mouvement d'une grande charge comme direction d'une arme, antenne d'un radar, et lanceurs de missile, [42,49].

Les deux systèmes de synchro classé dans huit cas fonctionnel, quatre pour type couple est quatre pour le type contrôle. Chaque synchro porter un nom abrégé, et les autres types de synchro qui peuvent relies avec lui.

Généralement, les deux systèmes couple et contrôle synchro ne peuvent pas être interconnectés, [40].

I.3.1.CATÉGORIES FONCTIONNELLES DES SELSYN

I.3.1.1. TRANSMETTEUR DE COUPLE (TX)

Entrée: Rotor positionné mécaniquement ou manuellement par l'information à transmettre.

Sortie: La sortie électrique de stator identifie la position du rotor fournit à un récepteur de couple, émetteur différentiel de couple ou un récepteur différentiel de couple, [36].

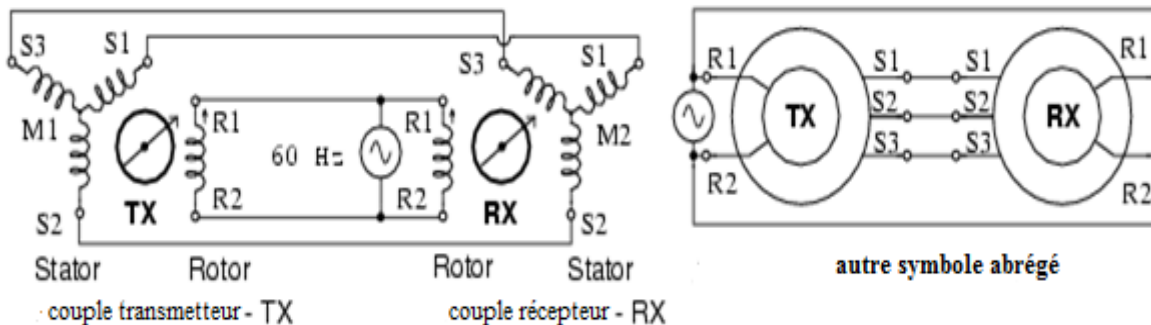


Figure (I.5) : Transmetteur de couple.

I.3.1.2. TRANSMETTEUR DE CONTRÔLE (CX)

Entrée: Idem TX.

Sortie: la Sortie électrique même que TX mais fournit à un émetteur différentiel de transformateur ou le contrôle de commande.

I.3.1.3. TRANSMETTEUR DIFFÉRENTIEL DE COUPLE (TDX)

Entrée: la sortie TX appliquée au stator; le rotor positionné selon les données de TX qui peuvent être modifiés.

Sortie : la sortie électrique du rotor (représentant un angle égal à la somme algébrique ou la différence de l'angle de la position du rotor et des données angulaires de TX fournit au couple récepteur, un autre TDX ou d'un récepteur différentiel de couple, [35,36].

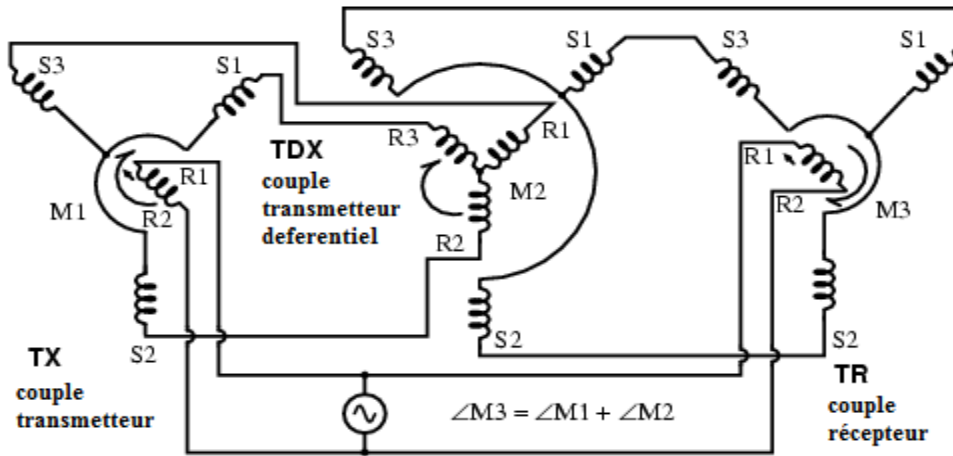


Figure (I.6) : Transmetteur différentiel de couple (TDX).

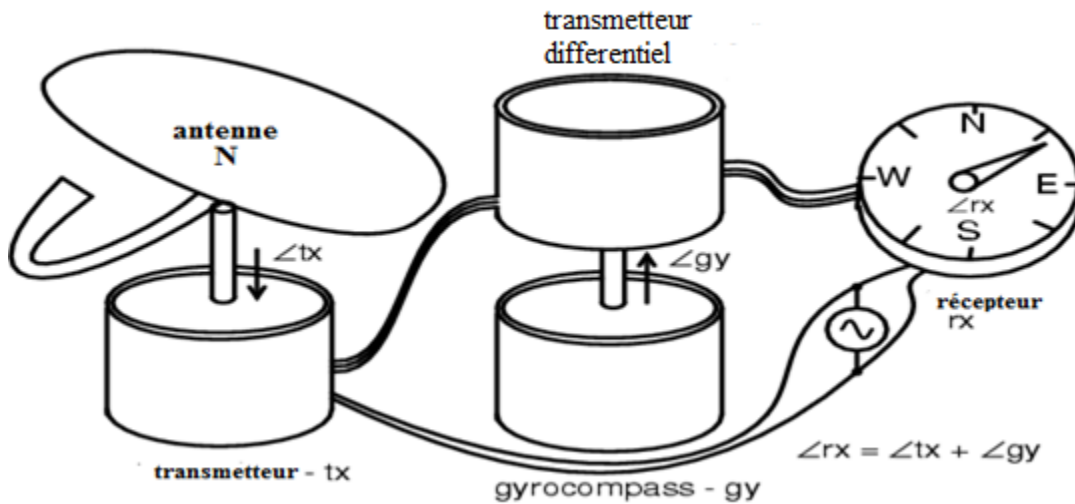


Figure (I.7) : Application d'un transmetteur différentiel de couple, (TDX).

Application transmetteur différentiel de couple : addition angulaire

$$\angle_{\text{antenne-N}} = \angle_{\text{antenne}} + \angle_{\text{gyro}}$$

$$\angle_{\text{rx}} = \angle_{\text{tx}} + \angle_{\text{gy}} \text{ prou}$$

Par exemple, la position de l'entête de bateau est $\angle 30^\circ$, la position de l'antenne par rapport à l'arc du bateau est : $\angle 0^\circ$, $\angle_{\text{antenne-N}}$ est:

$$\angle_{rx} = \angle_{tx} + \angle_{gy}$$

$$\angle 30^\circ = \angle 30^\circ + \angle 0^\circ$$

I.3.1.4. TRANSMETTEUR DIFFÉRENTIEL DE CONTRÔLE (CDX)

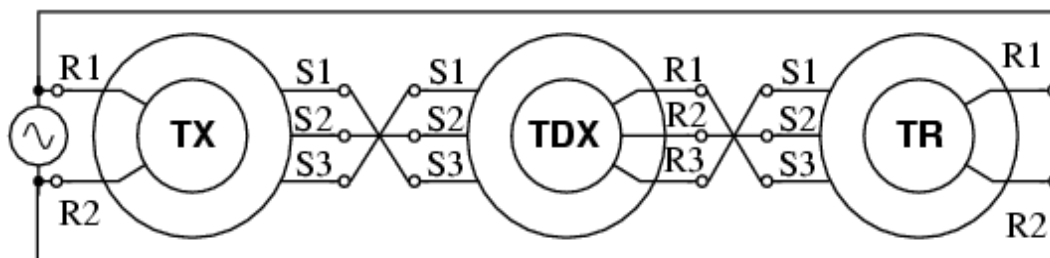
Entrée : Idem que TDX mais les données sont fournies par CX.

Sortie : Idem que TDX mais fournie seulement par un transformateur de commande ou d'un autre CDX, [36].

I.3.1.5. COUPLE RÉCEPTEUR (TR)

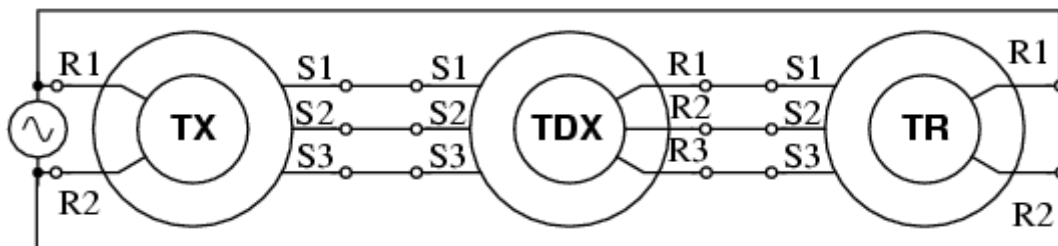
Entrée: données de position d'angles électriques de TX ou TDX fournit au stator.

Sortie: Rotor assume la position déterminée par l'entrée électrique fournie, [49].



$$\text{TDX addition: } \angle_{TX} + \angle_{TDX} = \angle_{TR}$$

Figure (I.8) : Couple récepteur (TDX) addition.



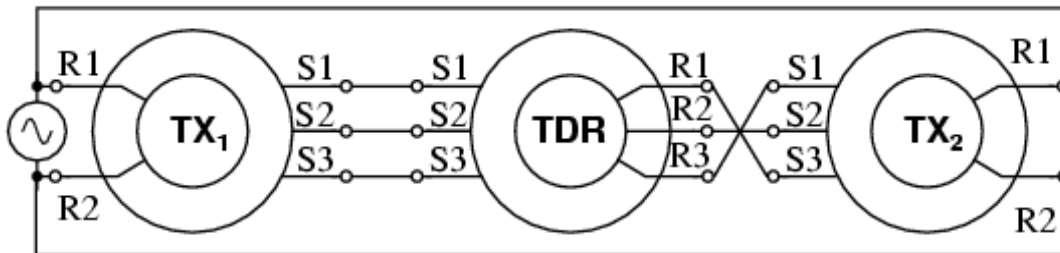
$$\text{TDX subtraction: } \angle_{TX} - \angle_{TDX} = \angle_{TR}$$

Figure (I.9) : Couple récepteur (TDX) subtraction.

I.3.1.6. RÉCEPTEUR DIFFÉRENTIEL DE COUPLE (TDR)

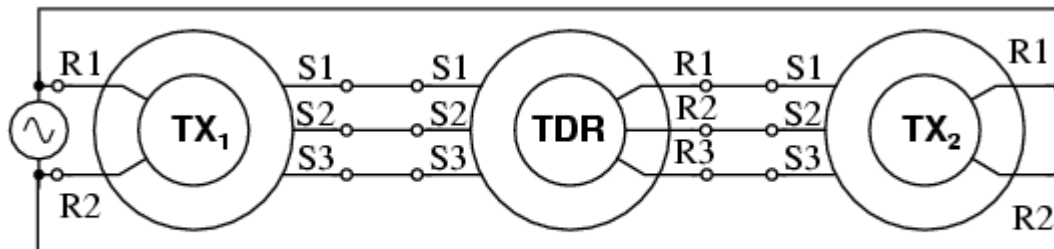
Entrée: Données électriques fournies à partir de deux TX, TDX de deux ou d'un TX et une TDX

Sortie: Rotor assume la position égale à la somme algébrique ou différence de deux entrées angulaires, [36].



TDR addition: $\angle TDR = \angle TX_1 + \angle TX_2$

Figure (I.10) : Récepteur différentiel de couple (TDR) addition.



TDR subtraction: $\angle TDR = \angle TX_1 - \angle TX_2$

Figure (I.11) : Récepteur différentiel de couple (TDR) subtraction.

I.3.1.7. TRANSFORMATEUR DE CONTRÔLE (CT)

Entrée: à l'entrée électrique donnée de CX ou CDX appliquées au stator. Rotor positionné mécaniquement ou manuellement.

Sortie: La sortie électrique de rotor (proportionnelle au sinus de la différence entre la position angulaire du rotor et de l'angle électrique d'entrée, [42].

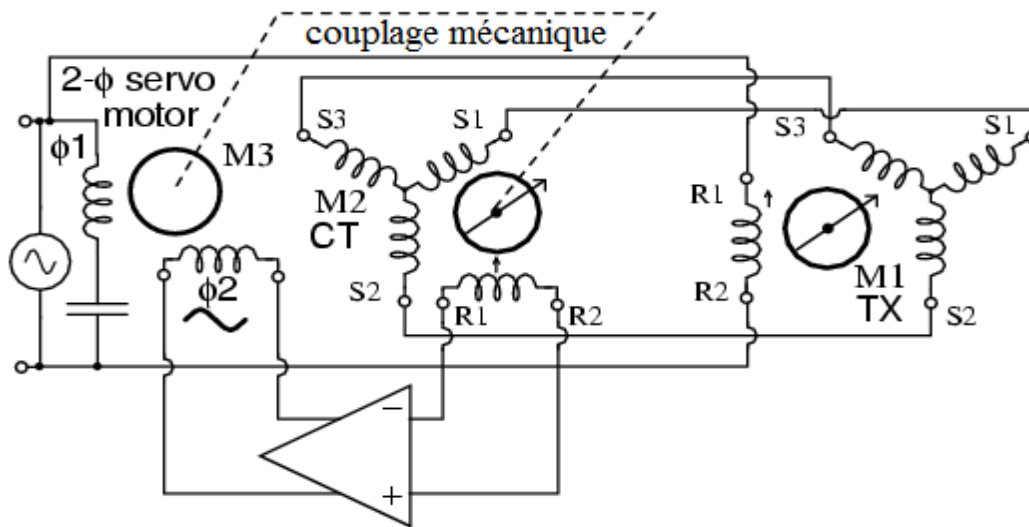


Figure (I.12) : Transformateur de contrôle (CT).

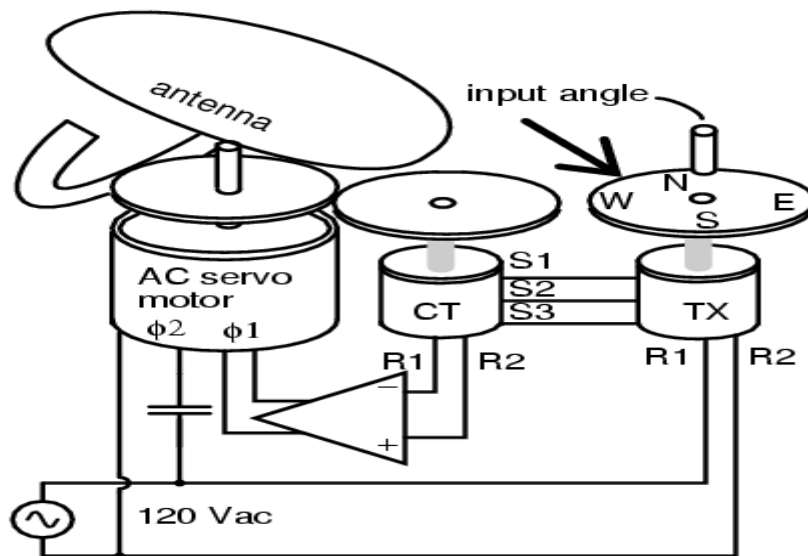


Figure (I.13) : Application transformateur de contrôle (CT).

I.3.1.8. COUPLE ÉMETTEUR-RÉCEPTEUR (TRX)

Ce synchro a été conçu comme un récepteur de couple, mais il peut aussi être utilisé comme un émetteur ou récepteur.

Entrée: Selon l'application, même que TX.

Sortie: Selon l'application, même que TX ou TR, [36].

I.3.2. SYSTÈMES DE RÉVOLVÉUR

Un révolvéur, Figure (I.14), a deux enroulements de stator placés à 90° l'un de l'autre, et un seul enroulement au rotor alimenté par un courant alternatif. Un révolvéur est utilisé pour la conversion polaire rectangulaire. Une entrée d'angle de l'arbre du rotor produit des coordonnées rectangulaires sin et cos sur des tensions proportionnelles aux enroulements du stator.

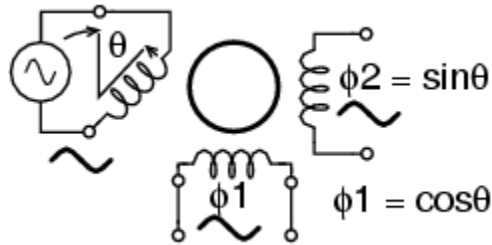


Figure (I.14) : Révolvéur convertir un angle de l'arbre à un angle sinus et cosinus.

I.4. CONSTRUCTION DE SYNCHRO

Suivant leur constitution, on distingue les SELSYNS à balais et les SELSYNS sans balais. Dans un SELSYN à balais, le rotor porte sur ses pôles saillants un enroulement d'excitation EE alimenté depuis un réseau à courant alternatif par l'intermédiaire de balais et de bagues. Dans les encoches de l'armature du stator sont logés trois enroulements répartis de synchronisation décalés dans l'espace d'un angle électrique $2\pi/3$ (système triphasé) et constitué comme l'enroulement triphasé d'une machine asynchrone classique. Les armatures du stator et du rotor sont constituées par un empilage de tôles magnétiques isolées, [9].

I.4.1. ROTOR

Le rotor est constitué d'un noyau en forme d'haltère souvent d'un seul enroulement, ou avec deux enroulements reliés en série. Dans le noyau du rotor, un arbre est pressé sur lequel les bagues collectrices sont placées pour alimenter le rotor, [41].

Le rotor en forme de I est plus préféré car il permet un positionnement plus précis, et pour une synchro différentiel, on utilise le rotor de forme Y.

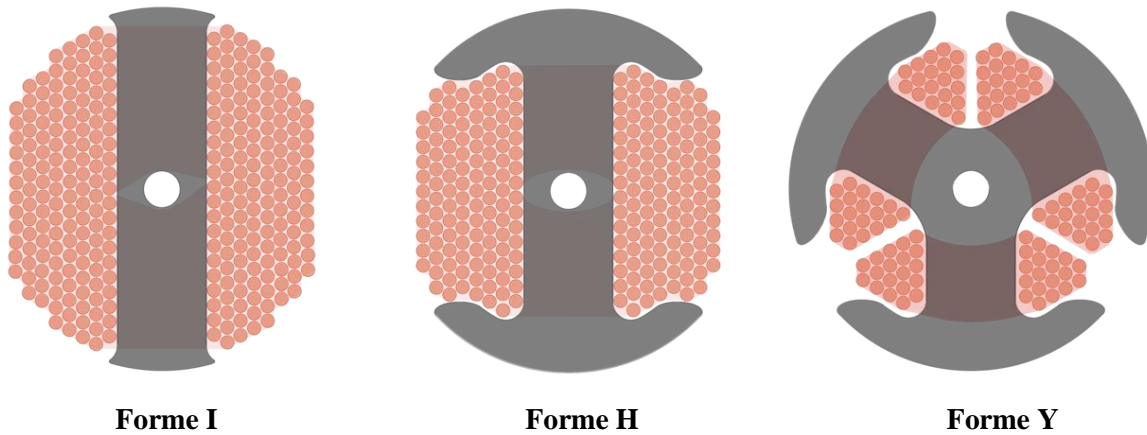


Figure (I.15) : Sections des différents types de rotors de résolveur.

I – forme (avec un seul enroulement, principalement pour les codeurs de résolveur).

H- forme (avec un seul enroulement, généralement pour trois téléavertisseurs).

Y- forme (pour trois enroulements, habituellement pour résolveur différentiel).

I.4.2. STATOR

Le stator d'un SELSYN est habituellement, un corps cylindrique. Il comprend également un noyau feuilleté, et trois bobines monté en triangle ou en étoile.

L'enroulement du stator est bobiné et réalisé en plusieurs paires de pôles, [41]. Un SELSYN à nombre des paires de pôles important est donc appliqué lorsque le stator peut obtenir de très grandes dimensions géométriques,



Figure (I.16) : SELSYN selon l'affectation des bornes (ici pour l'opération de 400 Hz).

I.5. CIRCUIT INTERNE DE DIVERS TYPES DE SYNCHRO

Les rotors et les stators du divers synchro indiqué sur figure (1-17) :

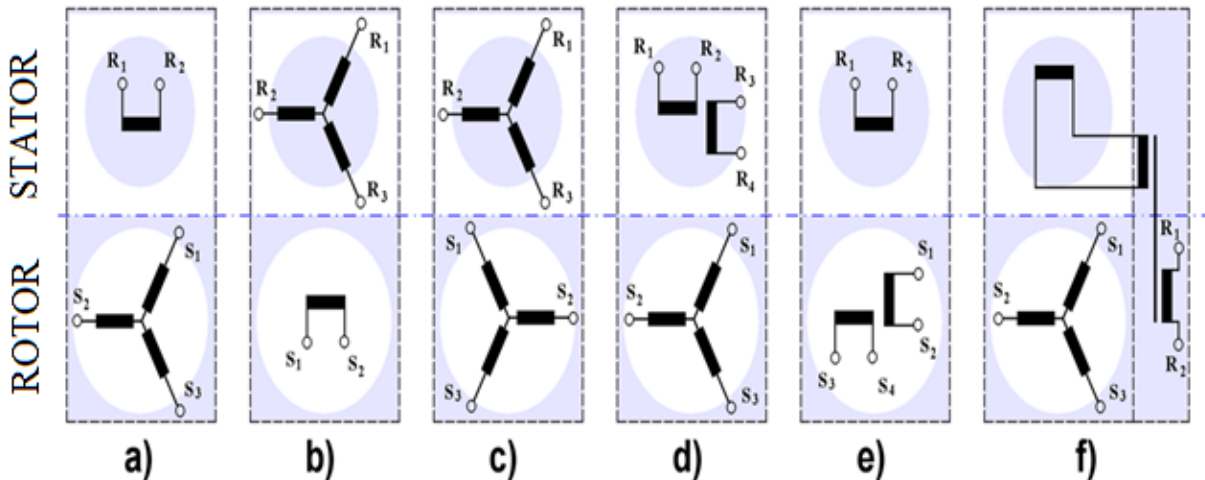


Figure (I.17. a b c d e f) : Circuit interne de divers types de synchro.

Avec :

- a) résolveur simple (pôle interne);
- b) SELSYN simple ;
- c) résolveur différentiel;
- d) et e) résolveur;
- f) le broyage sans contact résolveur.

I.6. UTILISATION DES SYSTÈMES DE SYNCHRO MACHINE

Généralement les SELSYN sont constituées de deux machines identiques de même puissance, elles sont utilisées dans le contrôle, l'orientation des servomécanismes et utilisées aussi pour :

- Le téléaffichage pour transmettre et recevoir à distance des informations visuelles ;
- la télécommande pour transmettre et traiter à distance des informations électriques pour réaliser des asservissements, [40] ;
- Indicateurs numériques dans les systèmes d'orientation des antennes et d'armes automatiques, [41] ;
- Afficheurs numériques pour commutateur à haute tension dans les postes entièrement automatisés ;

- les industries du papier, du textile, du bobinage et de l'extrusion de plastique, [29] ;
- La Synchronisation des disques rotatifs et de ponts élévateurs, [38] ;
- La synchronisation de la rotation de plusieurs radars, [17] ;
- rémunération du vent pour la suppression des interférences dans les radars, [43] ;
- La Transmission des positions d'aviron dans les bateaux, comme un affichage de l'indicateur d'angle de barre, comme un lien entre le volant et le mécanisme de direction, [41] ;
- le télégraphe de moteur entre la salle des machines d'un navire et le pont (avant que les systèmes de contrôle des navires soient entièrement automatisés). Le télégraphe est composé de deux systèmes de détection de rotation indépendants dont les mains tournés sur le même axe. Ici il y avait un suivi de la seconde main par l'opérateur de la machine manuellement, [39] ;
- Séparer un câble de compteur de vitesse flexible pour de plus grandes distances de transmission (dite arbre électrique) ;
- L'indicateur magnétique de radio (RMI) contient trois résolveurs, un pour conduire la rose des vents, et les deux pour chacune des mains d'un récepteur de radionavigation ;
- Commander une source d'ions située dans un accélérateur de particules électrostatique à un potentiel élevé ;
- Dans des situations moins extrêmes, le transducteur de résolution a été largement remplacé par des codeurs optiques, magnétiques ou codeurs incrémentaux, le récepteur est synchronisé par des moteurs pas à pas et les lecteurs de balais ou d'autres écrans numériques, [41].

I.7. DEUX MOTEURS RÉCEPTEURS CONNECTÉS AVEC UN SEUL TRANSMETTEUR GÉNÉRATEUR

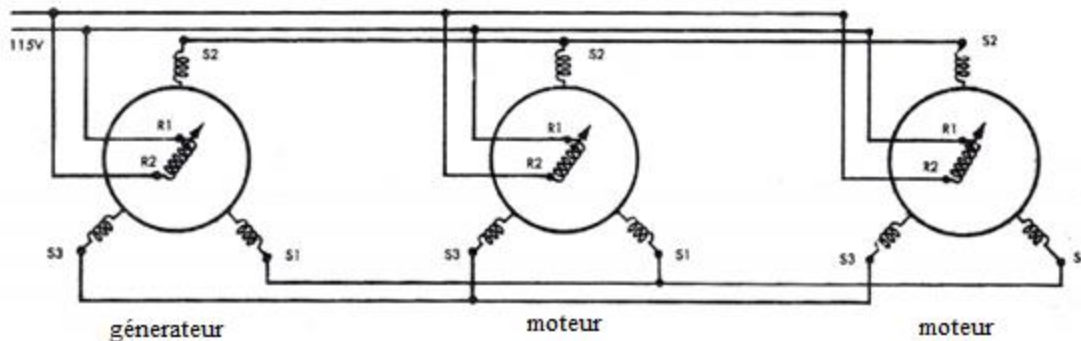


Figure (I.18) : Deux moteurs connectés avec un générateur, [46].

I.8. FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE DANS LES SYSTÈMES DE LIAISON SYNCHRONE

I.8.1. MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTÉE À ROTOR BOBINÉ

On entend par système de liaison synchrone, une connexion électrique de deux ou plusieurs machines telle avec laquelle le déplacement synchrone du transmetteur et des récepteurs est assuré.

Les plus répandus sont les systèmes de liaison synchrone à induction avec utilisation des machines triphasées ou monophasées fonctionnant en régime double alimenté.

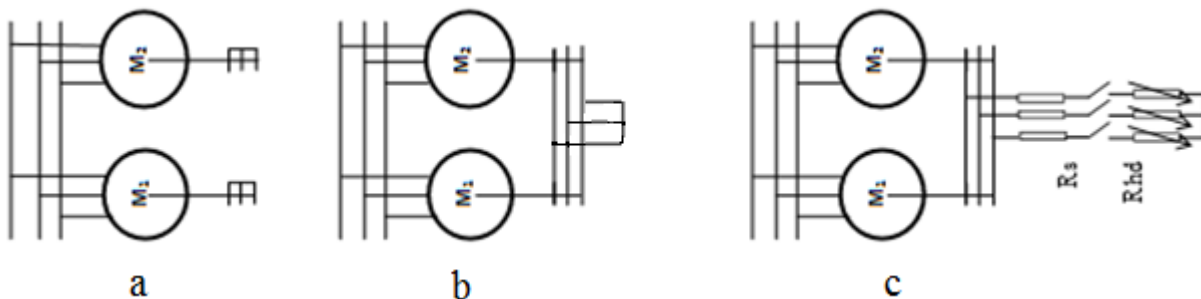
On cherche à obtenir le fonctionnement synchronisé de deux machines de puissance importante mécaniquement indépendante, comme si elles se trouvaient sur le même arbre pour l'entraînement de deux trains mobiles d'un appareil rigide, [06].

Les deux machines M1 et M2 identiques, figure(I.19.a), sont alimentées par le même réseau. Les charges peuvent être différentes, [21], la vitesse des deux moteurs (transmetteur et récepteur avec coupure de la ligne de transmission) peut être déterminée par la formule suivant, [31] :

$$\omega_1 = \omega_s (1 - g_1) \quad (\text{I-1})$$

$$\omega_2 = \omega_s (1 - g_2) \quad (\text{I-2})$$

Même si l'on court-circuite les rotors, le courant secondaire est nul et les deux moteurs sont immobiles, figure (I.19.b)



Figure(I.19) : Etape de branchement d'un arbre électrique.

Par contre, si l'on insère des résistances R_s aux bornes de la ligne de transmission, ce qui provoque un glissement suffisant, une synchronisation, peut être obtenue et le courant du rotor du transmetteur traversant le rotor de récepteur.

Pour obtenir une bonne synchronisation, au détriment du rendement, il faut un glissement d'au moins de 20 à 30% (figure.I.19.c), [31,44].

Dans ces conditions, durant leur fonctionnement en moteur, chaque rotor possède deux champs rotoriques, Pour la machine M1, l'un tourne au synchronisme :

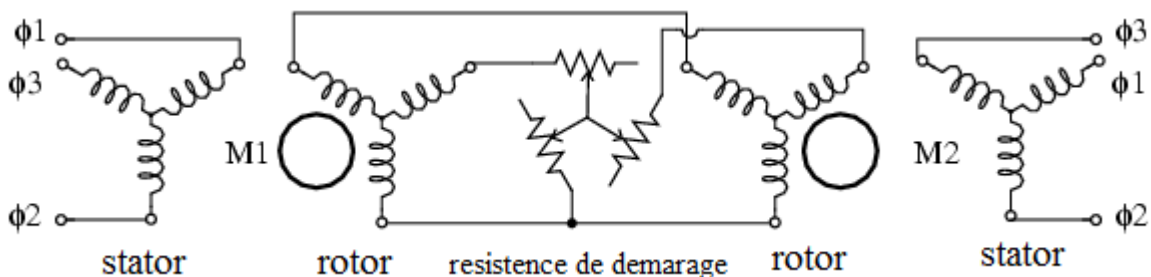
$$\omega_1 + \omega_{r1} = \omega_s(1 - g_1) + g_1 \cdot \omega_s = \omega_s \quad (\text{I-3})$$

Par interaction avec le champ du stator un couple apparait, le couple de la machine M2 est sensiblement opposé au précédent, les f.é.m. apparentes au secondaire étant mises en opposition, la machine M2 tourne à une vitesse différente du synchronisme.

$$\omega_1 + \omega_{r2} = \omega_s(1 - g_1) + g_2 \cdot \omega_s = \omega_s + (g_1 - g_2) \cdot \omega_s \quad (\text{I-4})$$

En créant un couple de synchronisation par interaction avec le champ du stator, les couples asynchrones et de synchronisation s'ajoutent dans la machine la plus lente et se retranchent dans la plus rapide.

Ce dispositif de synchronisation ne fonctionne bien que si les glissements g_1 est g_2 sont très proches, $g_1=g_2$; par contre, si g_1 est différent de g_2 , le couple moyen de synchronisation est nul, dans chaque machine les deux couples instantanés s'ajoutent puis se retranchent. Lorsque $g_1=g_2$, les deux f.é.m. apparentes au secondaire sont au synchronisme. Un courant de circulation synchronisant existe aussi, tant qu'elles ne sont pas en phase. Les rotors initiaux dès la mise sous tension du stator et avant le couplage du rhéostat de démarrage, Ce dispositif n'est utilisé que quand la synchronisation est presque naturelle, [21].



Figure(I.20) : Démarrage moteur à rotor bobiné avec insertion des résistances communes, [35].

I.8.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ARBRE ÉLECTRIQUE TRIPHASÉ

La figure(I.21) montre le système triphasé de liaison synchrone le plus simple qui représente la connexion de deux machines asynchrones triphasées I et II. Les enroulements primaires de ces machines sont connectés au réseau tandis que les enroulements secondaires sont opposés l'un à l'autre, pour des positions identiques dans l'espace des rotors des machines; au niveau des rotors les F.E.M. secondaires s'équilibrent, les courants dans le circuit secondaire du système sont absents et les machines se trouvent au repos.

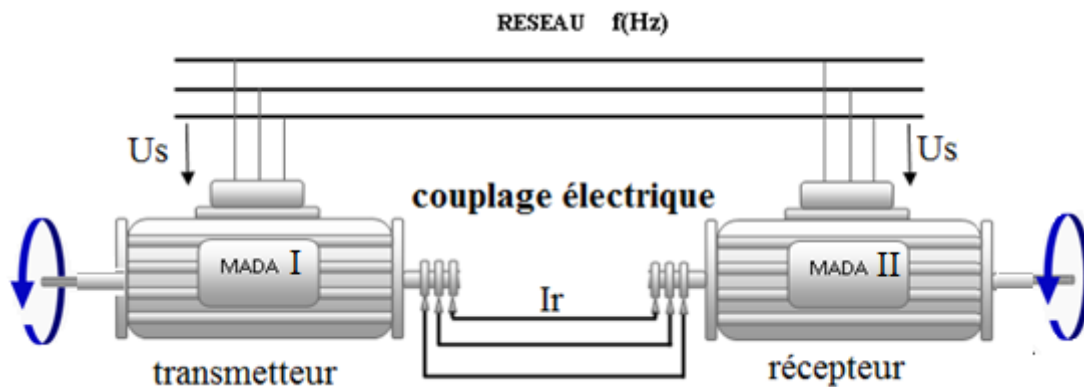


Figure (I.21) : Arbre électrique triphasé avec deux MADA.

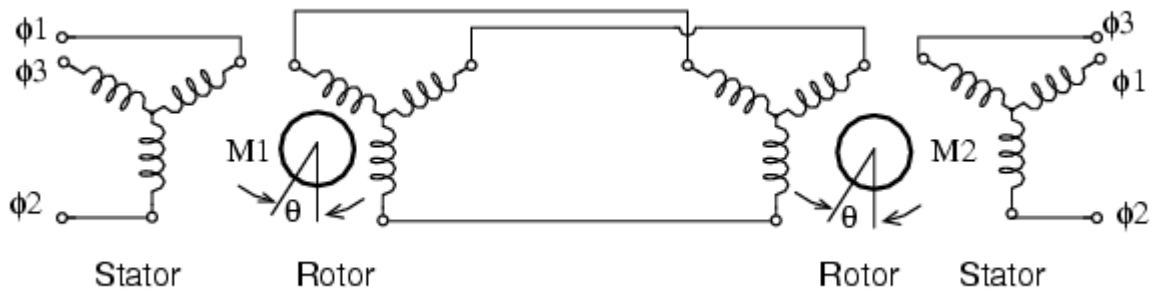


Figure (I.22) : SELSYN sans les résistances de démarrage, [35, 36].

Le décalage de l'un des rotors par rapport à l'autre d'un angle θ figure (I.21) les F.E.M. secondaires du transmetteur sont décalées d'un angle électrique θ par rapport aux F.E.M. secondaires du récepteur.

Admettons, par exemple, que le rotor de la machine I soit décalé d'un angle θ dans le sens de rotation du champ magnétique par rapport au rotor de la machine II. La F.E.M. E_{2I} de la première machine sera en retard de l'angle θ sur la F.E.M. E_{2II} de la deuxième machine. Grâce au déphasage des F.E.M. E_{2I} et E_{2II} ,

une F.E.M. résultante prend naissance dans le circuit secondaire, et crée un courant égalisateur déterminé par la relation suivant:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2I} + \dot{E}_{2II} e^{e^{\pm j\theta}}}{Z_{2I} + Z_{2II}} \quad (I - 5)$$

Où Z_{2I} et Z_{2II} sont les impédances secondaires des machines I et II.

Comme on le voit sur la figure (I.23) le courant I_2 a une composante en phase avec E_{2II} . Pour cette raison, dans la machine il y a apparition d'un couple moteur agissant dans le sens de rotation du champ. En même temps, dans la machine I, le courant I_2 a une composante qui se trouve en opposition de phase avec la F.E.M. de cette machine E_{2I} . Pour cette raison, dans la machine I un couple de freinage est créé.

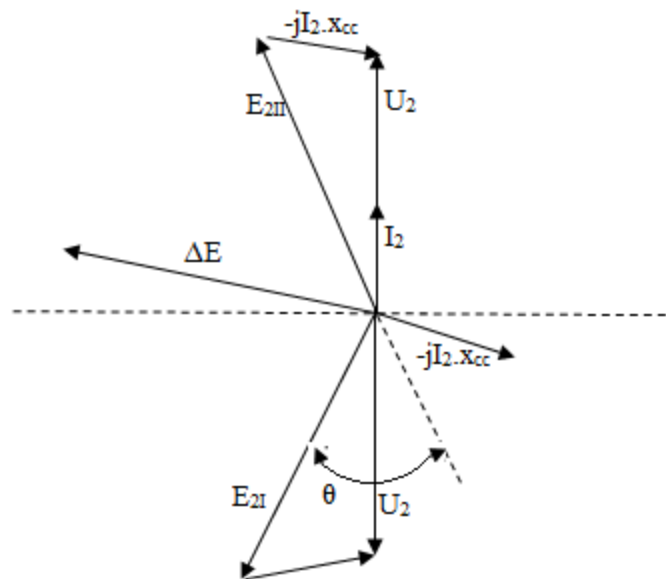


Figure (I.23) : Diagramme vectoriel d'un arbre électrique, [6].

Les couples créés par le courant égalisateur tendent donc à réduire à zéro l'angle de décalage des rotors, θ appelé angle de désadaptation. Il en résulte que lorsque le rotor de la machine I (transmetteur) est tourné par un organe de commande, le rotor de la machine II tournera de la même façon; c'est-à-dire la transmission de l'angle à distance sera réalisée.

La rotation du rotor de la machine II dans des conditions réelles a toujours lieu lorsqu'il existe un certain angle de désadaptation θ par rapport à la machine I, car dans le cas contraire, le couple moteur C n'est pas créé. Cet angle dépend de la machine II ainsi que de la relation entre le couple C et l'angle θ .

Évidemment, il est désirable que le couple C augmente de façon suffisamment brusque avec l'accroissement de l'angle θ , [6,9].

I.8.3. MACHINES QUELCONQUES ARBRE ÉLECTRIQUE SYNCHRO DE PUISSANCE

L'objectif est de synchroniser deux machines quelconques, électrique ou thermique, identique et de puissances importantes, mais en laissant au groupe la possibilité de la variation de vitesse.

La synchronisation est obtenue à l'aide de deux machines identiques MADA₁ et MADA₂, qui est des machines asynchrones à induction à rotors bobinés fonctionnant en « synchros de puissance » Figure (I.24), c'est une autre utilisation de ces machines asynchrones.

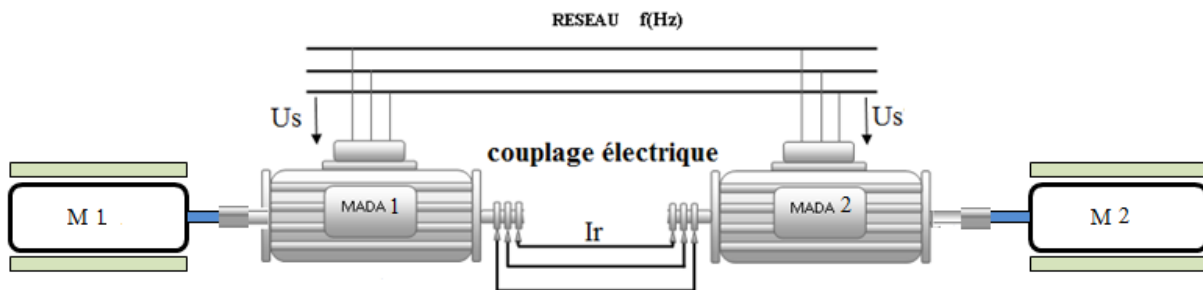


Figure (I.24) : Arbre électrique synchros de puissance, [31].

Dans la plupart des applications, la puissance des synchro est sensiblement le quart de la puissance des machines à synchroniser.

Les machines M1 et M2 étant à l'arrêt, on alimente les stators des deux machines MADA1 et MADA2, d'où deux champs tournants à la vitesse angulaire électrique ω_s , les champs sont identiques et admettons-les directs, les f.é.m. apparentes induites aux secondaires des deux machines sont directes, identiques, de pulsation ω_s , de même amplitude maximale, mais de phases quelconques, les rotors en étant initialement dans une position arbitraire. Comme précédemment, le couple de synchronisation place les deux rotors en phase géométrique avec des $P.\theta_0$ identique. Les f.é.m. secondaires étant en opposition, aucun courant ne circule alors au secondaire. Les deux machines, bien qu'alimentées, restent à l'arrêt. Toute réaction provoquée de M1(ou de M2) dans un sens ou dans l'autre entraîne instantanément la rotation de M2(ou M1), les deux rotors de MADA1 et MADA2 étant synchronisés.

Il en est de même lorsque les machines M1 et M2 sont en rotation, la MADA1 et MADA2 assurent le synchronisme. C'est le dispositif que l'on appelle « l'arbre électrique » les deux rotors de MADA1 et

MADA2 étant couplés électriquement. Même si les charges des machines M1 et M2 sont momentanément différentes, la synchronisation reste efficace, [31].

I.9. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de faire un tour d'histoire sur les différentes installations utilisant le transfert de couple via une connexion électrique.

CHAPITRE-II-

ETUDE ET MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTEE MADA

II.1. INTRODUCTION

Le moteur asynchrone est le type le plus répandu des moteurs électriques, Durant ces dernières années, le contrôle des machines asynchrones à fréquence variable a considérablement progressé.

L'une des solutions associant les convertisseurs statiques et les machines pour obtenir des vitesses variables est la machine asynchrone double alimentée (MADA) où le stator est connecté au réseau (50Hz) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une vue générale sur la machine asynchrone ainsi que la MADA, exposer le concept du champ tournant dans les machines électriques à courant alternatif, les différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées, tout en citant ses avantages et ses inconvénients.

Nous allons décrire à travers les concepts physiques de base régissant le fonctionnement de tout type de machine électrique le principe de fonctionnement de la MADA. Nous expliquerons comment les grandeurs de contrôle accessibles au rotor peuvent contrôler le couple électromagnétique, la vitesse et le facteur de puissance lorsque la MADA fonctionne en mode moteur (hypo et hypersynchrone) et en mode générateur (hypo et hypersynchrone). Nous aborderons à la fin de ce chapitre le transfert de puissance dans la machine dans ces deux modes de fonctionnement.

A travers ce chapitre, nous essayons d'aborder la modélisation de la MADA. Ceci a pour objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement. Pour cela, on propose une approche de modélisation de ce genre de machine. Les résultats de cette modélisation seront réalisés par simulation numérique, où ils seront exploités dans les systèmes à arbre électrique.

II.2. RAPPEL SUR LES CHAMPS TOURNANTS

Ces champs sont à la base du principe de fonctionnement des machines électriques tournantes à courant alternatif.

II.2.1. THEOREME DE LEBLANC

La décomposition mathématique en deux champs tournants en sens inverse et aussi une décomposition physique. Une aiguille aimantée, suspendue sans torsion en O, ne tourne pas. Par contre, dès qu'on la lance dans un sens ou dans l'autre, elle se met en rotation permanente dans le sens où on l'a lancée.

Un champ pulsant \vec{B} , alternatif de direction fixe, de pulsation W , est décomposable en deux champs \vec{b}_1 et \vec{b}_2 tournants en sens inverse l'un de l'autre à vitesse angulaire W , [31].

Un bobinage alimenté par un courant $i(t) = I\sqrt{2} \cos wt$ crée un champ

$$\vec{B} = \cos wt \cdot \vec{u}_1 = \vec{u} \cdot B \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{B} = \vec{u}_1 \cdot e^{j\omega t} \frac{B}{2} + \vec{u}_1 \cdot e^{-j\omega t} \frac{B}{2} = \vec{b}_1 + \vec{b}_2 \quad (\text{II.2})$$

Qui est équivalent à la somme de deux champs de norme constante $B/2$ qui tournent en sens inverse à des vitesses W et $(-W)$.

Ce théorème permet de comprendre comment obtenir un champ tournant au moyen d'un seul bobinage.

II.2.2. ELABORATION D'UN CHAMP TOURNANT PAR DEUX CHAMPS PULSANTS

$$\vec{B} = \vec{u}_1 \cdot e^{j\omega t} B = \vec{u}_1 \cdot B (\cos \omega t + j \sin \omega t)$$

$$\vec{B} = \vec{u}_1 \cdot B \cos \omega t + \vec{u}_1 \cdot j \cdot B \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (\text{II.3})$$

$$\vec{B} = \vec{u}_1 \cdot B \cos \omega t + \vec{u}_2 \cdot B \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

Ce champ tournant direct sera produit par deux bobines perpendiculaires dans l'espace, d'axes 1 et 2 parcourues par des courants déphasés de $\frac{\pi}{2}$ dans le temps. En appliquant le théorème de Leblanc aux

deux bobines, on trouve que la résultante est un vecteur d'amplitude 2 fois $\frac{B}{2}$ tournant dans le sens direct. Les vecteurs tournants dans le sens inverse ont une somme nulle

II.2.3. PROPRIÉTÉ DES CHAMPS ELLIPTIQUES

Dès que l'amplitude n'est plus la même sur les deux axes, que les vecteurs unitaires ou les déphasages soient différents, le champ résultant n'est plus circulaire mais elliptique.

$$\begin{aligned}\bar{B} &= \bar{u}_1 \cdot B_1 \cos wt + \bar{u}_2 \cdot B_2 \cos\left(wt - \frac{\pi}{2}\right) = \bar{u}_1 \cdot B_1 \cos wt + \bar{u}_1 \cdot jB_2 \cos\left(wt - \frac{\pi}{2}\right) \\ \bar{B} &= \bar{u}_1 \cdot B_1 \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} + \bar{u}_1 \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} B_2 \frac{e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)} + e^{-j\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}}{2} \\ \bar{B} &= \bar{u}_1 \frac{B_1 + B_2}{2} e^{j\omega t} + \bar{u}_1 \frac{B_1 - B_2}{2} e^{-j\omega t}\end{aligned}\quad (\text{II.4})$$

Un champ elliptique peut être considéré comme la somme de deux champs circulaires d'amplitudes différents, tournant en sens inverse.

La somme en un point d'un nombre quelconque de champs sinusoïdaux de même pulsation dans un même plan est un champ elliptique.

Dans les machines, un champ inverse cause de pertes supplémentaires.

II.2.4.THEOREME DE FERRARIS, [23]

Trois bobines, dont les axes convergent en O, décalées régulièrement dans l'espace de $\frac{2\pi}{3}$, parcourues par des courants alternatifs sinusoïdaux de pulsation ω déphasés entre eux dans le temps de $\frac{2\pi}{3}$, en donnant chacune un champ alternatif de direction fixe d'amplitude maximale B, donnent au point O, par composition, un champ tournant unique de vitesse angulaire ω et d'amplitude $\frac{3B}{2}$

$$\bar{B} = \bar{u}_1 \cdot B \cos wt + \bar{u}_2 \cdot B \cos\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) + \bar{u}_3 \cdot B \cos\left(wt - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.5})$$

$$\bar{u}_3 = \bar{u}_2 e^{j\frac{2\pi}{3}} = \bar{u}_1 e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (\text{II.6})$$

$$\bar{B} = \bar{u}_1 \cdot B \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} + \bar{u}_1 \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} B \frac{e^{j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)} + e^{-j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}}{2} + \bar{u}_1 \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} B \frac{e^{j\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)} + e^{-j\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)}}{2}$$

$$\bar{B} = \bar{u}_1 \frac{3}{2} B e^{j\omega t} \quad (\text{II.7})$$

$$\bar{u}_1 \frac{B}{2} B e^{j\omega t} (1 + e^{j\frac{4\pi}{3}} + e^{j\frac{8\pi}{3}}) = 0 \quad (\text{II.8})$$

Le champ aura la direction de l'axe d'une bobine lorsque le courant sera maximal dans cette bobine.

Trois champs pulsants, déphasé dans le temps de $\frac{2\pi}{3}$, donnés par des bobines dont les axes convergent en O et décalées entre elles dans l'espace de $\frac{2\pi}{3}$, donnent un champ tournant unique.

Théorème de Ferraris généralisé pour $n \geq 3$

n bobines décalés régulièrement de $\frac{2\pi}{n}$ dans l'espace, parcourues par des courants de pulsation ω déphasé entre eux de $\frac{2\pi}{n}$ dans le temps et donnant chacun un champ pulsant d'amplitude maximale B , créent un champ tournant unique d'amplitude $n \frac{B}{2}$ tournant à la vitesse angulaire ω .

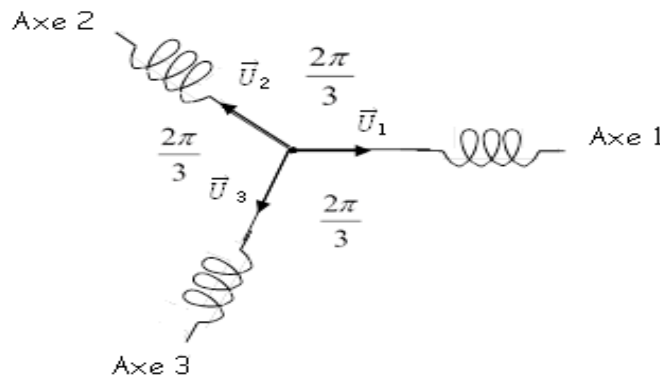


Figure (II.1) : Trois bobines décalées par 120° , [31].

II.2.5. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La structure électrique d'une machine asynchrone triphasée est constituée :

- au stator d'une armature triphasée fixe ;
- au rotor, qu'il soit bobiné ou a cage, d'une armature triphasée mobile dont les enroulements de phase sont en court-circuit, [17].

II.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA

Pour le fonctionnement de la machine en régime établi, il est nécessaire que les vecteurs magnétomotrices (F_{mm}) du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de la F_{mm} de l'enroulement statorique tourne dans l'espace à une vitesse angulaire ω_{os} ,

et que le rotor tourne à la vitesse ω_r ; par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur Fmm de l'enroulement statorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse :

$$\omega_g = \omega_{os} - \omega_r = \omega_{os} - \omega_{os} (1 - g) = \omega_{os} \cdot g \quad (\text{II.9})$$

si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse du synchronisme, les sens de rotation sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle du synchronisme les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur Fmm par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de :

$$\omega_{os} \cdot g = 2 \cdot \pi \cdot f_r$$

$$f_r = f_s \cdot g \quad (\text{II.10})$$

Dans les machines synchrones l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence $f_r = 0$, [21 ,23].

II.4. REGIMES DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA

Dans le moteur à double alimentation, l'enroulement rotorique est couplé à une source de tension de fréquence variable. En fonction du type de régulation de fréquence, on distingue deux régimes de fonctionnement : synchrone et asynchrone.

II.4.1. REGIME DE FONCTIONNEMENT SYNCHRONE

Pour ce régime, la fréquence du glissement est donnée indépendamment de la vitesse angulaire. Alors, à chaque signal de commande correspond une fréquence déterminée f_r et une vitesse de fonctionnement ω_r qui ne dépend pas de la charge. En faisant varier la fréquence f_r , on peut varier la vitesse. En régime synchrone, le moteur à double alimentation fonctionne comme une machine synchrone. Dans ce régime, on peut réguler la vitesse. Cependant il est difficile de maintenir la stabilité du régime pour les variations rapides de vitesses, de charges brusques, etc....

II.4.2. REGIME DE FONCTIONNEMENT ASYNCHRONE

Pour ce régime de fonctionnement, la fréquence de la tension du réseau appliquée à l'enroulement rotorique de la machine à travers un système de régulation est toujours maintenue égale à la fréquence du glissement $f_s \cdot g$. Dans ce cas, on ne régule que la valeur et la phase de la tension du réseau.

Le moteur à double alimentation fonctionne toujours comme un moteur asynchrone même pour $\omega_r = \omega_{os}$, i.e : le glissement du moteur varie avec la variation de la charge.

Dans la MADA, il y a toujours deux sources de même fréquence dans les enroulements rotoriques:

- La f.e.m du rotor (f.e.m de court-circuit) ;
- La tension externe d'alimentation du côté rotorique U_r .

II.5. CLASSIFICATION DES MACHINES ASYNCHRONES DOUBLE ALIMENTEE

Dans cette section on présentera une classification de diverses machines à double alimentation.

La machine à double alimentation peut être classée par les catégories suivantes :

- Machine double alimentée standard ;
- Machine double alimentée en cascade,
- Machine double alimentée en cascade à une seule armature ;
- Machine double alimentée sans collecteur ;
- Machine double alimentée à reluctance.

En général ces machines double alimentées peuvent être utilisées dans des applications de fréquence constante et de vitesse variable.

II.6.VARIATION DE LA VITESSE DE ROTATION

L'exploitation industrielle de la machine asynchrone nécessite la mise en place des moyens de variation dans le but d'entraîner la charge à vitesse variable. Cette application est fondée sur une bonne connaissance du modèle de la machine et de l'expression du couple électromagnétique dépendant des paramètres électriques. Les méthodes de variation de la vitesse de rotation en agissant sur le rotor ou le stator sont, [11] :

II.6.1. COTE STATOR

II.6.1.1. CHANGEMENT DE LA FREQUENCE DU RESEAU

Quelque soit la charge, la vitesse d'un moteur dépend fortement de la fréquence du réseau d'alimentation. On distingue deux méthodes d'action sur la fréquence :

Variation de la fréquence du réseau.

Variation de fréquence à V/f_s constant.

II.6.1.2. CHANGEMENT DE LA TENSION APPLIQUEE AU MOTEUR

Sachant que le couple est proportionnel au carré de la tension, ceci implique une variation de la vitesse. Cette dernière par variation de la tension primaire à une importance secondaire car elle ne permet pas d'assurer de réglage dans de larges plages et puis elle n'est pas économique.

II.6.1.3. PAR MODIFICATION DU NOMBRE DE PAIRE DE POLES

On utilise généralement la relation w/p , on modifie le nombre de paires de pôles (p) par commutation sans modifier l'implantation des bobinages.

II.6.2. COTE ROTOR

II.6.2.1. VARIATION DE LA VITESSE PAR VARIATION DE LA RESISTANCE

L'insertion d'un rhéostat au circuit nous permet de varier la résistance rotorique, ceci entraîne une variation de la vitesse. Cette variation est possible lorsqu'il s'agit de moteurs à bagues.

II.6.2.2. LES CASCADES

Avec un moteur à rotor bobiné, on a la possibilité de faire varier le glissement en modifiant la résistance rotorique, si on utilise pour cela un rhéostat, on dissipe en pure perte l'énergie active et on abaisse d'une façon inacceptable le rendement. Pour que le procédé soit viable, il faut faire appel à un circuit actif qui permet la récupération de l'énergie électrique correspondante en la réinjectant dans le réseau. C'est sur ce principe qu'était réalisé :

- Sur le rotor du moteur asynchrone à rotor bobiné par l'intermédiaire d'un moteur à courant continu (récupération mécanique), figure (II, 4) ;
- Au réseau à l'aide d'un convertisseur de fréquence (cascade hypo synchrone), figure (II, 6).

II.7. APPLICATION DE LA MADA

Les machines à bagues à courant alternatif ont été réalisées dans le passé en diverses variantes, dont quelques-unes ont débouché sur des applications industrielles importantes.

Parmi les nombreuses utilisations de la machine, celle qui nous intéresse particulièrement est la machine à rotor bobinée.

La machine à double alimentation s'apparente fortement, du point de vue technologique, à la machine asynchrone à rotor bobiné classique, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, car ce dernier est toujours d'actualité. Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de la vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique ou encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau. Ces machines sont donc classiques, et ne posent pas de problèmes particuliers de réalisation, [8].

La machine à double alimentation est une machine asynchrone à rotor bobiné possédant des enroulements triphasés au stator et au rotor.

Cette machine a fait l'objet de fonctionnement suivant :

- La première fonctionne en alternateur ;
- La seconde fonctionne en moteur, et elle est alimentée par un seul convertisseur ;
- La troisième fonctionne aussi en moteur mais elle est alimentée par deux convertisseurs.

II.8. STRUCTURE DE LA MADA

Selon la conception du rotor, plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation ont été envisagés. On va décrire les plus utilisés dans l'industrie.

II.8.1. MADA A ROTOR BOBINE

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoiles dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants, [03], figure (II ,2).

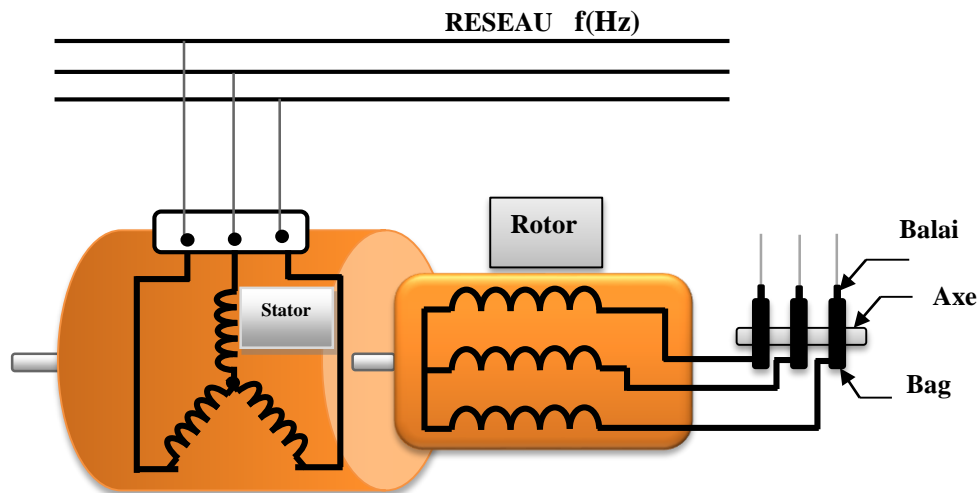


Figure (II.2) : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné, [03].

II.8.2. MADA SANS BALAIS

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écurueil.

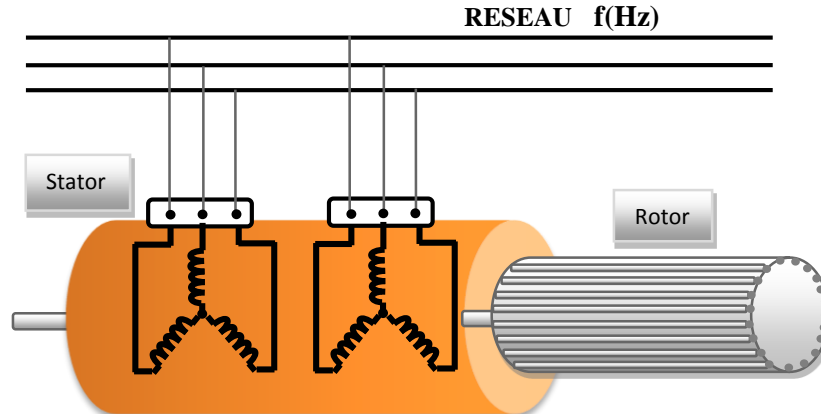


Figure (II-3) : Structure de la MADA sans balais, [24].

Il existe d'autres types comme la MADA à réluctance qui utilise le principe d'un moteur à réluctance variable ainsi que la MADA "tandem" qui possède un rotor à cage et deux enroulements statoriques, l'un est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

II.8.3. MADA EN CASCADE

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un système à double alimentation côté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées, [05].

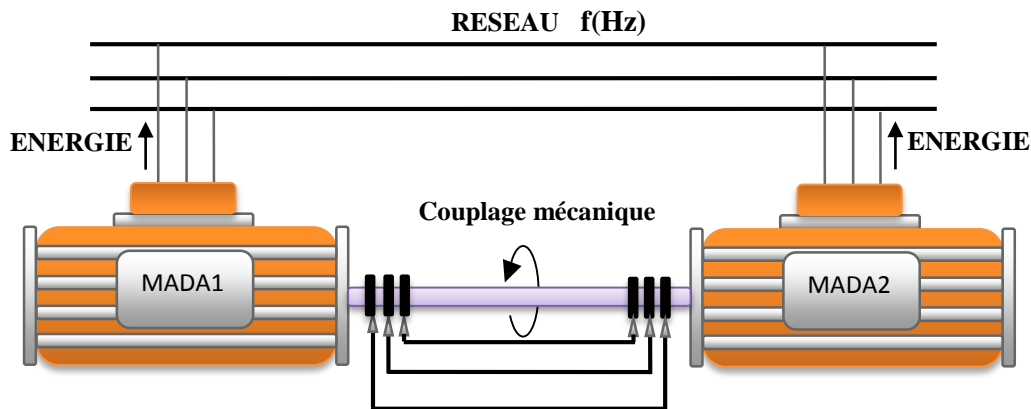


Figure (II-4) : Structure en cascade de deux machines asynchrones, [10].

II.9. MODE DE FONCTIONNEMENT

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut être en générateur qu'au-dessus de cette vitesse, dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine, [13].

II.9.1. FONCTIONNEMENT EN MODE MOTEUR HYPO SYNCHRONE

Dans ce mode de fonctionnement, le stator est connecté au réseau et la puissance de glissement transite par le rotor pour la réinjecter au réseau, (Figure II-5). Cette puissance est dissipée en pertes Joule dans le cas des machines asynchrones à cage, [18]. Le champ tournant créé par les enroulements rotoriques Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone, est dans le même sens que le champ statorique, [05].

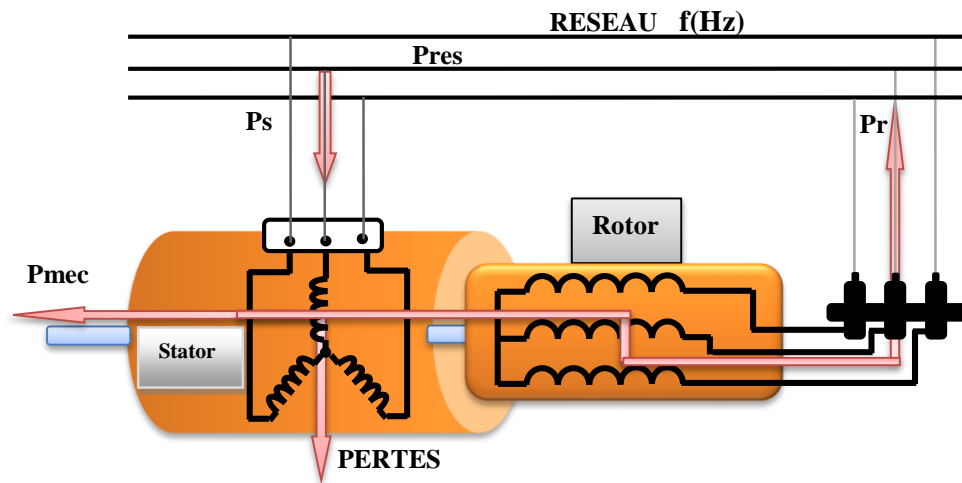


Figure (II-5) : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone, [22].

II.9.2. FONCTIONNEMENT EN MODE MOTEUR HYPER SYNCHRONE

Dans ce mode de fonctionnement, le stator est alimenté par le réseau et la puissance de glissement est fournie par le réseau au rotor via les convertisseurs statiques afin de la convertir en puissance mécanique, (Figure II-6). Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est en opposition de phase avec celui du stator, [03] car la vitesse devient plus grande que la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

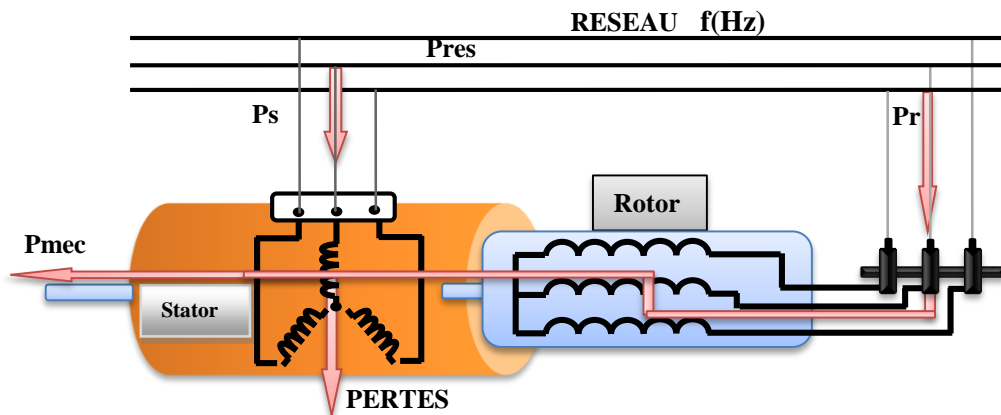


Figure (II-6) : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone, [10,13].

II.9.3. FONCTIONNEMENT EN MODE GENERATRICE HYPO SYNCHRONE

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator tout comme la puissance de glissement qui est aussi fournie par le stator, Figure (II-7). La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

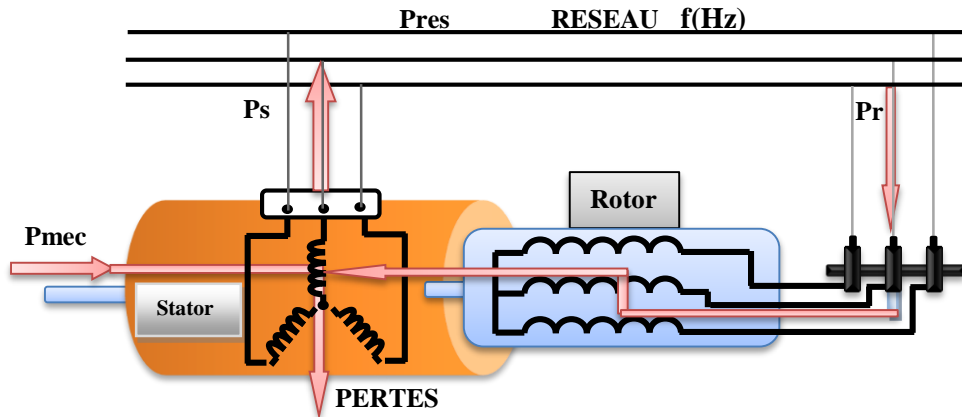


Figure (II-7) : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone, [13].

II.9.4. FONCTIONNEMENT EN MODE GENERATRICE HYPER SYNCHRONE

Dans ce mode de fonctionnement, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près, comme le montre la Figure (II-8), la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réinjectée par le rotor.

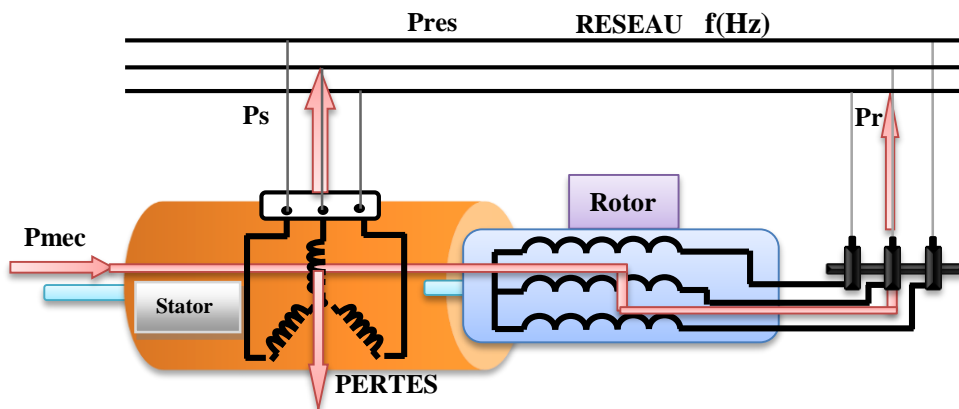


Figure (II-8) : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone, [10].

II.10. APERÇU SUR LES CONFIGURATIONS DE LA MADA A ROTOR BOBINE

Comme toutes les autres machines électriques à courant alternatif, la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui

répond à un critère choisi. Dans cette partie du chapitre, on va citer les configurations les plus utilisées, selon la littérature, pour chaque mode de fonctionnement, [12].

II.10.1. CONFIGURATION POUR APPLICATION MOTEUR

La variation de la vitesse des machines synchrones et asynchrones classiques nécessitent la variation de la fréquence des courants statoriques par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur. Généralement, ces deux convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% [03], en agissant sur l'alimentation des enroulements rotoriques.

II.10.1.1. STATOR ALIMENTE PAR LE RESEAU, ROTOR ALIMENTE PAR UN ONDULEUR

Cette classe est dite MADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés au réseau triphasé fixe, tandis que le rotor est relié à son propre onduleur.

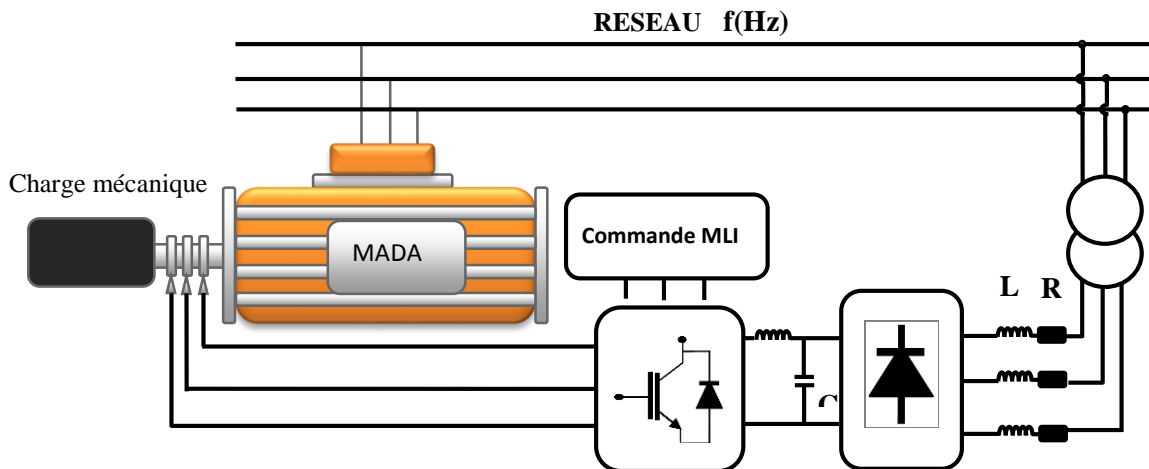


Figure (II-9) : Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur, [24].

Ce mode d'alimentation n'est pas adapté au fonctionnement à faibles fréquences rotoriques mais le fait de relier le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un onduleur permet de dimensionner le convertisseur côté rotor à 30% de la puissance mécanique maximale, [07].

II.10.1.2. stator relie au reseau, rotor alimente par un cycloconvertisseur

Le remplacement de l'association redresseur-onduleur par un cycloconvertisseur autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau.

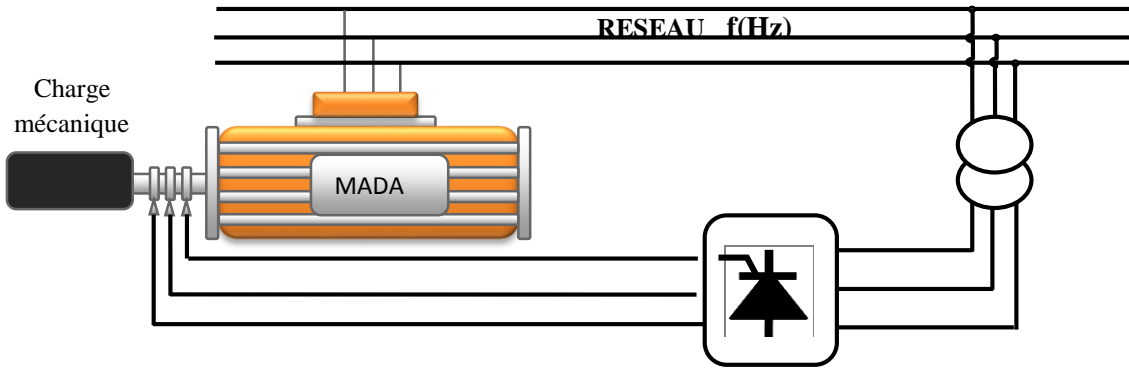


Figure (II-10) : Schéma de la MADA dont le rotor alimenté par un cyclo convertisseur, [08].

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés, [06].

II.10.1.3. MADA ALIMENTE PAR DEUX CONVERTISSEURS INDEPENDANTS

Dans cette structure, on trouve plusieurs configurations possibles. Le stator et le rotor sont alimentés soit par :

- Deux cycloconvertisseurs ;
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs ;
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.

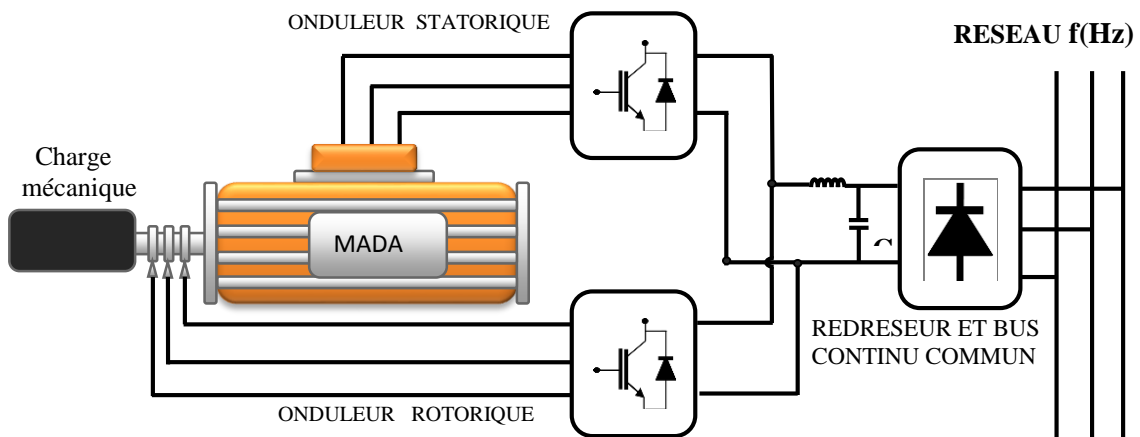


Figure (II-11) : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs, [10,13].

Grâce à ce type d'alimentation, la MADA possède quatre degrés de libertés ce qui rend son contrôle très souple. On peut donc réguler la vitesse (ou le couple), le flux (statorique, rotorique et d'entrefer), le glissement et le facteur de puissance, [14].

II.10.2. CONFIGURATION POUR APPLICATION GENERATRICE

Dans cette partie, on s'intéresse à la MADA à rotor bobiné et son utilisation pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne.

II.10.2. 1. MADA A ENERGIE ROTORIQUE DISSIPÉE

Le stator est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur. L'ajout d'un hacheur à base d'IGBT permet de varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur, [15].

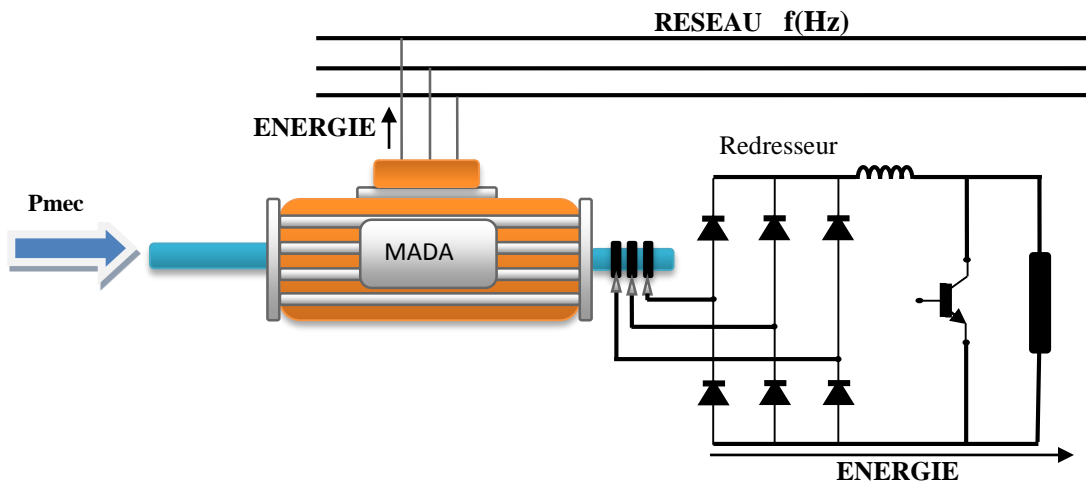


Figure (II-12) : MADA à énergie rotorique dissipée, [10 ,24].

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R ce qui nuit au rendement du système.

II.10.2.2. STRUCTURE DE KRAMER

Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau.

Ce système permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance ; de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau). Le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme (hyper synchrone).

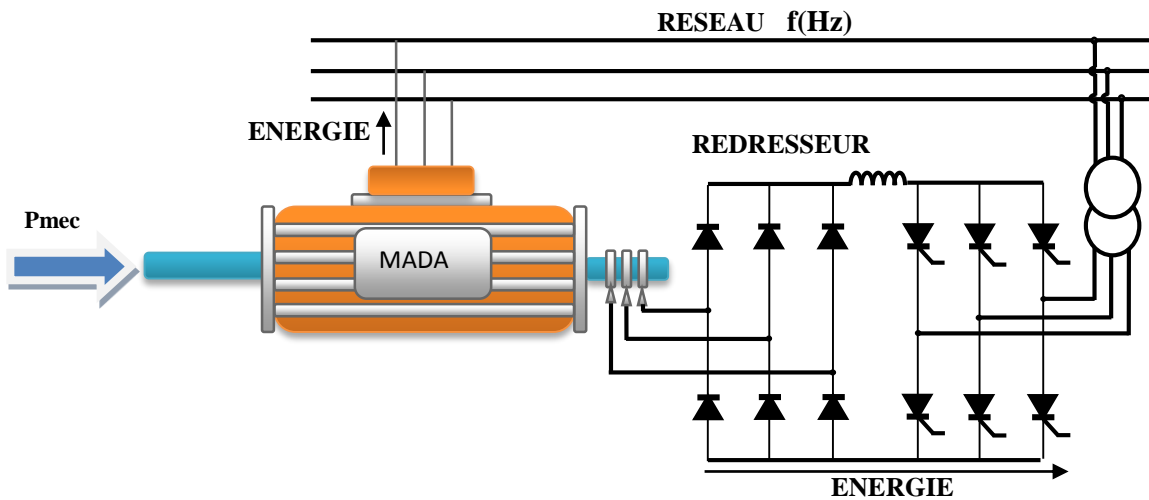


Figure (II-13) : MADA à structure de Kramer, [18].

II.10.2. 3. STRUCTURE DE SCHERBIUS AVEC CYCLO CONVERTISSEUR

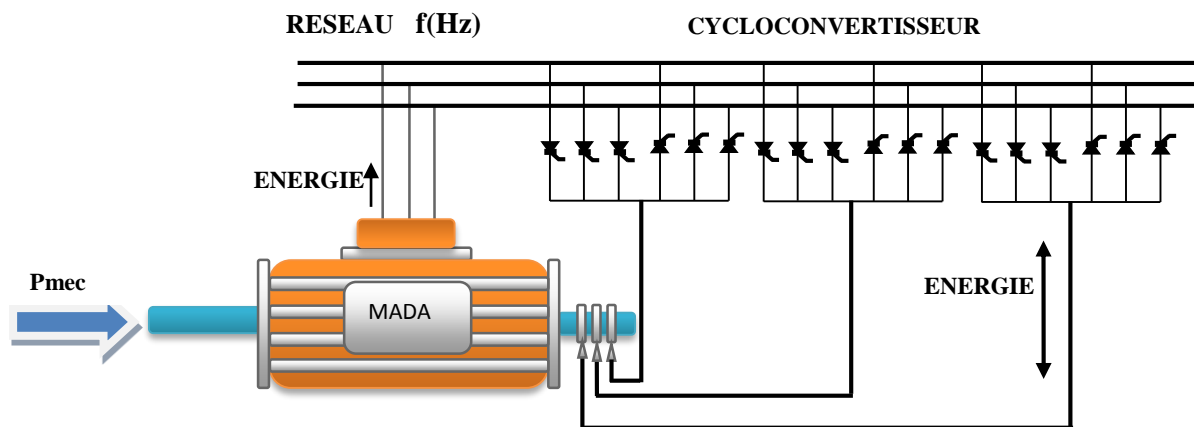


Figure (II-14) : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur, [10,18].

Pour rendre la structure précédente réversible, en échange d'énergie entre le rotor et le réseau, on remplace le redresseur et l'onduleur par un cycloconvertisseur. L'utilisation de cyclo convertisseur permet d'avoir une plage de la vitesse de rotation variant de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, [03].

L'inconvénient de cette structure est la génération des perturbations harmoniques importantes qui diminue le facteur de puissance du dispositif.

II.10.2.4. STRUCTURE DE SCHERBIUS AVEC CONVERTISSEURS MLI

Le progrès de l'électronique de puissance permet d'avoir des interrupteurs qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture comme les IGBT's avec une fréquence de commutation importante. L'utilisation des convertisseurs à base de ce type d'interrupteurs permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage, [03,10]

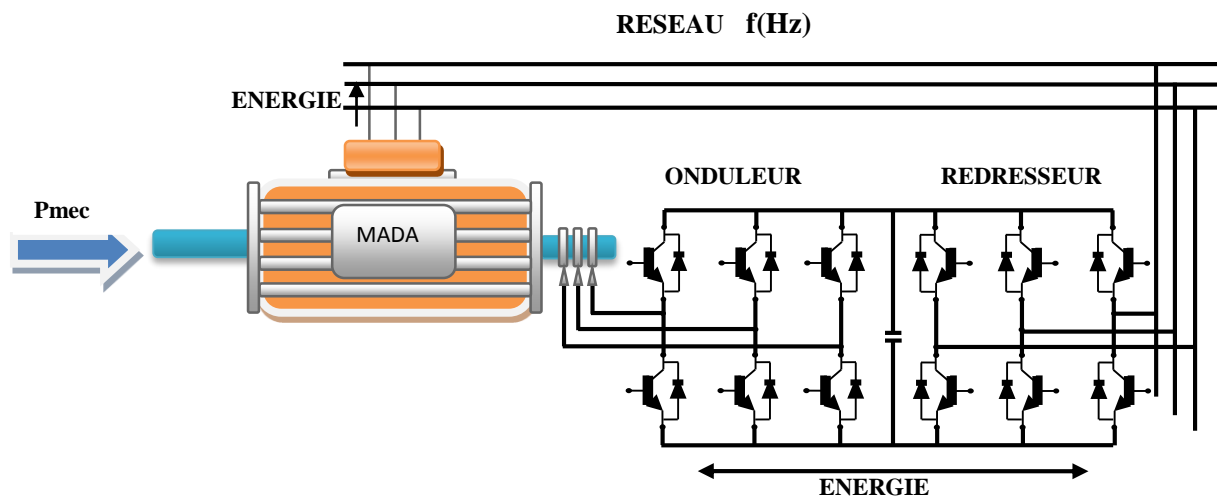


Figure (II-15) : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI, [13,24].

La réversibilité de puissance du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, les convertisseurs sont alors dimensionnés pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance, [10,11]. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau.

La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire.

II.11. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA

Dans ce contexte, il est clair que la machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double

alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des inconvénients qu'on va citer ci-dessous.

II.11. 1. AVANTAGES DE LA MADA, [10, 20 ,24]

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique ;
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme ;
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne) ;
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge ;
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement ;
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique ;
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse ;
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
 - Fonctionnement à vitesse de rotation variable ;
 - Régulation découplée des puissances active et réactive.

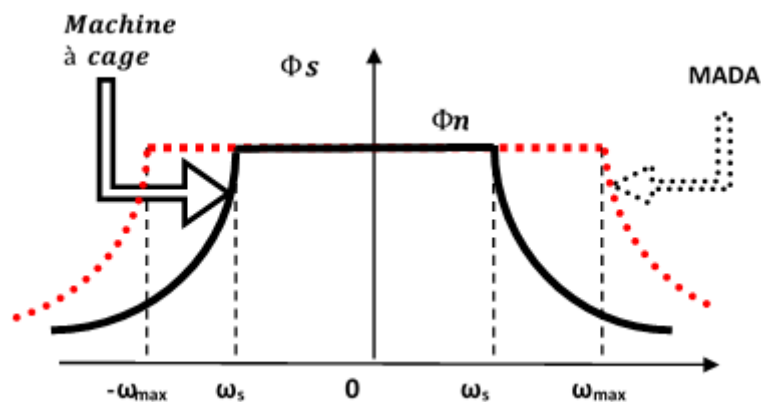


Figure (II-16) : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA, [19].

II.11.2. INCONVENIENTS DE LA MADA

- Machine plus **volumineuse que celle de** la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais ;
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique ;
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

II.12. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION:

Comme nous l'avons précédemment vu, la machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone classique à rotor accessible et identique au stator. Donc, le modèle de la MADA est le même que celui de la MAS avec l'exception des tensions rotoriques non nulles, [27].

La Figure (II-17) illustre la schématisation d'une machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée équivalente issue de la transformation de Park.

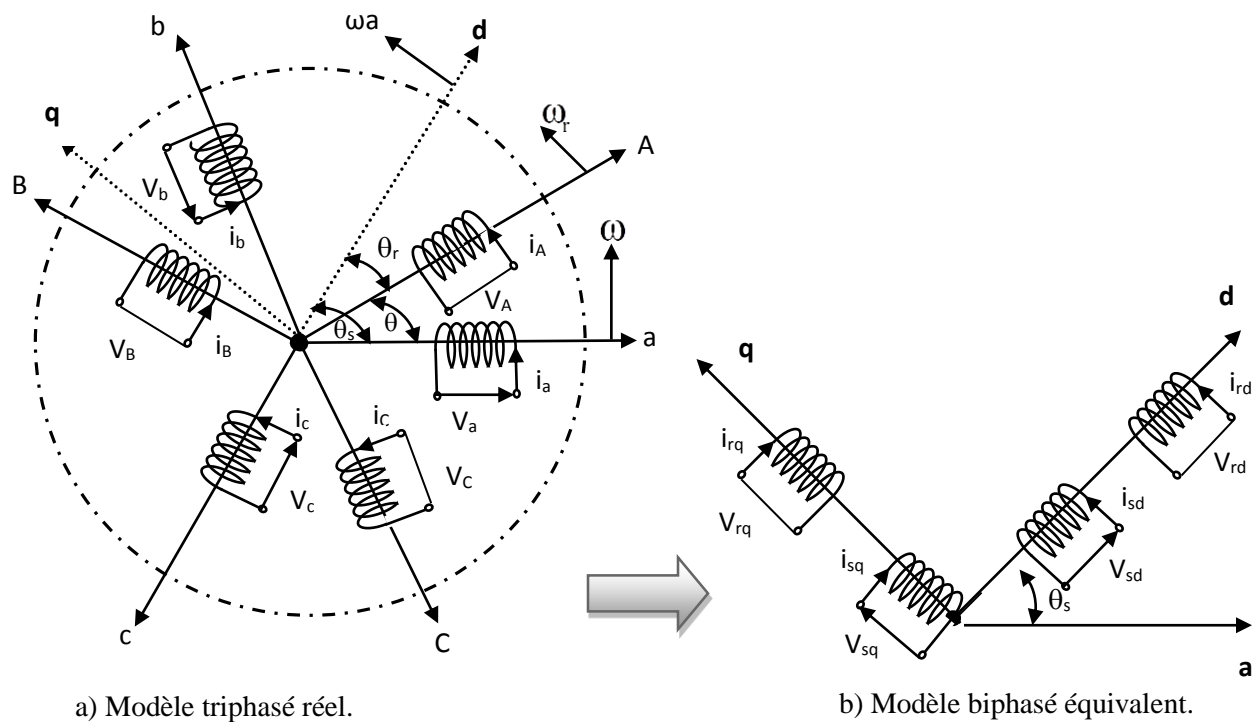


Figure (II-17, a,b) : Représentation de la machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée équivalente.

II.12.1. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES, [10, 16, 19]

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique ;
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable ;
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires ;
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température ;
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale ;
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

II.12.2. EQUATIONS ELECTRIQUES ET L'EQUATION MECANIQUE DE LA MADA

II.12.2.1. EQUATIONS ELECTRIQUES

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_s] &= \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; & [I_s] &= \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; & [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \\ [V_r] &= \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; & [I_r] &= \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; & [R_r] &= \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

Où R_s et R_r sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

Et les équations des flux sont données par :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Où L_{ss} , L_{rr} : sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

M_s , M_r : sont les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}]$: est la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor donnée par :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec : $[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$ et M_{sr} : est l'inductance mutuelle stator-rotor ;

M_{max} : Est la mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant les flux par leurs expressions dans (II.1), on obtient :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]] \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

II.12.2.2 EQUATIONS MECANIQUE

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (\text{II.14})$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]] \quad (\text{II.15})$$

Avec : p le nombre de paires de pôles de la MADA.

II.12.3. CHOIX DU REFERENTIEL

Nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère (d,q) qui constitue un angle électrique θ_s avec le stator et qui forme également un angle électrique θ_r avec le rotor. Le référentiel est choisi en fonction de l'étude à réaliser. Dans la pratique, il existe trois types de référentiels, [4,19].

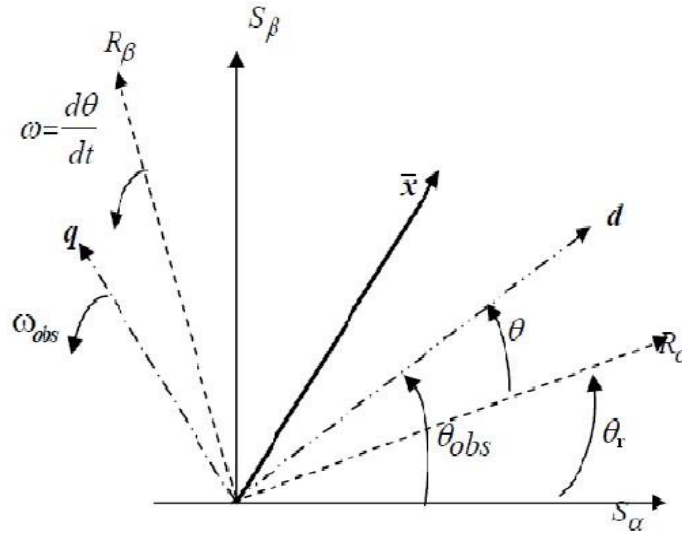


Figure (II.18) : Position relative des référentiels, [07].

II.12.3.1. REFERENTIEL LIE AU STATOR

Dans ce référentiel on a: $\omega_{obs} = 0$ alors $\omega_{g1} = -\omega_{r1} = -p_1\Omega$. Les équations de tension deviennent

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s I_{s\beta} + \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 16})$$

$$\begin{cases} V_{r\alpha} = R_r I_{r\alpha} + \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} + w_r \varphi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = R_r I_{r\beta} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} - w_r \varphi_{r\alpha} \end{cases} \quad (\text{II. 17})$$

Dans le référentiel (α, β) fixe par rapport au stator, les composantes de toutes les grandeurs (Tensions, courants et flux) statoriques et rotoriques, sont alternatives et de pulsation ω_s (qui est la même pulsation des grandeurs statoriques réelles). Pour cela le modèle de la machine asynchrone dans ce référentiel est un modèle réel du côté stator, il sera alors utilisé pour l'étude des grandeurs rotoriques (les variations de la vitesse de rotation, associé ou non avec des variations de la fréquence d'alimentation).

II.12.3.2. REFERENTIEL LIE AU ROTOR

On a: $\omega_{g1} = 0$ alors $\omega_{os} = \omega_{r1} = p_1\Omega$, les équations de tension deviennent

$$\begin{cases} V_{sx} = R_s I_{sx} + \frac{d\varphi_{sx}}{dt} - w_{os} \varphi_{ry} \\ V_{sy} = R_s I_{sy} + \frac{d\varphi_{sy}}{dt} + w_{os} \varphi_{rx} \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

$$\begin{cases} V_{rx} = R_r I_{rx} + \frac{d\varphi_{rx}}{dt} \\ V_{ry} = R_r I_{ry} + \frac{d\varphi_{ry}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

Dans le cas du référentiel (x, y) fixe par rapport au rotor, toutes les composantes de toutes les grandeurs (courants, tension et flux) statorique et rotorique sont alternatives et de pulsation ω_g (qui est la pulsation des grandeurs rotorique réelles). Pour cela, le modèle de la machine dans ce référentiel serait intéressant pour l'étude des grandeurs statorique, [25,26].

II.12.3.3. REFERENTIEL LIE AUX CHAMPS TOURNANT

On a : $\omega_{os} = \omega_s$ alors $\omega_{g1} = \omega_s - \omega_{r1} = \omega_s - p_1 \cdot \Omega$, les équations de tension deviennent:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - w_s \varphi_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + w_s \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (w_s - w_r) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (w_s - w_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

Ce référentiel fait donc correspondre en régime permanent, des grandeurs continues. Pour cela, il est le plus commode quand il s'agit de commande (vectorielle) de la machine (car, pour arriver à des situations de commande similaires à celle de la machine à courant continu, il faut entre autres, que le modèle soit décrit par des grandeurs continues).

II.12.4. MODELE DE LA MADA DANS LE PLAN (D,Q)

II.12.4.1. LA TRANSFORMATION DE PARK

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de transformer les grandeurs statorique et rotorique triphasées en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal.

Elle est constituée d'une transformation triphasée - biphasée « du repère (a, b, c) au repère (α, β) », suivie d'une rotation « du repère (α, β) au repère (d, q) ». La matrice de transformation de Park est définie comme suit, [1]:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 22})$$

$$\text{Et on a : } [x_{dq0}] = [P(\theta)] [x_{abc}]$$

II.12.4.2. APPLICATION DE LA TRANSFORMATION DE PARK

En appliquant cette transformation sur chacun des vecteurs tensions, courants et flux statoriques et rotoriques, on obtient les équations des flux (II.6) et des tensions (II.7) et (II.8)

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

Avec :

- L_r et L_s sont les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine ;
- M l'inductance mutuelle.

φ_{sd} , φ_{sq} , φ_{rd} et φ_{rq} sont les flux statorique et rotorique directs et en quadrature du système

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - w_e \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + w_e \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II. 24})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (w_s - w_r) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (w_s - w_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 25})$$

Où $w_e = \frac{d\theta_{os}}{dt}$ et $w = \frac{d\theta}{dt}$: sont respectivement les pulsations électriques et mécanique.

Tel que : $\theta_{os} = \theta + \theta_r$

En choisissant le repère lié au champ tournant ($w_{os} = w_s$), car c'est le mieux adapté lors d'une étude de la commande des machines, [1,2], on obtient les équations générales de la MADA :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - w_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + w_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - w_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + w_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

Avec respectivement :

V_{sd}, V_{sq}, V_{rd} et V_{rq} sont les tensions statorique et rotorique directes et en quadrature du système diphasé ;

w_s Et w_r sont les pulsations des grandeurs électriques statorique et rotorique ;

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M_{sr} I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M_{sr} I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M_{sr} I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M_{sr} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Sachant que $M_{sr} = M_{rs} = M$ et en remplaçant les flux par leurs expressions dans le système d'équations des tensions, on obtient [1] :

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} + w_{os} L_s I_{sq} + w_{os} M I_{rq} \\ U_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} - w_{os} L_s I_{sd} - w_{os} M I_{rd} \\ U_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + M \frac{dI_{sd}}{dt} + (w_s - w_r) L_r I_{rq} + (w_s - w_r) M I_{sq} \\ U_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + M \frac{dI_{sq}}{dt} - (w_s - w_r) L_r I_{rd} - (w_s - w_r) M I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II. 29})$$

Avec p le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances actives et réactives statorique s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

II.12.5. MISE SOUS FORME D'EQUATION D'ETAT

Notre but est de représenter les équations établis ci-dessus sous la forme suivante :

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad (\text{II. 31})$$

$$\text{Avec :} \quad [X] = [\varphi_{sd} \quad \varphi_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq}]^t ; \quad [U] = [v_{sd} \quad v_{sq} \quad v_{rd} \quad v_{rq}]^t ;$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & w_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -w_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(w_s - w_r) & -\delta & w_r \\ \beta(w_s - w_r) & \alpha & -w_r & -\delta \end{bmatrix} ; [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

α , β et δ sont des constantes définies comme suit :

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r} ; \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r} ; \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right).$$

Pour faciliter la simulation, nous avons écrit la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + w_s \cdot [A_2] + w_r \cdot [A_3] \quad (\text{II. 32})$$

Telle que :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix}, [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

II.12.6. RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME

A l'aide de logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park, (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. Les paramètres de la machine sont donne en annexe, Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobinée à double alimentation.

II.12.6.1. SCHEMA BLOC DE LA MADA

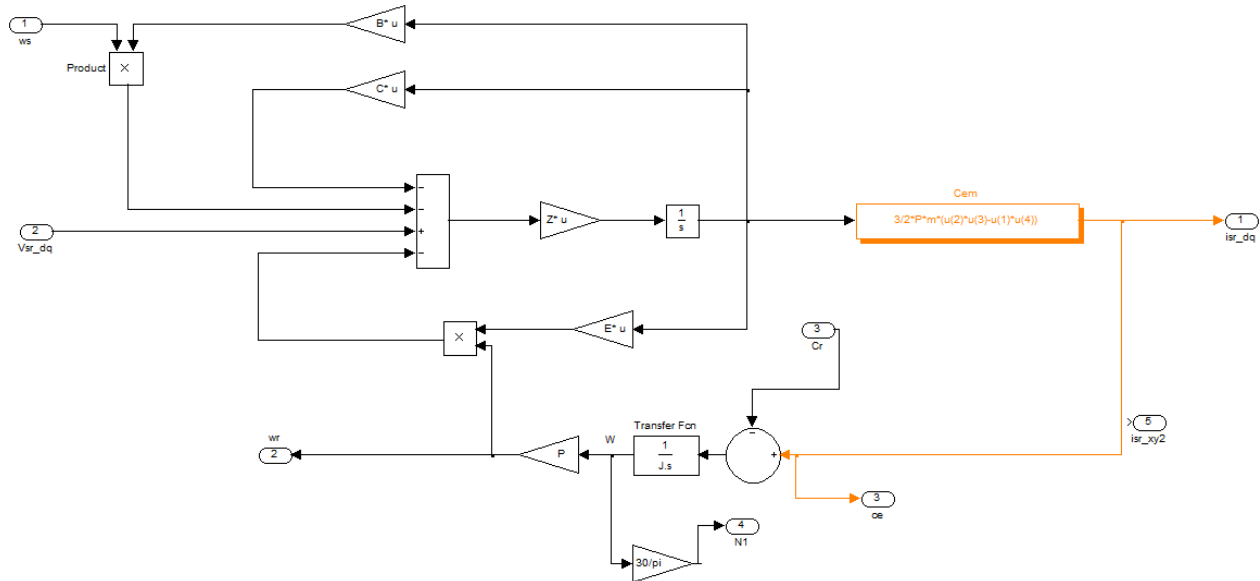


Figure (II-19) : Schéma bloc de simulation de la MADA.

II.12.6.2. RESULTATS DE SIMULATION FONCTIONNEMENT MOTEUR (MADA)

Les résultats de simulation de la machine asynchrone en fonctionnement moteur à rotor bobiné doublement alimenté sont représentés ci-dessous. Les figures ci-dessous représentent les paramètres tels que la vitesse, le couple, les composantes du courant statoriques, et rotorique sous plusieurs conditions :

- rotor en court-circuit $U_r = 0, f_r = 0$:

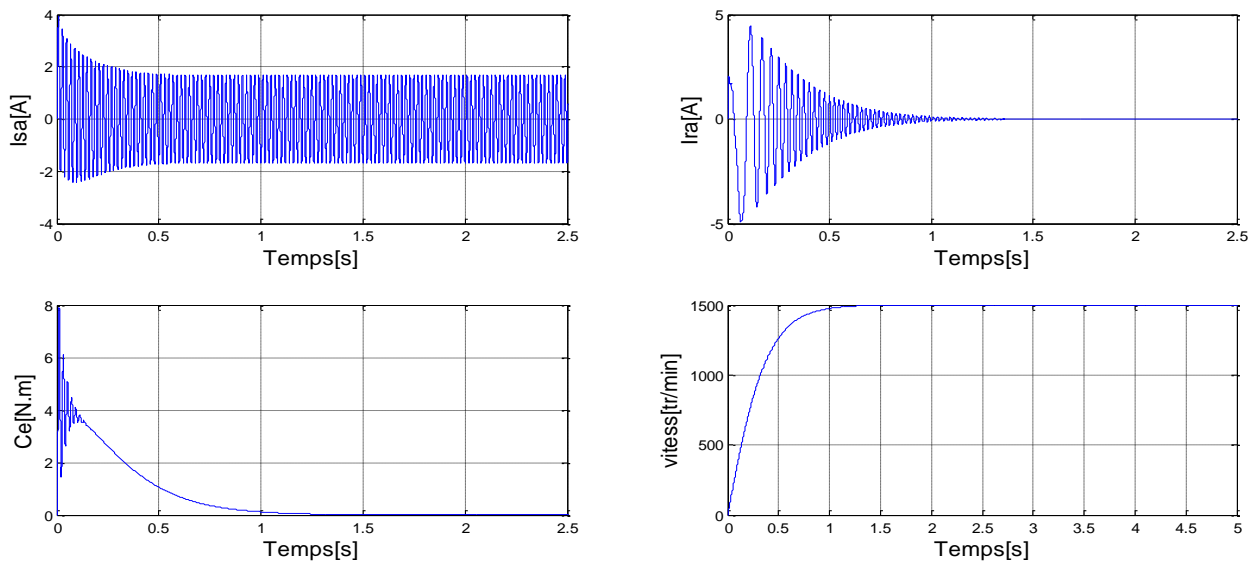


Figure (II-20) : Courant, vitesse et couple.

- $f_r = f_n = 2.66 \text{ Hz}$ pour une tension $U_r = 12 \text{ v}$ et $C_r = 1.2 \text{ N.m}$ à $t = 2$:

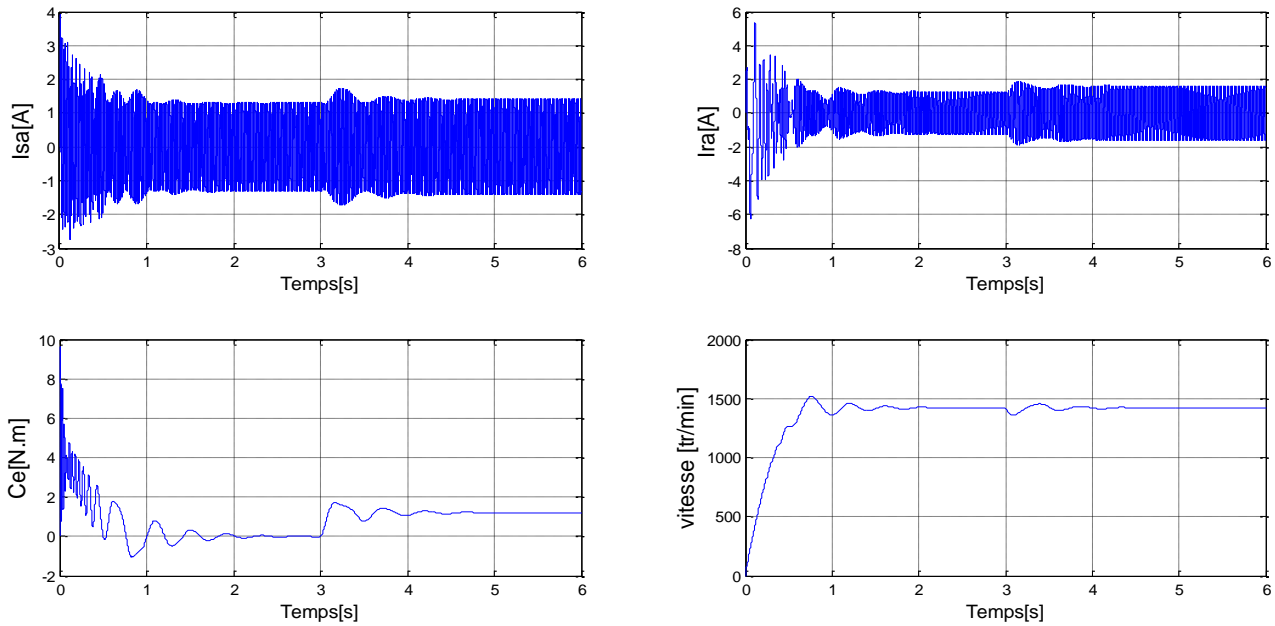


Figure (II-21) : Courant, vitesse et couple.

- $f_r = 3 * f_n = 2.66 * 3 \text{ Hz}$ pour une tension $U_r = 12 \text{ v}$ et $C_r = 1.2 \text{ N.m}$:

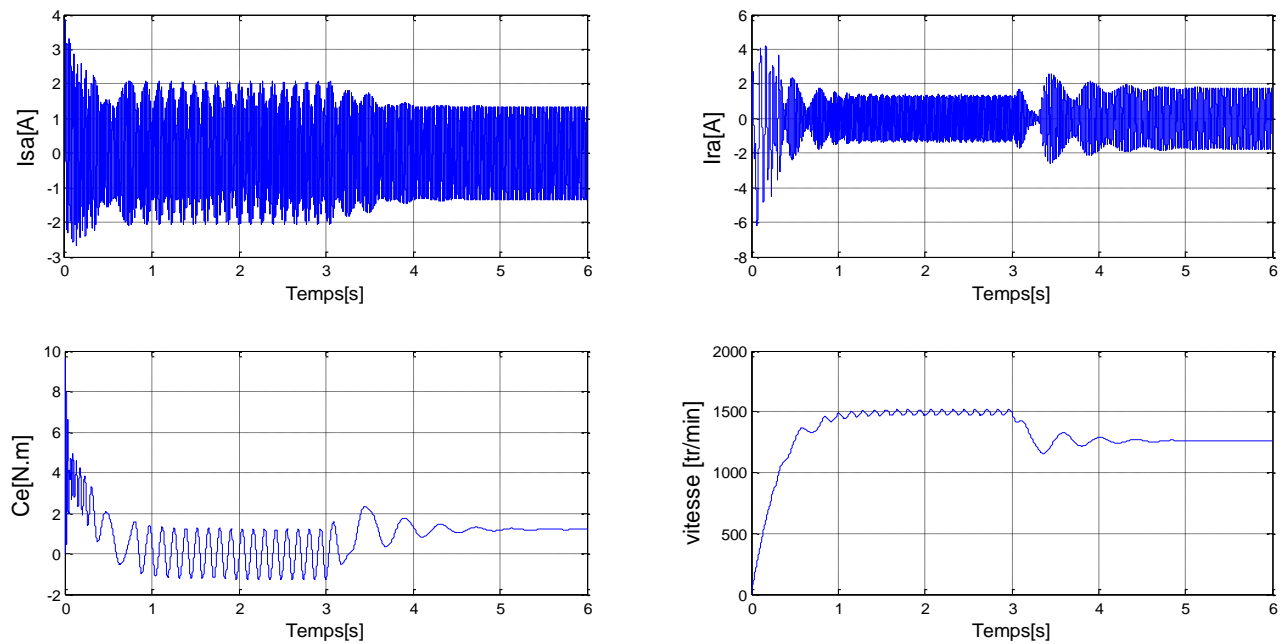


Figure (II-22) : Courant, vitesse et couple.

- $f_r=2.66$ Hz pour une tension $U_r=32$ v et $C_r=1.2$ N.m à $t=3$:

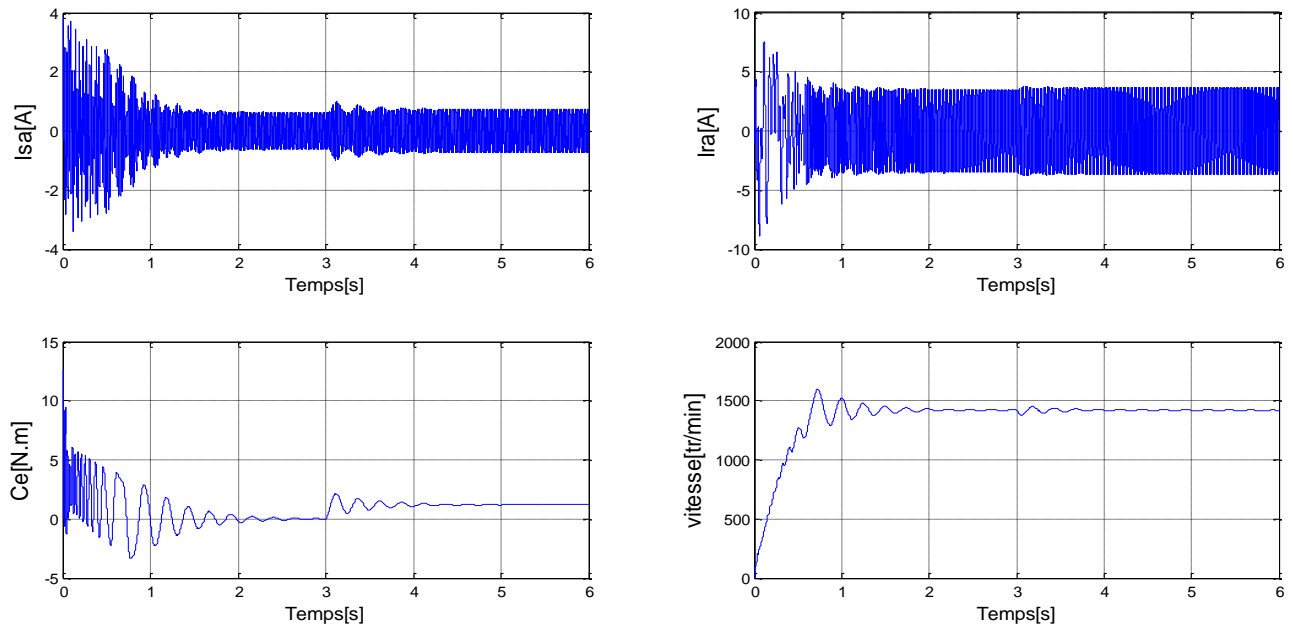


Figure (II-23): Courant, vitesse et couple.

- $f_r=2 * f_n=2.66 * 2$ Hz pour une tension $U_r=30$ V et $C_r=1.2$ N.m :

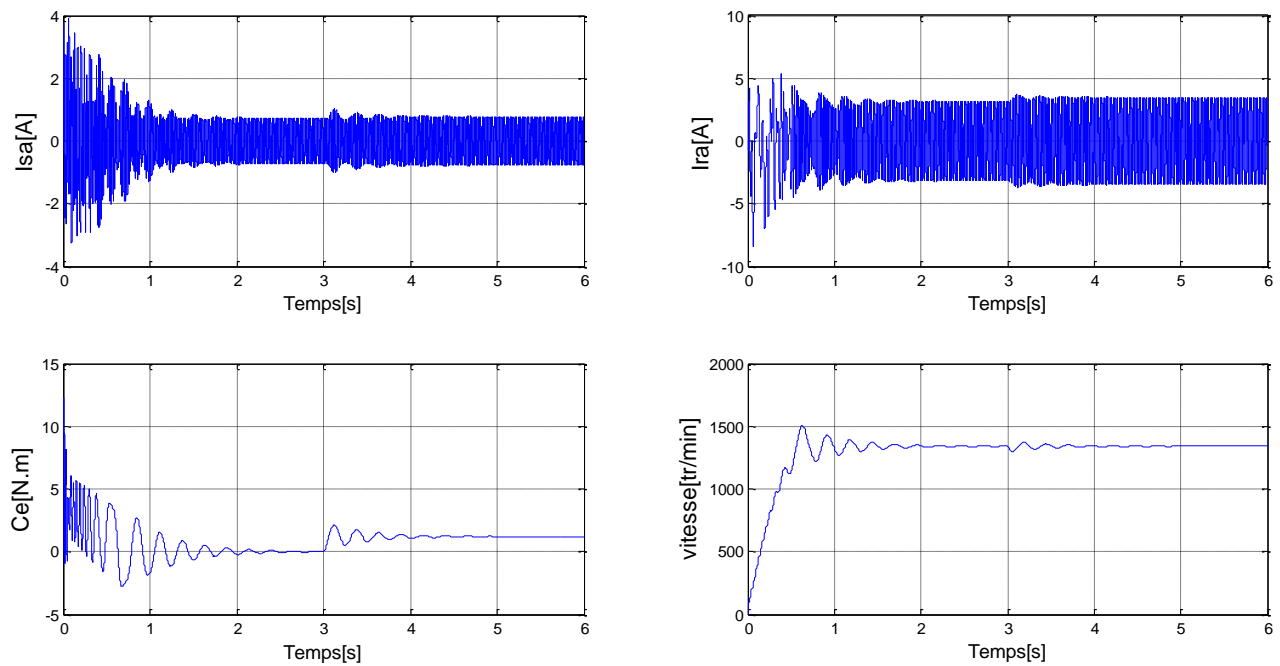


Figure (II-24) : Courant, vitesse et couple.

II.12.6. 3. INTERPRETATIONS DES RESULTATS

On remarque que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire pour se stabiliser après le temps de réponse, la vitesse est proche du synchronisme, et a une fréquence des courants rotoriques presque nulle (et faible glissement). En plus, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche du zéro (Figure II.20) (présence de frottements visqueux).

L'évolution des courants, la vitesse ainsi que le couple d'une machine asynchrone à rotor bobiné à vide et en charge avec les paramètres voir annexe, au démarrage, l'appel du courant est important. Il diminue au fur et à mesure est se stabiliser après 0.3 secondes. Par contre, les flux, lors du régime transitoire sont assez faibles et augmentent pour atteindre leurs valeurs finales. Quant au couple, il démarre avec de fortes oscillations puis il s'annule. Enfin, la vitesse évolue au début avec de petites oscillations pour arriver à la valeur requise.

L'application d'un couple résistant se traduit par une augmentation du couple électromagnétique, dû à l'augmentation de l'amplitude des courants statoriques (Figure II.22) provoquant ainsi la diminution de la vitesse, le glissement devient important affectant ainsi les courants rotoriques (vérification de la relation $f_r = g \cdot f_s$). La machine fonctionne alors en moteur hypo synchrone.

Lorsque la machine est chargée à 1.2 Nm. voir figures (II.23) a (II.24), on constate que le régime transitoire dure un peu plus long, les courants augmentent, les flux diminuent. Cela est La vitesse oscille au démarrage puis se stabilise à la normale, le temps de réponse devient important, dû à la charge, il en est de même pour le couple qui démarre avec des oscillations pour se stabiliser et égaliser le couple résistant imposé à la machine.

Ces résultats de simulation de la machine asynchrone sont conformes avec ceux de la littérature.

II.14. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures de la machine asynchrone à double alimentation. Afin de mieux comprendre les avantages que peut procurer cette machine par rapport aux structures classiques, nous avons étudié les possibilités qu'elle offre en fonctionnement moteur et génératrice dans les quatre quadrants.

Après avoir illustré les avantages et les inconvénients de la MADA, nous avons cité les domaines d'application, où cette machine représente la solution la plus convenable, pour les deux modes de fonctionnement (moteur et génératrice).

Le modèle de la MADA est un système d'équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. La transformation de Park nous a permis de simplifier le modèle de la machine.

Les résultats de simulation montrent que pour le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Ainsi l'étude comparative entre les deux modes de fonctionnement de la MADA fait apparaître une meilleure stabilité pour le cas générateur par rapport au moteur.

En double excitation, la rotation de champs tournants du stator et du rotor devient fonction des fréquences respectivement imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre les deux champs est exigée afin de garantir une stabilité à la machine. Par analogie, on est donc en présence du problème de stabilité de la machine synchrone. En effet, les fréquences imposées par les deux sources externes confèrent à la machine asynchrone double alimentée une vitesse constante comme dans le cas de la machine synchrone. Par conséquent, sans le recours au contrôle strict de la position relative entre les deux forces magnétomotrices développées par les deux armatures de la machine, le risque d'instabilité devient imminent.

CHAPITRE-III-

ETUDE THÉORIQUE DE COUPLAGE ENTRE DEUX MADA (ARBRE ELECTRIQUE)

III.1. INTRODUCTION

Le couplage électrique de deux MADA constitue un arbre électrique. Dans ce chapitre, on va essayer de se familiariser avec ce type de montage, qui prend en considération deux machines identiques (de même puissance).

Les enroulements des stators sont excités à partir d'une source d'alimentation commune, et les rotors reliés électriquement entre eux, [32].

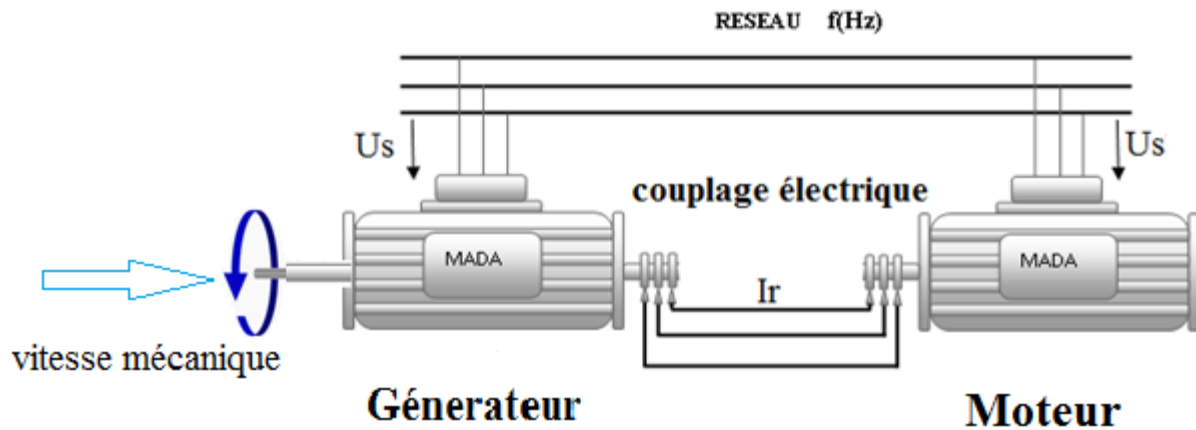
Les deux machines sont éloignées l'une de l'autre et le transmetteur est situé à l'endroit où le mouvement est généré par contre le récepteur est situé au point où le mouvement est dupliqué. Dans ces conditions, pour chaque paire de pôles, il y a seulement une position relative des rotors où les tensions secondaires seront exactement opposées de sorte qu'aucun courant ne va circuler dans les enroulements secondaires. Pour les autres positions, un courant va circuler dans les enroulements du rotor et des couples tendent à faire tourner les rotors à la position où les tensions sont encore égales et opposées. Si, par conséquent, un rotor est tourné, l'autre rotor tend à prendre la même position. Le montage appelé aussi SELSYN est synchronisé à l'arrêt par application d'une seule phase d'excitation. Ceci introduit plusieurs problèmes qui portent directement sur le choix de commande et les connexions d'enroulements. L'étude de plusieurs caractéristiques de synchronisation est importante pour la compréhension approfondie de l'entraînement SELSYN. Les deux couples de fonctionnement et de synchronisation sont exprimés en termes de caractéristiques de fonctionnement du moteur à induction, permettant ainsi de reproduire directement des caractéristiques du moteur à induction en données de synchronisation et d'exploitation, [44].

Le montage doit être formulé mathématiquement pour pouvoir arriver à une simulation.

III.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le système SELSYN dans sa forme la plus simple consiste en un moteur relié à un générateur, figure (III.1). Avec cette connexion, chaque fois que l'arbre du générateur tourne, l'arbre du moteur tourne de telle sorte que sa position électrique est la même que celle de l'arbre du générateur. Ainsi, par exemple, lorsque l'arbre du générateur est en position zéro électrique, l'arbre du moteur est à 0° , si l'on décale d'un angle de 30° l'arbre de générateur, le moteur aussi réagit à cet action est tourne à 30° , et ainsi de suite. Pour comprendre le phénomène d'action et de réaction entre deux machines, on doit examiner les conditions internes de chaque machine. Pour ce faire, on considère deux arbres à la même position et puis les deux arbres dans des différentes positions. Le découplage du montage nous entraîne à obtenir deux

montages possibles l'un travaillant comme convertisseur de fréquence appelé aussi transmetteur et l'autre partie qui n'est qu'une MADA appelée récepteur (voir deuxième chapitre).



Figure(III.1) : Générateur transmetteur et moteur récepteur, [45].

III.2.1. CONVERTISSEUR ASYNCHRONE DE FRÉQUENCE

Cette partie de montage représente le transmetteur dans les systèmes de télé-indication, il fonctionne comme un convertisseur de fréquence, qui est réalisé par un simple couplage mécanique d'un moteur à rotor bobiné à un autre moteur, [6].

La rotation du CF dans un sens ou dans un autre peut faire l'objet d'une source à fréquence variable, figure (III.2). La fréquence rotorique du CF est donnée par :

$$f_2 = g \cdot f_1 = (\Omega_1 - \Omega) * \frac{p}{2\pi} \quad (\text{III. 1})$$

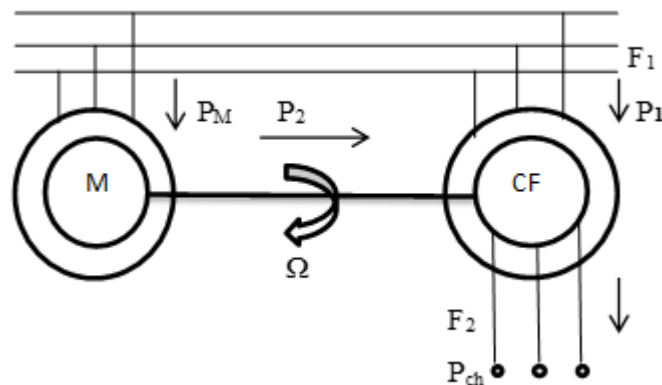


Figure (III.2) : Schéma de montage d'un convertisseur asynchrone de fréquence, [6,47].

Lorsque $\Omega > 0$ le rotor tourne dans le sens du champ, il est donc possible d'obtenir entre les

bagues d'une machine asynchrone à rotor bobinée une tension de fréquence f_2

- Pour que f_2 soit constante, le rotor du CF doit tourner dans le sens opposé au champ ($g > 1$) et $f_2 > f_1$ et dans le sens du champ magnétique ($g < 1$) $f_2 < f_1$;
- Pour produire une fréquence $f_2 > f_1$, le CF fonctionne avec $g > 1$;
- Pour produire une fem. de fréquence $f_1 < f_2$, le rotor du CF est freiné par le couple électromagnétique du moteur qui fonctionne dans le cas générateur et renvoie de l'énergie vers le même réseau.

Le convertisseur de fréquence fonctionne comme un moteur compresseur :

$$\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{P_c} = \Omega_1 c \text{ et } \Omega = \pm \Omega_1 m = \pm \frac{2\pi f_1}{P_m} \quad (\text{III. 2})$$

On aura :

$$f_2 = g \cdot f_1 = \Omega_1 - \frac{\Omega}{\Omega_1} \Omega_1 * f_1 = P_m \pm \frac{P_c}{P_m} * f_1 \quad (\text{III. 3})$$

Où les signes + et - se rapportent respectivement à la marche de la machine asynchrone en frein ($f_2 > f_1$) et en moteur ($f_2 < f_1$) ;

- P_c et P_m sont les nombres de paires de pôles du convertisseur et du moteur d'entraînement;
- Les puissances active et réactive sont données par les équations suivantes :

$$P_{ch} = g * f_1 \quad (\text{III. 4})$$

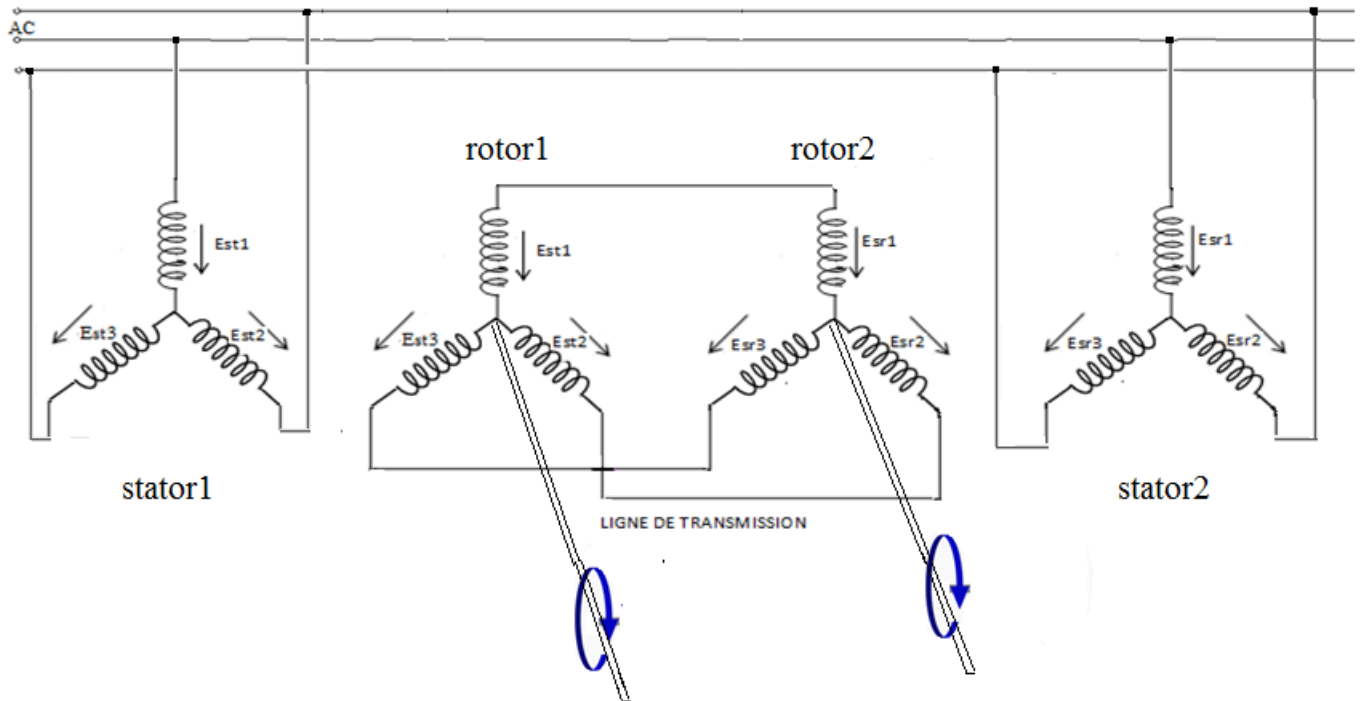
$$Q_{nf} = g * Q_1 \quad (\text{III. 5})$$

$$P_m = P_2 = \left(1 - \frac{1}{g}\right) * P_{ch} \quad (\text{III. 6})$$

- Le réglage de f_2 s'obtient par l'action sur f_1 ou sur la vitesse de rotation du moteur ;
- Les CF sont réalisés pour l'obtention d'une tension alternatif de fréquence de 100 Hz à 200 Hz nécessaire à l'alimentation des moteur $> 300\text{tr/min}$, [06].

III.2.2. LIAISON ÉLECTRIQUE DES SYNCHRO MACHINE TRIPHASÉS

Le SELSYN triphasé est constitué de deux moteurs asynchrones rotors bobinés triphasés de même puissance. Le rotor de l'un de ces moteurs est relié mécaniquement un moteur d'entraînement et les deux rotors sont connectés électriquement par l'intermédiaire d'une ligne de transmission. Les enroulements des stators des deux moteurs de SELSYN sont connectés en parallèle et alimentés par une source triphasée, comme représenté sur la figure (III.3), [35].

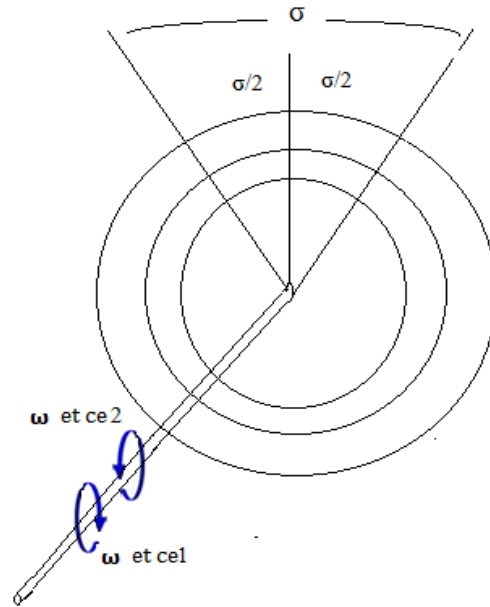


Figure(III.3) : Arber électrique triphasé, [6,35].

Les deux arbres peuvent tourner dans le sens inverse du champ tournant statorique et le couple transmis initialement par le SELSYN d'un arbre à l'autre est égale à zéro. En outre, si w_{syn} et w sont respectivement les vitesses angulaires de rotation du champ tournant et du rotor, alors les tensions induites dans une phase donnée des deux rotors sont égales :

$$e_{rA} = e_{rB} = \sqrt{2} E_r \cdot \sin [(w_{syn} + w)t + \sigma_0] \quad (III. 7)$$

Si les caractéristiques vitesses et couple du transmetteur sont tombantes, la diminution de la charge sur le moteur 1 est accompagnée par une augmentation de la vitesse. Par conséquent, la tension induite dans le rotor de machine 1 est avancée par un angle σ par rapport la tension induite dans le rotor de la machine 2, provoquant ainsi un courant qui circule entre les deux rotors, avec la machine 1 fonctionnant comme générateur et la machine 2 comme un moteur, [48].



Figure(III.4) : Représentation des deux sens de rotation entre les rotors, [35].

La tension statorique pour ces conditions serait alors :

$$V'_A = V' \left(\frac{\cos \delta}{2} + \frac{j \sin \delta}{2} \right) = \frac{V' \cos \delta}{2} + \frac{j V' \sin \delta}{2} \quad (\text{III. 8})$$

$$V'_B = V' \left(\frac{\cos \delta}{2} - \frac{j \sin \delta}{2} \right) = \frac{V' \cos \delta}{2} - \frac{j V' \sin \delta}{2} \quad (\text{III. 9})$$

Où :

$$V' = (1 - X_1 / X_M) V \quad (\text{III. 10})$$

La figure (III.4) montre les tensions V'_1 et V'_2 appliquées au circuit équivalent approximatif du SELSYN.

Soit :

$$z = \frac{R_1 + R_2}{g} + j(x_1 + x_2) \quad (\text{III. 11})$$

Dans la figure(III.4), le courant du rotor renvoyé au stator de SELSYN est :

$$I_2 = \frac{V'_1 - V'_2}{2z} = j \frac{V' z^* \sin(\delta/2)}{z} = j \frac{V' z^* \sin(\delta/2)}{|z|^2} \quad (\text{III. 12})$$

Où R^* est le conjugué de l'impédance complexe z et $|z|$ est l'amplitude de z . La puissance transférée à travers l'entrefer au rotor de la machine 1 pour chacune des trois phases est :

$$P_{g1} = 3 \cdot R_e \cdot E \cdot 2A \cdot I_2^* \tag{III. 13}$$

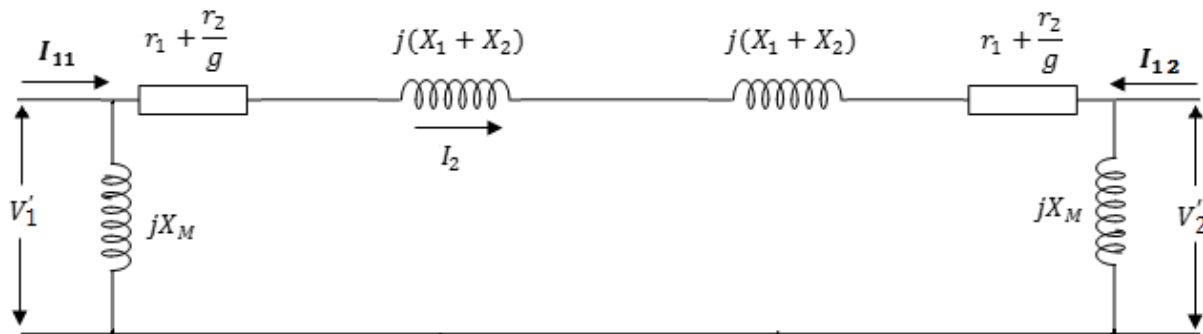
Où : $E_{21} = V'_1 - r_1 I_2$ (III. 14)

Et lorsque l'équation (III.12) est substituée dans l'équation (III.14) on a le résultat:

$$E_{21} = V' \left[\cos \frac{\delta}{2} + j \left(\sin \frac{\delta}{2} - \frac{r_1 z^* \sin(\frac{\delta}{2})}{|z|^2} \right) \right] \tag{III. 15}$$

I_2^* c'est le conjugué de I_2 alors, de l'équation (III.12)

$$I_2^* = j \frac{V'^* z \sin(\delta/2)}{|z|^2} \tag{III. 16}$$



Figure(III.5) : Schéma équivalent en L de la MADA n°1 en liaison électrique avec de la MADA n°2, [32,35].

En remplaçant les équations (III.15) et (III.16) dans l'équation (III.13), on obtient :

$$P_{g1} = 3 \operatorname{Re} V' V'^* \left[\cos \frac{\delta}{2} + j \left(\sin \frac{\delta}{2} - \frac{r_1 z^* \sin(\frac{\delta}{2})}{|z|^2} \right) \right] * \left[-j \frac{z \sin(\frac{\delta}{2})}{|z|^2} \right] \tag{III. 17}$$

Le produit d'un nombre complexe et son conjugué est un nombre réel égal à la grandeur du nombre complexe au carré.

Ainsi :

$$V' V'^* = V'^2 \quad \text{et} \quad z \cdot z^* = |z|^2$$

Et quand ces relations sont appliquées à l'équation (III. 17), la puissance absorbée par le rotor est définie par la relation suivant :

$$P_{g1} = \frac{3v'^2}{|z|^2} \left[\frac{(x_1+x_2)\sin\delta}{2} + \frac{r_2}{s} \sin^2 \frac{\delta}{2} \right] \quad (\text{III. 18})$$

Le couple se trouve dans une direction de telle manière à réduire l'angle de décalage δ et peut être obtenu par la relation suivant :

$$C_1 = \frac{3v'^2 * \left[\frac{(x_1+x_2)\sin\delta}{2} + \frac{r_2}{s} \sin^2 \frac{\delta}{2} \right]}{\frac{2\pi n_{syn}}{60} \left[\left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + (x_1+x_2)^2 \right]} \quad (\text{III. 19})$$

La même procédure est utilisée pour déterminer le couple de la machine B (réceptrice)

$$C_2 = \frac{3v'^2 \left[\frac{(x_1+x_2)\sin\delta}{2} + \frac{r_2}{s} \sin^2 \frac{\delta}{2} \right]}{\frac{2\pi n_{syn}}{60} \left[\left(r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right]} \quad (\text{III. 20})$$

Le couple maximal développé par les moteurs pour une valeur donnée du glissement g se traduit par un angle de décalage δ

Pour la machine 1 on a :

$$\delta_1 = - \frac{s(x_1 + x_2)}{r_2} \quad (\text{III. 21})$$

Et pour la machine 2 :

$$\delta_2 = + \frac{s(x_1+x_2)}{r_2} \quad (\text{III. 22})$$

Les équations (III.21) et (III.22) montrent que δ est faible pour de faibles valeurs de glissement, Pour cette raison, chaque fois que les moteurs tournent dans un seul sens, les arbres sont entraînés dans le sens opposée à la direction du champ tournant, [9,35].

III.3. SCHÉMA ÉQUIVALENT SIMPLIFIÉ DE COUPLAGE DE DEUX MADA

La figure (III.5) montre le schéma équivalent en régime permanent de l'arbre électrique, en alimentant les deux MADA.

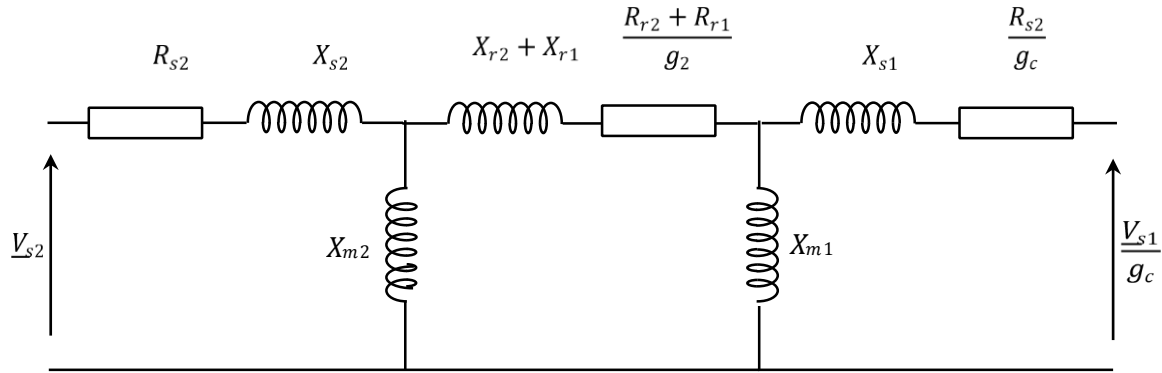


Figure (III.6) : Schéma équivalent de la MADA n°1 en liaison électrique avec de la MADA n°2, [28,33].

Les équations du synchro machine sont décrites comme suit :

$$\bar{v}_{s2} = R_{s2}\bar{I}_{s2} + w_{s2}l_{s2}\bar{I}_{s2} + w_{s2}l_{m2}\bar{I}_r \quad (\text{III. 23})$$

$$\bar{v}_{s1} = R_{s1}\bar{I}_{s1} + w_{s1}l_{s1}\bar{I}_s g_c + w_{s1}l_{m1}\bar{I}_r g_c \quad (\text{III. 24})$$

$$0 = (R_{r1} + R_{r2})\bar{I}_r + (L_{r1}w_2 + L_{r2}w_2)g_c\bar{I}_r + (L_{m1}w_2 + L_{m2}w_2)g_c\bar{I}_r \quad (\text{III. 25})$$

Le schéma équivalent obtenu est très intéressant pour comprendre le fonctionnement de la liaison de deux MADA électriquement. On conclut d'après le schéma ci-dessus que le schéma équivalent de couplage de la MADA en arbre électrique est très similaire à celui de la machine asynchrone à bagues. Dans ce dernier on a une maille additionnelle puisqu'on utilise un couplage magnétique de plus (stator-rotor-stator). Bien que le modèle de couplage soit plus compliqué, et le mode de fonctionnement est identique à celui de la machine asynchrone à bagues. Au lieu d'alimenter les bobinages du rotor, dans le cas de la liaison électrique, on alimentera un bobinage additionnel du stator, [28].

III.4. MODÉLISATION DE L'ARBRE ÉLECTRIQUE TRIPHASÉ :

Dans ce qui suit, on va modéliser le couplage de deux MADA en exploitant le modèle précédent de la MADA, et on va coupler les deux MADA électriquement au niveau du rotor. Ce couplage est modélisé

ici en supposant qu'il n'y a pas de défaut tel qu'une coupure de ligne et qu'il n'y a ni perte ni stockage d'énergie dans les connexions, [18]. Les grandeurs et paramètres associés à chaque machine seront identifiés par l'indice 1 et 2 correspondant respectivement à la MADA n°1 et à la MADA n°2.

Le modèle de la MADA étant établi sous forme de schéma électrique, il convient d'établir un schéma électrique de la connexion des deux MADA. Cette association électrique est réalisée par une interconnexion de leurs rotors, [11].

Deux cas de figures sont possibles Le couplage direct et le couplage indirect des phases des deux rotors

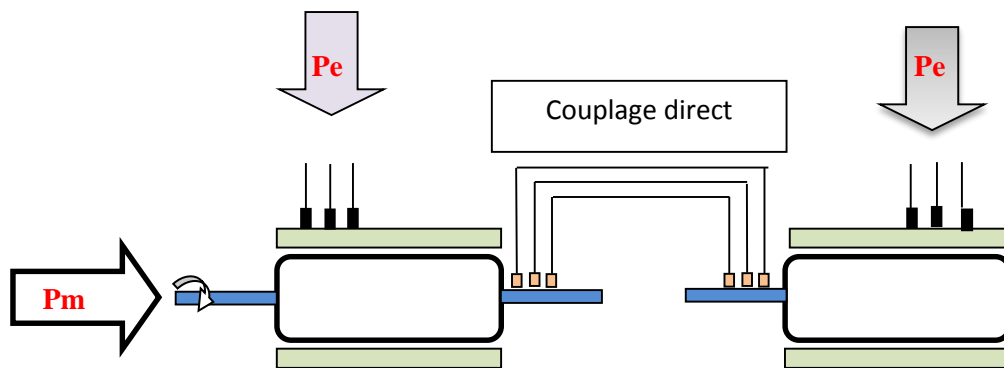


Figure (III.7) : Schéma d'un couplage de deux MADA.

La méthode d'analyse emploie la transformation de Park. Les équations des tensions et les flux des deux MADA sont comme suit, [28]:

La première machine:

III.4.1. MODÉLISATION DE LA PREMIÈRE MACHINE

Pour la première machine, on peut écrire, [1,34] :

$$\begin{cases} U_{sd1} = R_{s1}I_{sd1} + \frac{d\varphi_{sd1}}{dt} - w_{os1}\varphi_{sq1} \\ U_{sq1} = R_{s1}I_{sq1} + \frac{d\varphi_{sq1}}{dt} + w_{os1}\varphi_{sd1} \\ U_{rd1} = R_{r1}I_{rd1} + \frac{d\varphi_{rd1}}{dt} - (w_{os1} - w_{r1})\varphi_{rq1} \\ U_{rq1} = R_{r1}I_{rq1} + \frac{d\varphi_{rq1}}{dt} + (w_{os1} - w_{r1})\varphi_{rd1} \end{cases} \quad (\text{III. 26})$$

Les expressions des flux

$$\begin{cases} \varphi_{sd1} = L_{s1}I_{sd1} + M_1I_{rd1} \\ \varphi_{sq1} = L_{s1}I_{sq1} + M_1I_{rq1} \\ \varphi_{rd1} = L_{r1}I_{rd1} + M_1I_{sd1} \\ \varphi_{rq1} = L_{r1}I_{rq1} + M_1I_{sq1} \end{cases} \quad (\text{III. 27})$$

III.4.2. MODÉLISATION DE LA DEUXIÈME MACHINE

$$\begin{cases} U_{rd2} = R_{r2}I_{sd2} + \frac{d\varphi_{rd2}}{dt} - (w_{os1} - w_{r1})\varphi_{rq1} \\ U_{rq2} = R_{r2}I_{rq2} + \frac{d\varphi_{rq2}}{dt} + (w_{os1} - w_{r1})\varphi_{rd2} \\ U_{sd2} = R_{s2}I_{sd2} + \frac{d\varphi_{sd2}}{dt} - (w_{os1} - w_{r1} - w_{r2})\varphi_{rq1} \\ U_{sq2} = R_{s2}I_{sq2} + \frac{d\varphi_{sq2}}{dt} + (w_{os1} - w_{r1} - w_{r2})\varphi_{sd2} \end{cases} \quad (\text{III. 28})$$

Les expressions des flux

$$\begin{cases} \varphi_{sd2} = L_{s2}I_{sd2} + M_2I_{rd2} \\ \varphi_{sq2} = L_{s2}I_{sq2} + M_2I_{rq2} \\ \varphi_{rd2} = L_{r2}I_{rd2} + M_2I_{sd2} \\ \varphi_{rq2} = L_{r2}I_{rq2} + M_2I_{sq2} \end{cases} \quad (\text{III. 29})$$

Dans le cas Où les machines sont identiques :

$$p_1 = p_2 \text{ Et } M_1 = M_2$$

$$\begin{cases} U_{rd1} = U_{rd2} \\ U_{rq1} = U_{rq2} \end{cases} \quad (\text{III. 30})$$

Et

$$\begin{cases} I_{rd1} = -I_{rd2} \\ I_{rq1} = -I_{rq2} \end{cases} \quad (\text{III. 31})$$

III.5. SYNCHRO MACHINE MONOPHASÉE

Les systèmes de télé indication utilisent deux synchro machines de même type le transmetteur ST et le récepteur SR, figure(III.8).

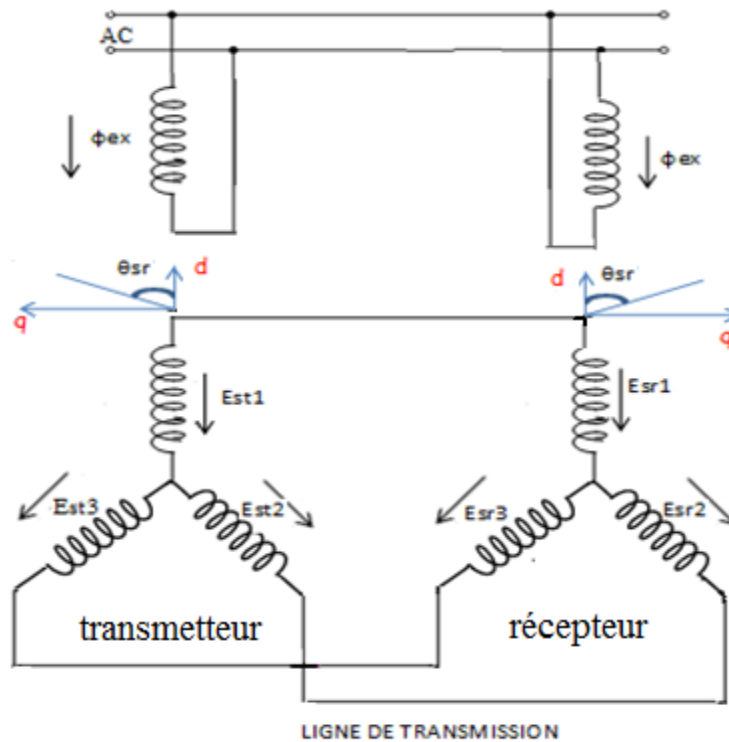


Figure (III.8) : Arbre électrique monophasé, [9].

Les enroulements d'excitation du synchro transmetteur et du synchro récepteur créent dans les circuits magnétiques de ceux-ci des flux magnétiques pulsatoires ϕ_{ex} ; vu que ST et SR sont identiques les deux flux sont égaux; les flux magnétiques pulsatoires vont induire dans la branche des enroulements de synchronisation des FEM dont les valeurs sont fonction cos de l'angle de rotation du rotor.

Pour le transmetteur ST, [9] :

$$\begin{cases} E_{st1} = E_{max} \cdot \cos \theta_{st} \\ E_{st2} = E_{max} \cdot \cos(\theta_{st} - 120) \\ E_{st3} = E_{max} \cdot \cos(\theta_{st} - 240) \end{cases} \quad (III. 32)$$

D'une façon analogue, on peut écrire les équations des f.e.m pour SR comme suit :

$$\begin{cases} E_{sr1} = E_{\max} \cdot \cos \theta_{sr} \\ E_{sr2} = E_{\max} \cdot \cos(\theta_{sr} - 120) \\ E_{sr3} = E_{\max} \cdot \cos(\theta_{sr} - 240) \end{cases} \quad (\text{III. 33})$$

L'erreur angulaire ST donnée par la différence entre l'angle de rotation du rotor du transmetteur et l'angle de rotation du rotor du récepteur.

$$\theta = \theta_{st} - \theta_{sr} \quad (\text{III. 34})$$

Si $\theta = 0$ et $\theta_{st} = \theta_{sr}$

Alors, on aura

$$E_{st1} = E_{sr1} \quad E_{st2} = E_{sr2} \quad E_{st3} = E_{sr3}$$

Dans la ligne de transmission, la FEM induite dans l'une des branches du transmetteur est en opposition à la FEM engendrée dans la branche correspondante du récepteur et le courant dans cette ligne sera :

$$I = \frac{E_{st} - E_{sr}}{2z} \quad (\text{III. 35})$$

I : le courant de ligne de transmission ;

z : est l'impédance de branche de l'une des synchro machines.

Dans ce cas, il n'y a pas de couple d'interaction du rotor et du flux du rotor et les deux machines se trouvent aux repos.

- Pour $\theta \neq 0$ entre les branches correspondantes du transmetteur et du récepteur on voit apparaître des FEM égales à la différence entre la FEM induite dans le ST et celle engendrée dans le SR, pour $\theta_{st} \neq \theta_{sr}$ et compte tenu des expressions précédentes :

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{st1} - E_{sr1} = E_{\max} \cdot \cos \theta_{st} - E_{\max} \cdot \cos \theta_{sr} \\ &= 2E_{\max} \cdot \sin \left(\theta_{st} - \frac{\theta}{2} \right) \cdot \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (\text{III. 36})$$

$$\begin{aligned} E_2 &= E_{st2} - E_{sr2} = E_{\max} \cdot \cos(\theta_{st} - 120) - E_{\max} \cdot \cos(\theta_{sr} - 120) \\ &= 2E_{\max} \cdot \sin \left(\theta_{st} - 120 - \frac{\theta}{2} \right) \cdot \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (\text{III. 37})$$

$$\begin{aligned}
 E_3 &= E_{st3} - E_{sr3} = E_{\max} \cdot \cos(\theta_{st} - 240) - E_{\max} \cdot \cos(\theta_{sr} - 240) \\
 &= 2 E_{\max} \cdot \sin\left(\theta_{st} + 120 - \frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\frac{\theta}{2} \quad (\text{III. 38})
 \end{aligned}$$

Si on néglige les résistances de la ligne de transmission, on trouve les courants :

$$I_1 = \frac{E_1}{2Z} = I_{\max} \cdot \sin\left(\theta_{st} - \frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\frac{\theta}{2} \quad (\text{III. 39})$$

$$I_2 = \frac{E_2}{2Z} = I_{\max} \cdot \sin\left(\theta_{st} - 120 - \frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\frac{\theta}{2} \quad (\text{III. 40})$$

$$I_3 = \frac{E_3}{2Z} = I_{\max} \cdot \sin\left(\theta_{st} + 120 - \frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\frac{\theta}{2} \quad (\text{III. 41})$$

Où :

$$I_{\max} = \frac{E_{\max}}{z}$$

III.5.1. COUPLE SYNCHRONISANT

L'interaction des courants et des flux pulsatoires engendrent des couples moteurs dirigés en sens opposés dans le ST et le SR et tendent à annuler l'angle d'erreur.

Pour trouver le couple synchronisant, on utilise la méthode des deux réactions qui consiste à décomposer la FEM de l'enroulement triphasé en deux composantes biphasées suivant l'axe d longitudinal et l'axe q transversal.

Les courants I_1, I_2, I_3 y engendrent respectivement des Fmm F_1, F_2, F_3 dirigées suivant les axes de ces enroulements.

La composante longitudinale de la Fmm induite dans le ST est donnée par :

$$F_{std} = F_{st1} \cdot \cos \theta_{st} + F_{st2} \cdot \cos(\theta_{st} - 120) + F_{st3} \cdot \cos(\theta_{st} + 120) \quad (\text{III. 42})$$

La composante transversale de la Fmm engendrée dans l'enroulement du ST est donnée par :

$$F_{stq} = F_{st1} \cdot \sin \theta_{st} + F_{st2} \cdot \sin(\theta_{st} - 120) + F_{st3} \cdot \sin(\theta_{st} + 120) \quad (\text{III. 43})$$

La Fmm produite dans une branche de l'enroulement de synchronisation ST ou SR est :

$$F = 1,8 \cdot I \cdot N \cdot Kb \quad (\text{III. 44})$$

K_b : coefficient du bobinage ;

N : est le nombre des spires d'une branche de l'enroulement.

En portant (III.49) dans les équations des Fmm (III.46) (III.47) (III.48) et en tenant compte des courants, on obtient :

$$F_{std} = -\frac{3}{4} F_{max} (1 - \cos \theta) \quad (III. 45)$$

$$F_{stq} = \frac{3}{4} F_{max} \sin \theta \quad (III. 46)$$

$$F_{max} = 1,8 \cdot W \cdot K_b \cdot I_{max} \quad (III. 47)$$

D'une façon analogue, on écrit pour le récepteur

$$F_{srd} = -\frac{3}{4} F_{max} (1 - \cos \theta) \quad (III. 48)$$

$$F_{srq} = \frac{3}{4} F_{max} \sin \theta \quad (III. 49)$$

Exemple pour $\theta = 15^\circ$

$$F_{std} = F_{srd} = -\frac{3}{4} F_{max} (1 - \cos 15^\circ) = 0.26 F_{max} \quad (III. 50)$$

La Fmm totale suivant l'axe longitudinal de la synchronomachine $F_{\Sigma d}$ est égale à la somme de deux fmm celle de l'enroulement d'excitation F_{ex} et celle de l'enroulement de synchronisation F_d

$$F_{\Sigma d} = F_{ex} + F_d \quad (III. 51)$$

Le flux magnétique engendré suivant l'axe longitudinal

$$\phi_d = F_{\Sigma d} \wedge d \quad (III. 52)$$

La composante transversale de la Fmm engendre dans ST et SR un flux magnétique dû à la réaction transversale

$$\phi_q = F_q \wedge q \quad (III. 53)$$

Le couple synchronisant des synchronomachines résulte essentiellement de l'interaction entre le flux ϕ_d et les composantes transversales des courants qui parcourent la synchronomachine en engendrant la Fmm F_q .

On remarque que les Fmm transversales sont de signes opposées, ce qui signifie que les couples synchronisants dans le ST et dans le SR sont dirigés en sens inverse.

La valeur du couple instantané synchronisant est :

$$C_{syn} = C \cdot \phi d \cdot f\omega = C [\phi d \cdot \sin wt \cdot F_{max} \cdot \sin (wt - \varphi) \cdot \sin \theta]$$

$$= \frac{1}{2} \cdot C \cdot \phi d \cdot F_{max} \cos \varphi \cdot \sin \theta - \frac{1}{2} \cdot C \cdot \phi d \cdot F_{max} \cos (2wt - \varphi) \cdot \sin \theta \quad (III. 54)$$

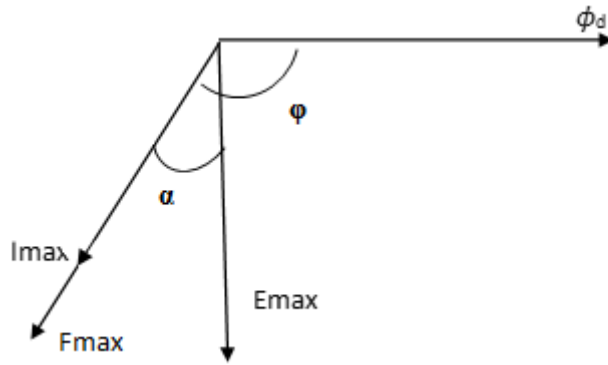


Figure (III.9) : Diagramme vectoriel d'un arbre électrique monophasé

φ angle de découplage dans le temps du vecteur ϕ_d par rapport à la F_{mm} et F_{max}

III.6. CONCLUSION

On a présenté dans ce chapitre, l'étude mathématique de couplage électrique entre deux machines monophasés et triphasés et la modélisation de l'arbre électrique entre deux MADA,

CHAPITRE - IV -

SIMULATION ET EXPERIMENTATION D'UN AREBRE ELECTRIQUE

IV.1. INTRODUCTION

Après la modélisation du système de couplage entre deux MADA, nous allons entamer dans ce chapitre la simulation et l'expérimentation.

La simulation est réalisée sur Matlab Simulink. A l'état initial, les deux machines se trouvent au repos. L'entraînement du transmetteur avec une certaine vitesse provoque la réaction du récepteur. Le modèle mathématique du système effectué dans le chapitre trois nous a permis de représenter se même modèle sous forme de schéma bloc, figure (IV.1), et d'afficher les résultats de quelques essais expérimentaux.

IV.2. SCHÉMA BLOC DE L'ARBRE ÉLECTRIQUE TRIPHASÉ

L'arbre électrique est constitué de deux machines à rotor bobinées de même puissance dont les paramètres sont représentés en annexe.

Ce bloc est constitué d'une partie principale représentant l'arbre électrique et des parties telles que l'alimentation ainsi que l'appareillage de mesure.

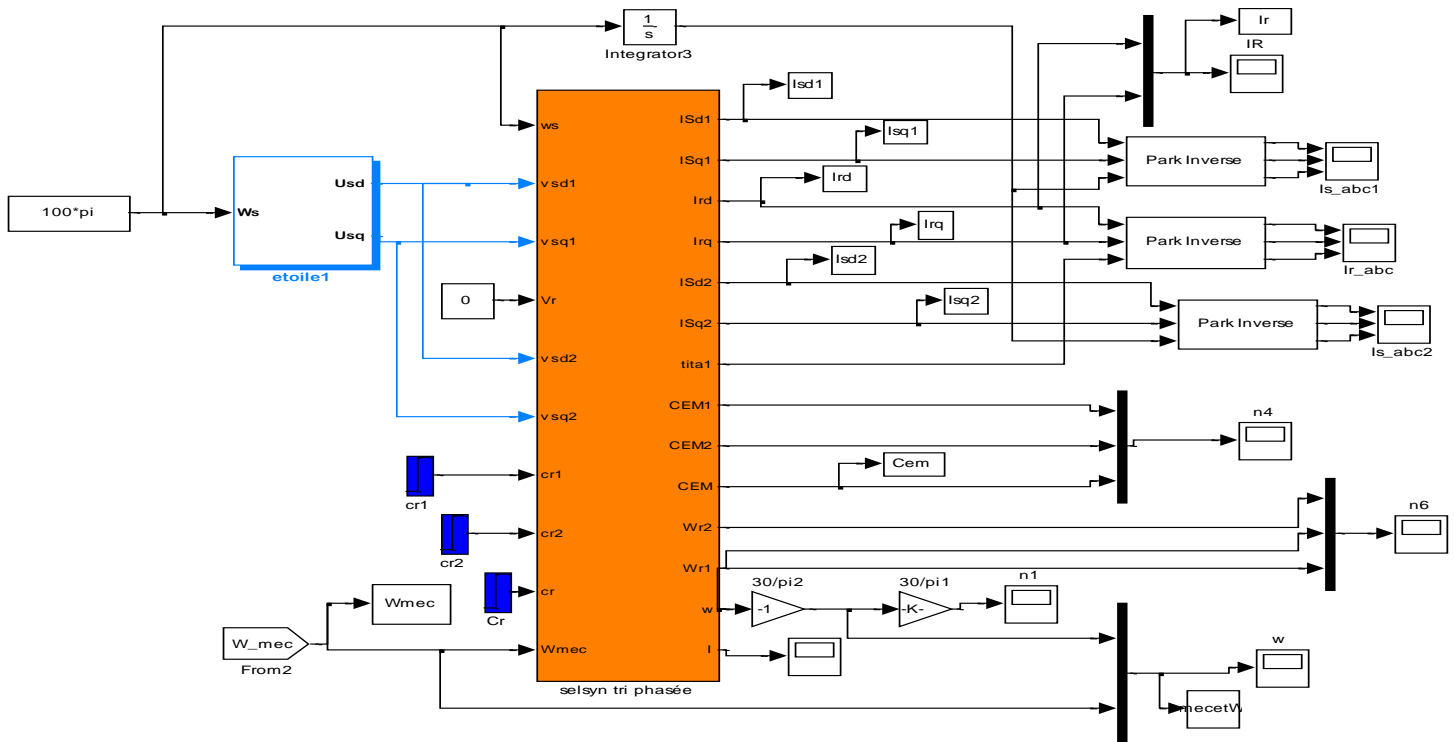


Figure (IV.1) : Schéma bloc de simulation de l'arbre électrique.

Avec: $Cem = p.M(u[3](u[2] + u[6]) - u[4](u[1] + u[5]))$

IV.3. SIMULATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

IV.3.1. COUPLAGE DIRECT ENTRE DEUX MACHINES :

la séquence des phases au niveau de stator et de rotor est la même. Dans ce cas, la condition suivant des courants doit être respectée :

Après l'alimentation des stators des deux machines sous une tension nominale 220 V, on remarque l'existence de courant selon l'axe dq au niveau des stators, figure (IV.2).

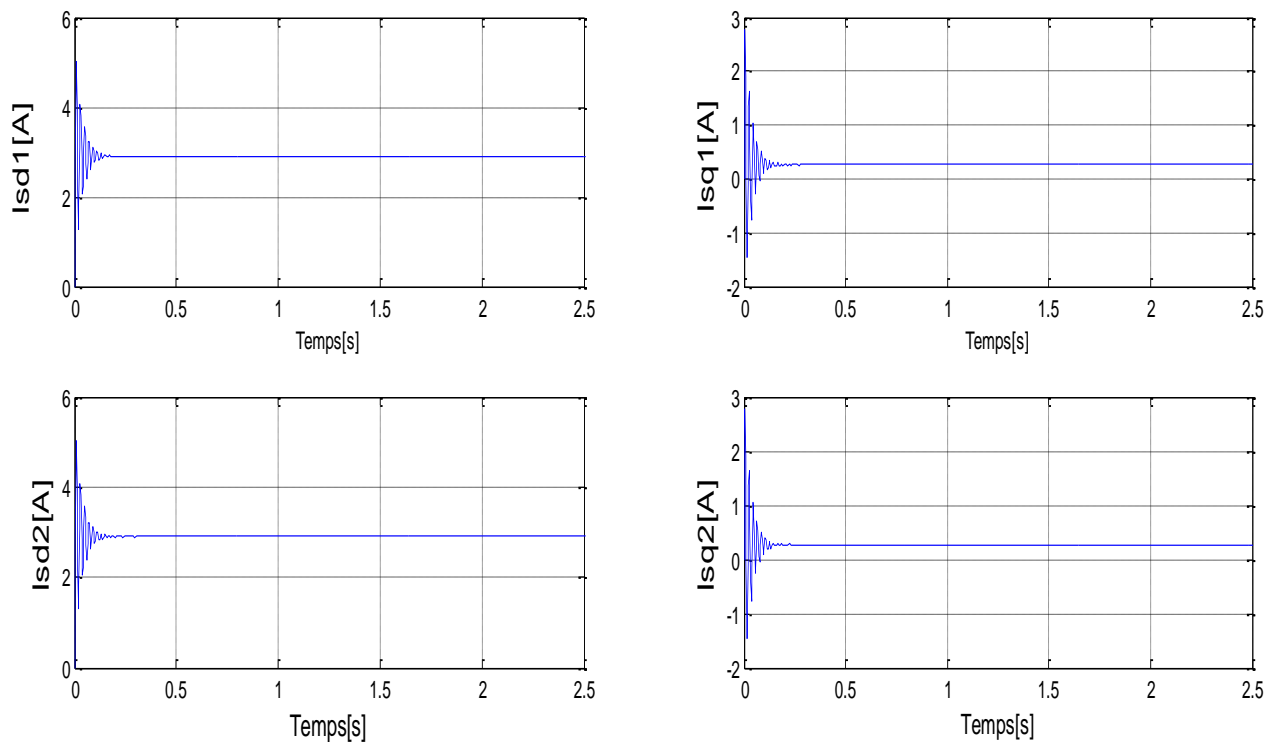


Figure (IV.2) : Les courants statoriques des deux machines.

Par contre au niveau des rotors, les courants sont absents, figure (IV.3) (IV.4). Les couples et les vitesses sont nuls, les machines sont au repos.

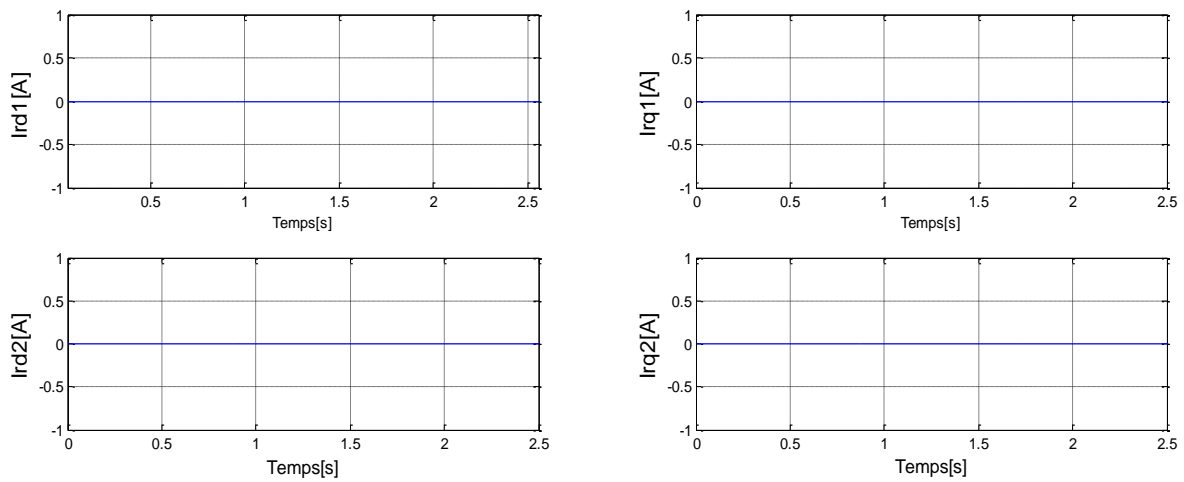


Figure (IV. 3) : Les courants rotoriques des deux machines.

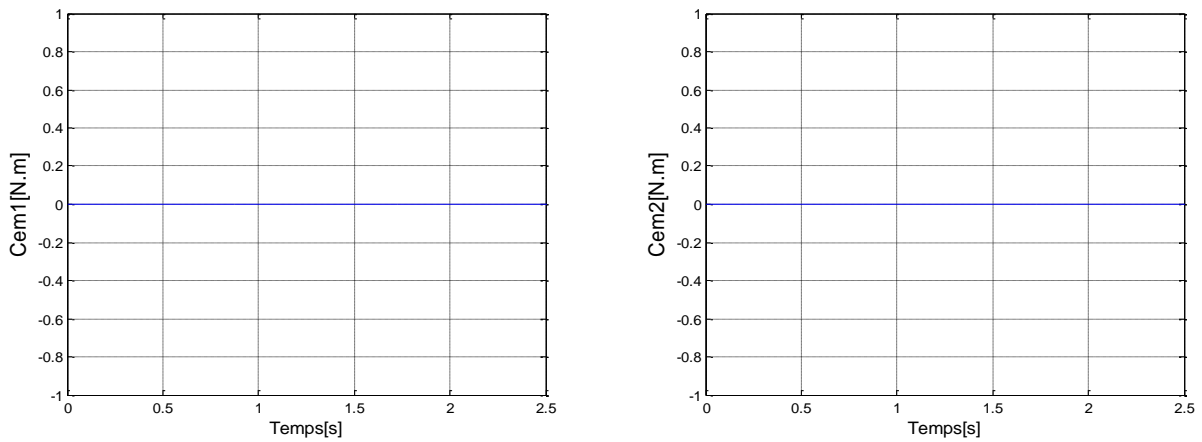


Figure (IV.4) : Couple électromécanique des deux machines.

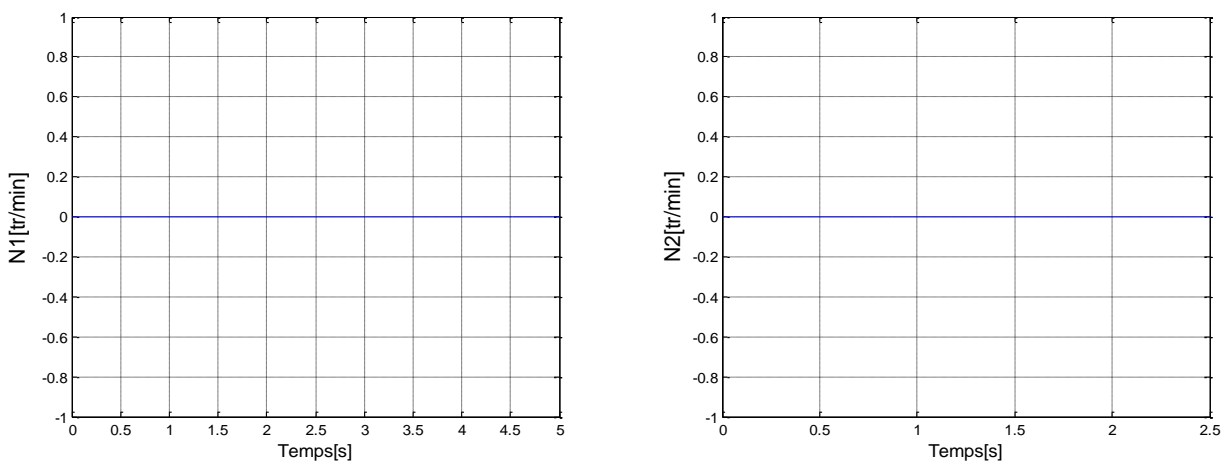
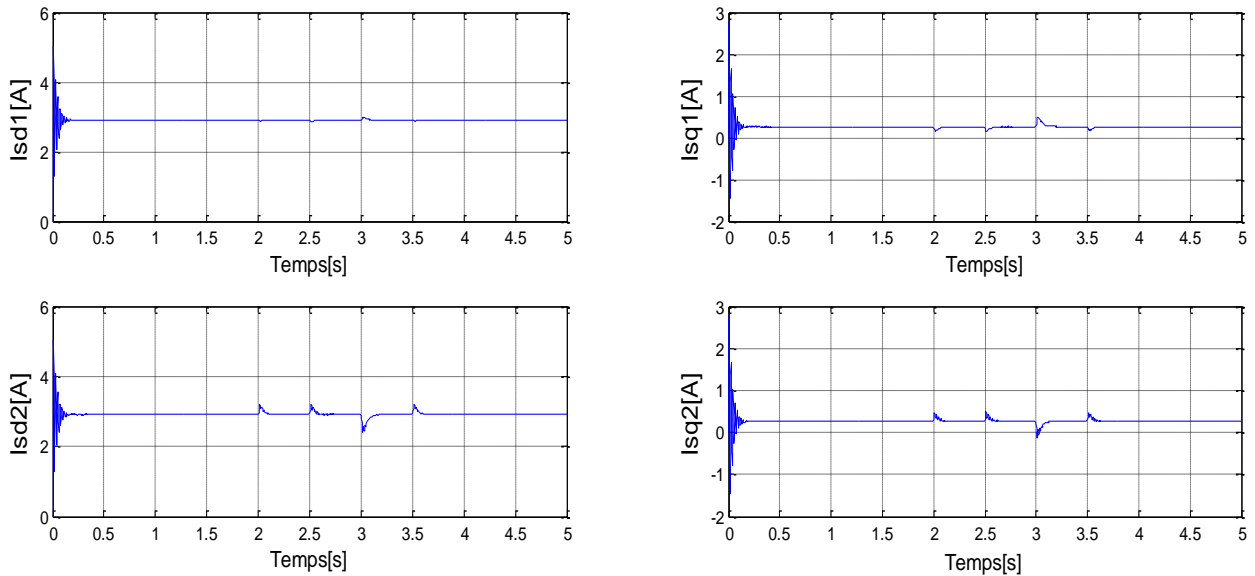


Figure (IV.5) : Vitesse des deux machines.

IV.3.2. ENTRAINEMENT DU TRANSMETTEUR PAR UNE VITESSE

à l'instant $t=2$ s on fait tourner l'arbre du transmetteur dans un sens ou dans l'autre et on remarque la variation des courants statoriques, Figures (IV.6), et l'existence des courants rotoriques représenté sur la figure Figure(IV.7).



Figure(IV.6) : Les courants statoriques des deux machines.

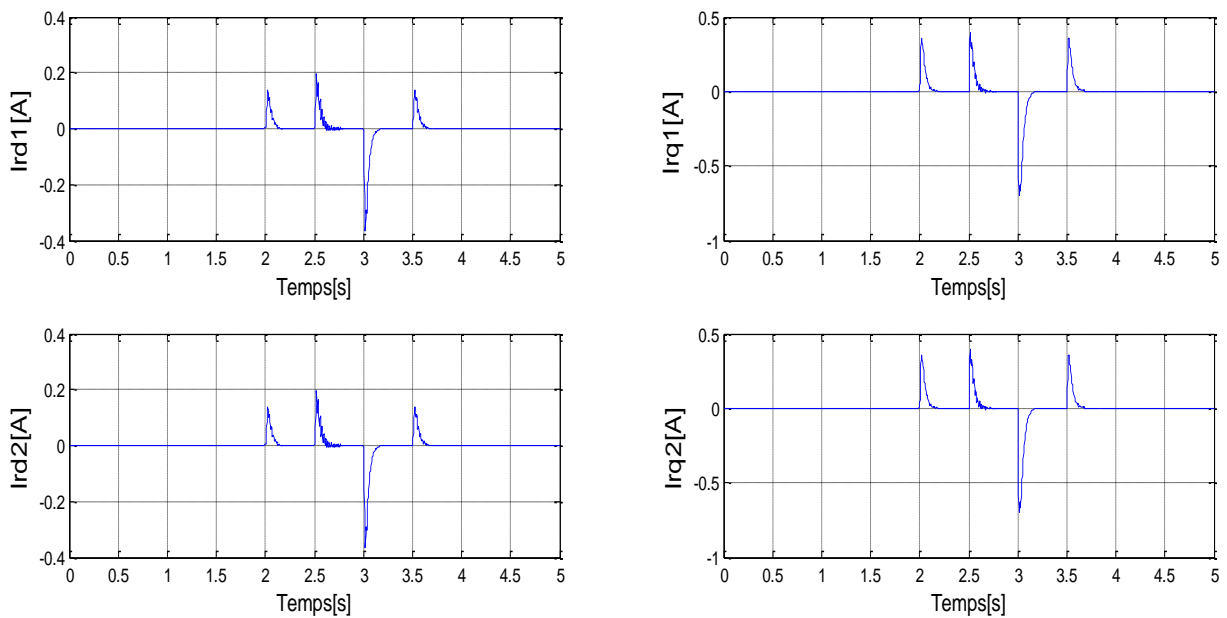


Figure (IV.7) : Les courants rotoriques des deux machines.

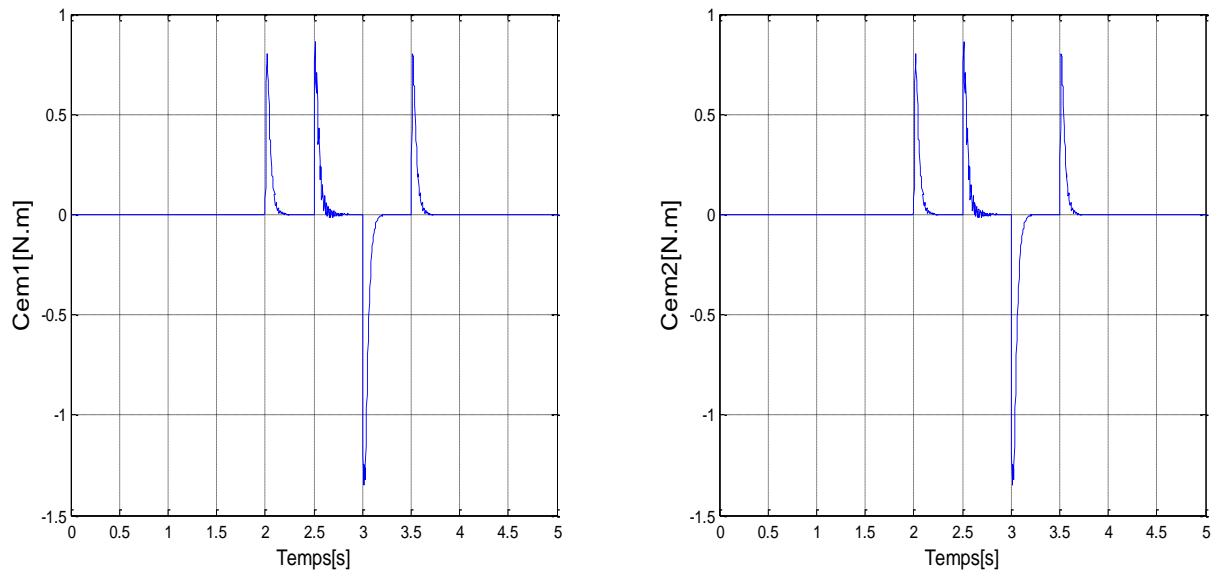


Figure (IV.8) : Couple de la machine après l’entraînement.

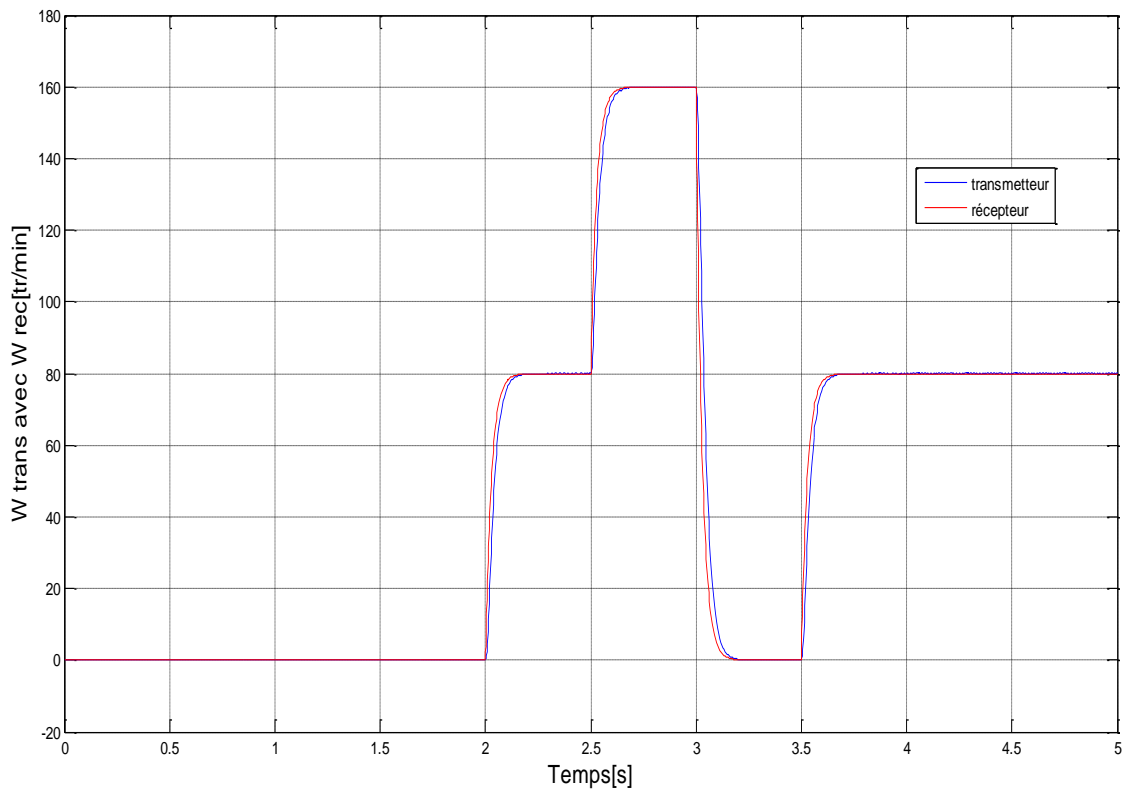


Figure (IV.9) : Vitesse du récepteur après l’entraînement du transmetteur

IV. 3.2.1. INTERPRÉTATION DES COURBES

À l'instant $t=2$, un déséquilibre des f.e.m rotoriques des deux machines a eu lieu donnant ainsi naissance à un courant rotorique dans les deux machines. L'interaction entre les courants statorique et rotorique donne naissance à un couple de réaction au niveau du récepteur, Figure (IV.8), entraînant le rotor dans un sens ou d'un l'autre il s'arrête lorsque la vitesse du transmetteur devient nulle selon la figure (IV.9).

A noter que l'inversion des phases au niveau des stators et des rotors entraîne l'inversion du sens de rotation des deux machines l'une par rapport à l'autre.

IV.3.3. SIMULATION DE COUPLAGE INVERSE AVEC INSERTION DES RÉSISTANCES ROTORIQUE

L'inversement de deux phases rotoriques, engendre une rotation synchronisée normale des deux machines parce que les courants rotoriques de la machine 1 parcourent le rotor de la machine 2, et l'insertion des résistances rotoriques au niveau de la ligne de transmission atténue les courants de démarrage et améliore la synchronisation de vitesse des deux machines.

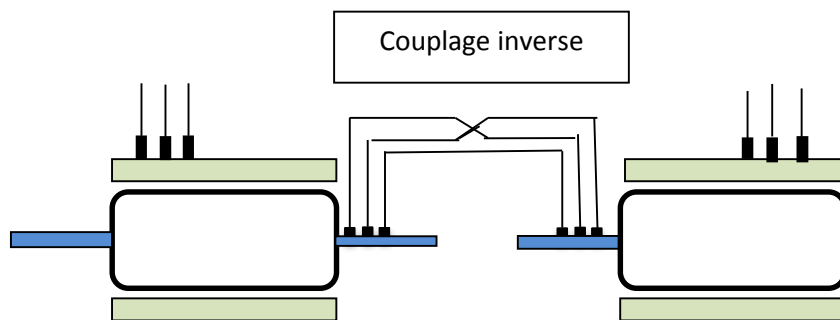


Figure (IV.10) : Schéma de couplage inverse entre deux MADA.

IV.3. 3.1. RÉSULTAT DE SIMULATION

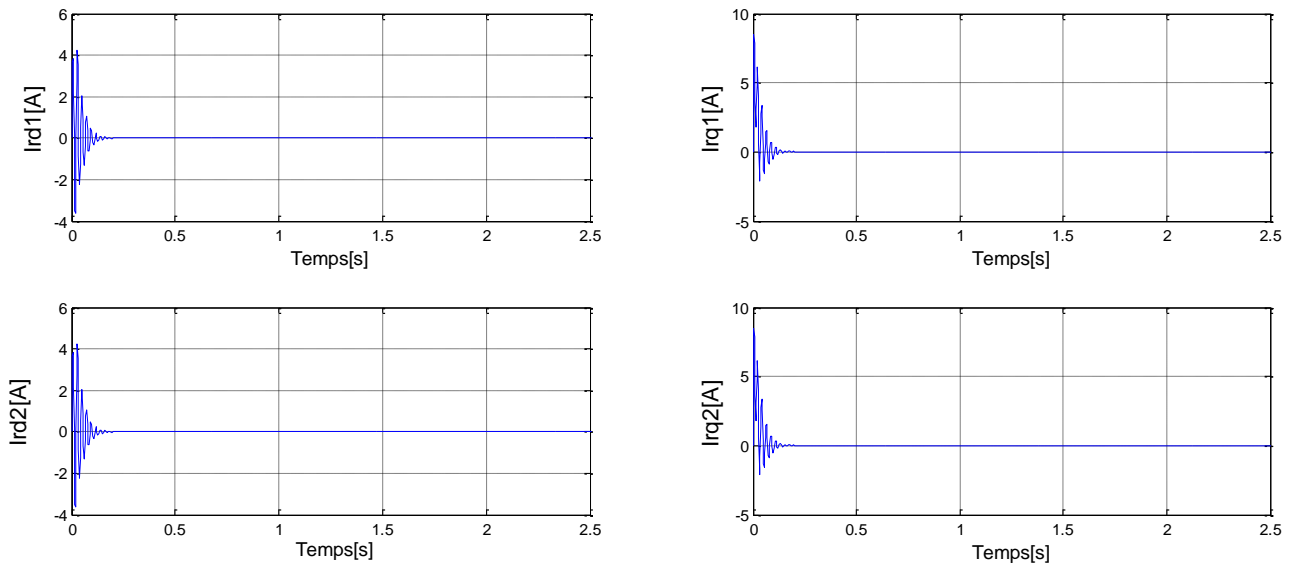


Figure (IV.11) : Les courants rotoriques des deux machines sans résistances.

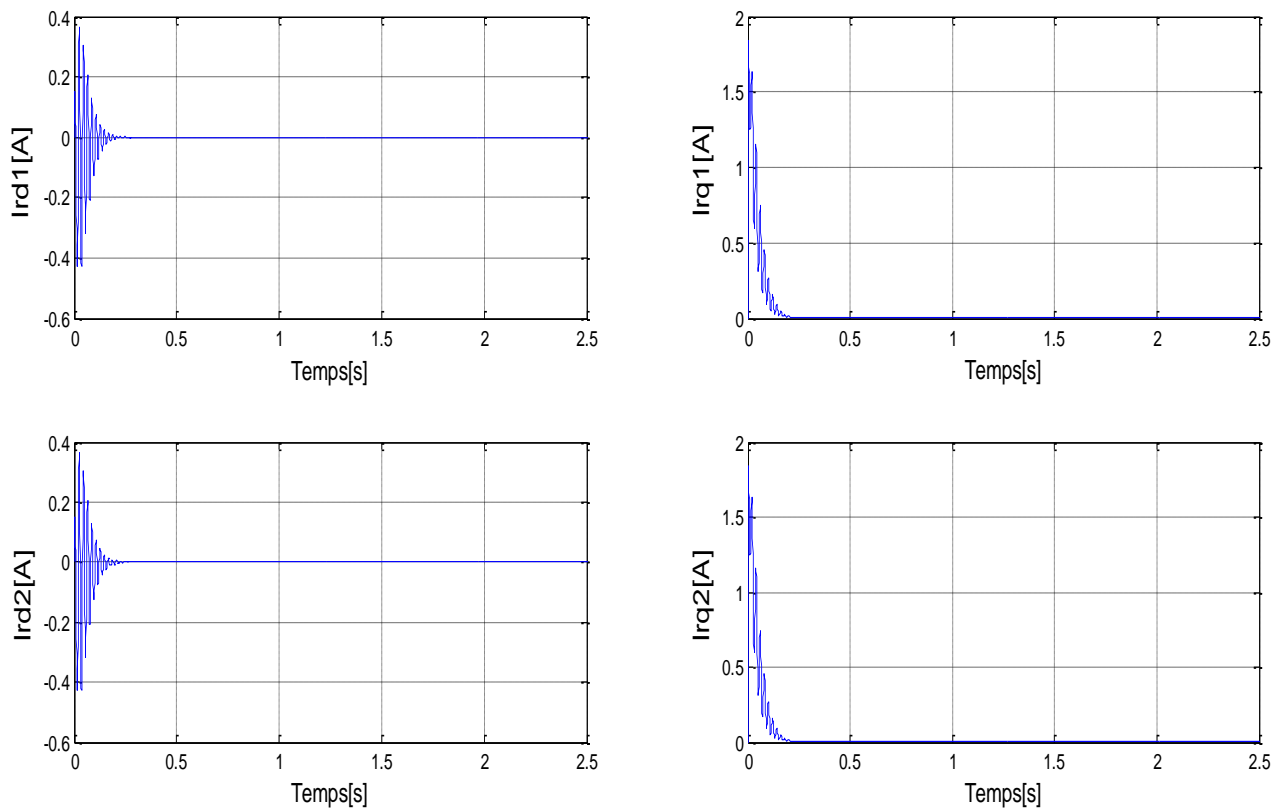


Figure (IV.12) : Les courants rotoriques des deux machines avec insertion des résistances.

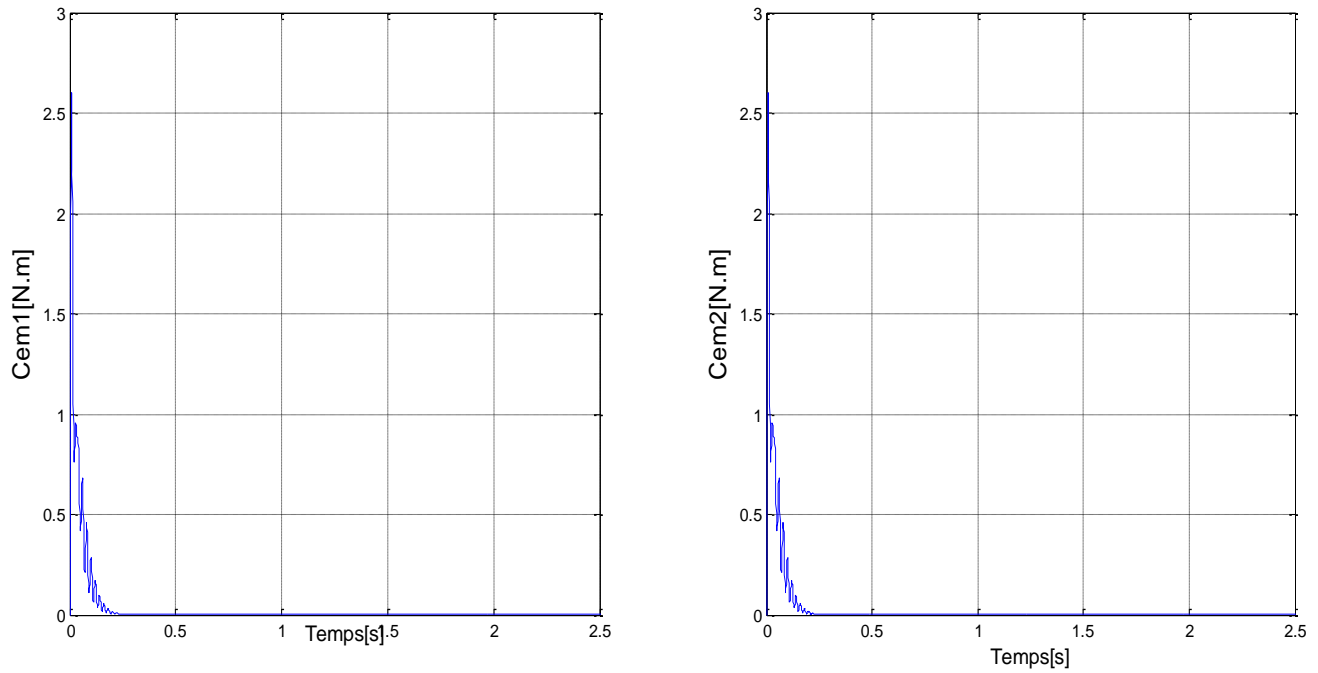


Figure (IV.13): Couple électromagnétique des deux machines sans résistances.

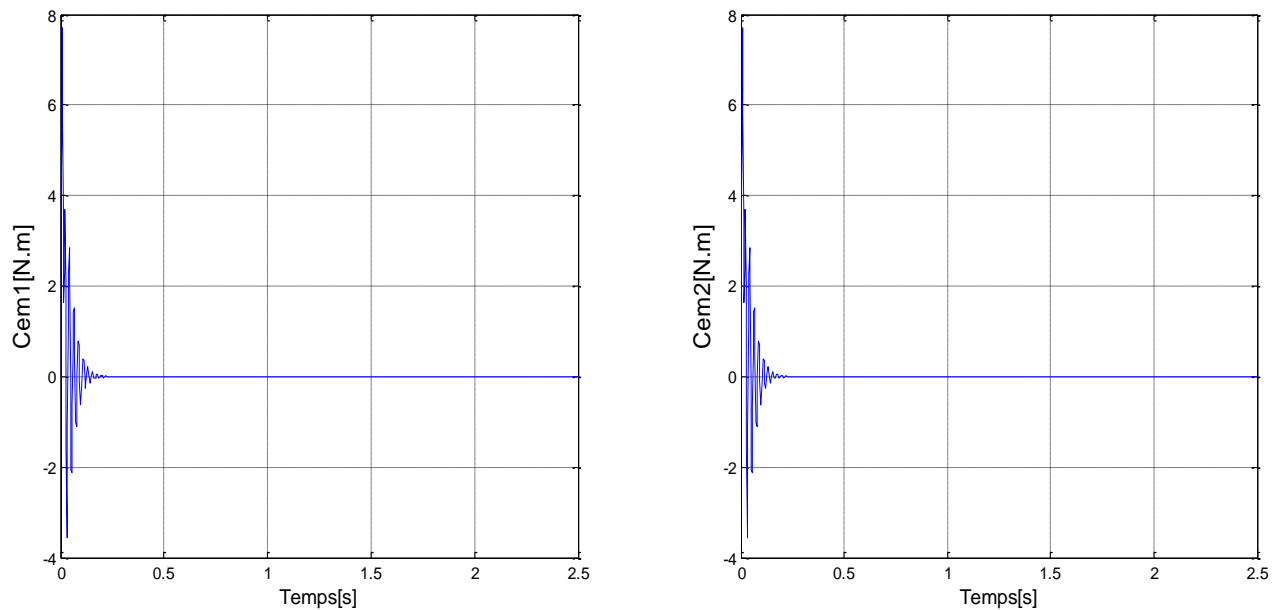


Figure (IV.14): Couple électromagnétique des deux machines avec insertion des résistances.

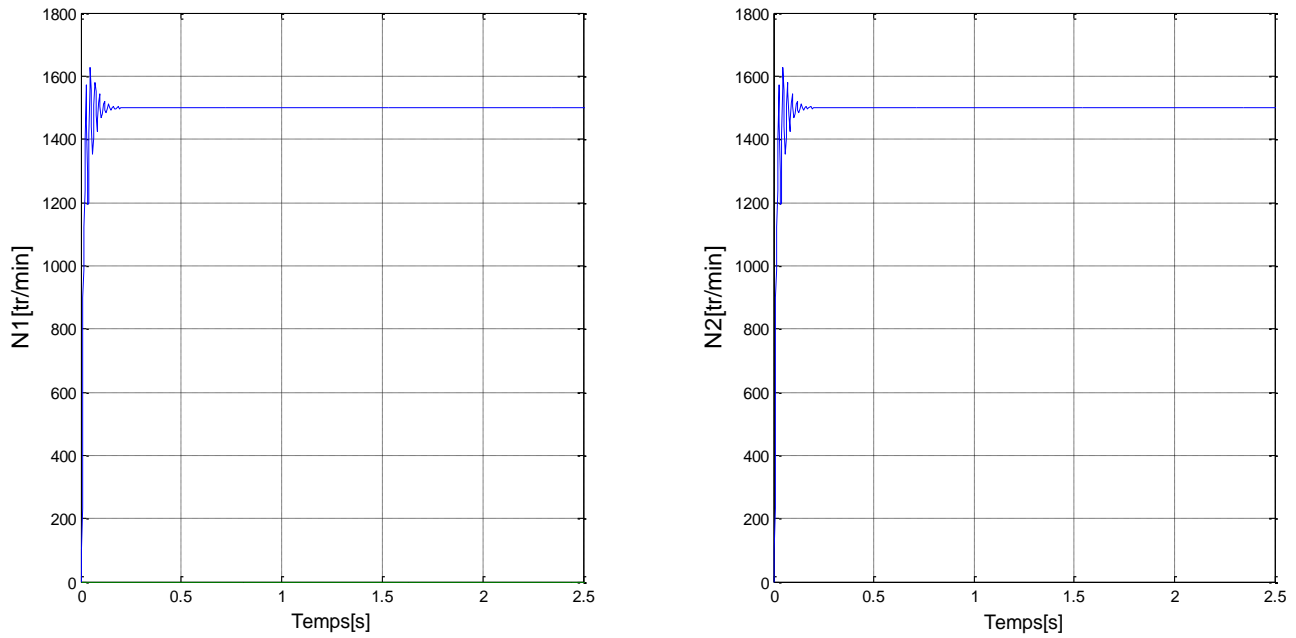
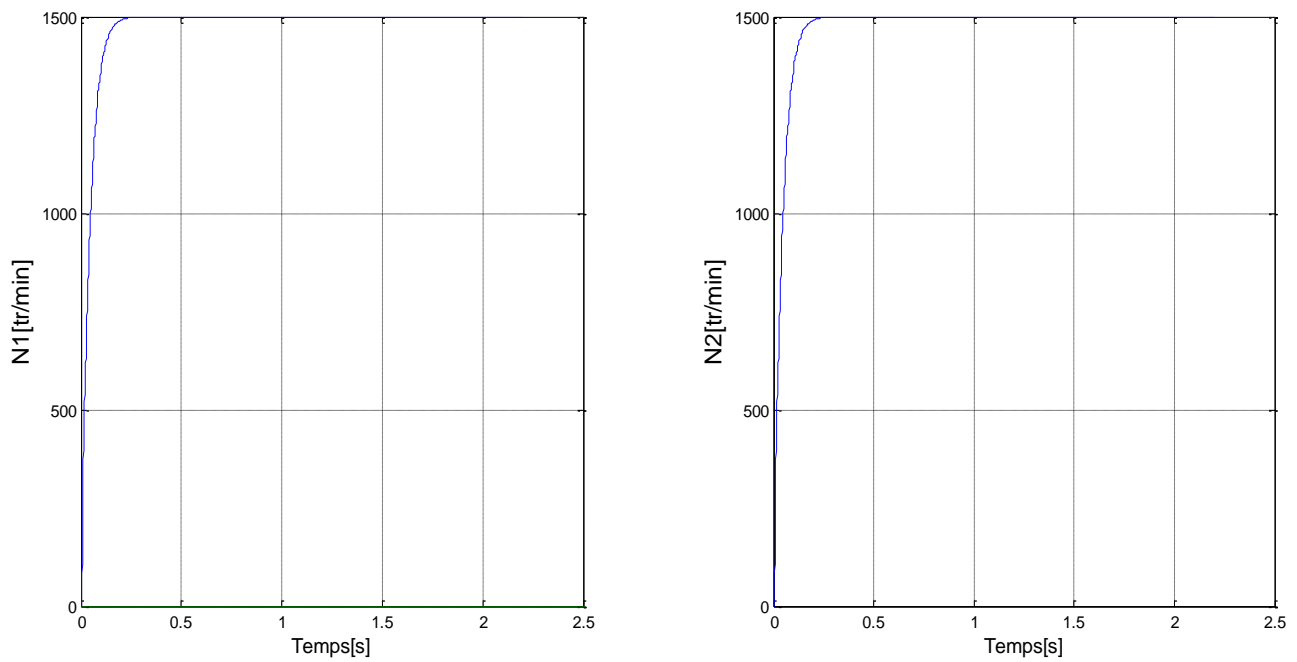


Figure (IV.15) : Vitesse des deux machines sans résistance.



Figure(IV.16) : Vitesse des deux machines avec résistance.

IV.3. 3.1. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Lors de l'inversion de deux phases rotoriques, un courant de circulation synchronisant apparait et les deux machines tournent avec la même vitesse, Figure(IV.9).

L'insertion des résistances dans la ligne de transmission rotorique provoque un démarrage souple, et les ondulations sont éliminées, figure (IV.8).

IV.4. L'ESSAI EXPÉRIMENTAL

Le montage réalisé au niveau du laboratoire de machines électrique nous a permis d'observer le phénomène de transmission de puissance entre deux machines mécaniquement indépendante au repos et lorsque le transmetteur est entraîné.

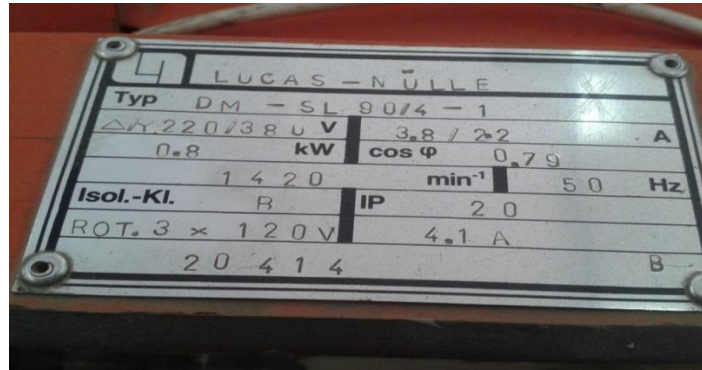
IV.4.1. DESCRIPTION DE LA MACHINE UTILISÉE DANS L'EXPÉRIMENTATION :

la photo de la figure ci-dessous représente la machine asynchrone à rotor bobiné exploitée.



Figure(IV.17) : Photo de la machine asynchrone à rotor bobiné doublement alimentée (P=0.8KW).

La plaque signalétique de la machine



Figure(IV.18) : Plaque signalétique.

IV.4.2. EXPÉRIMENTATION D'UN ARBRE ÉLECTRIQUE TRIPHASÉE À L'AIDE DE DEUX MACHINES ASYNCHRONES À ROTOR BOBINÉ

IV.4.2.1.LA DESCRIPTION DU MONTAGE

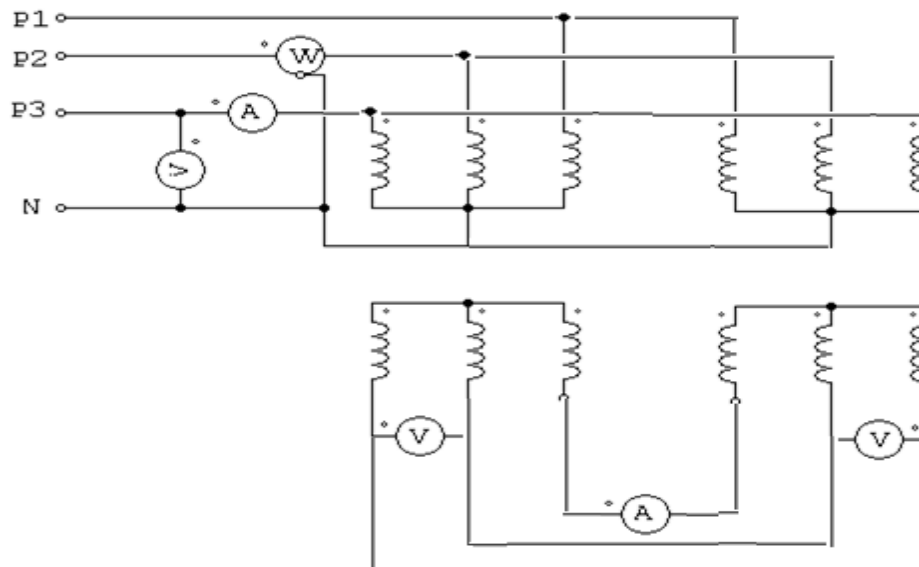


Figure (IV.19) : Schéma de montage d'un arbre électrique.

IV.4.2.2. MATÉRIEL UTILISÉ

- une source de tension triphasée alternative ;
- ampèremètres et voltmètres ;
- deux machines asynchrones triphasées à rotor bobiné de même puissance ;

- wattmètre ;
- tachymètre ;
- un moteur à courant continu pour l'entraînement du transmetteur ;
- alimentation à courant continu ;
- un rhéostat (réglage de flux).

Montage de l'arbre électrique



Figure(IV.20) : Photo de montage arbre électrique.

IV.4.2.3. RÉSULTATS OBTENUS

A l'aide des deux moteurs asynchrones doublement alimentés, on a réalisé le montage de la figure (VI.14).

On alimente les deux machines avec la même source et on relève les résultats suivants :

U	220	180	150	140	120
Is1	3.4	2.3	1.7	1.5	1.3
Is2	3.4	2.3	1.7	1.5	1.3
Ir1	0.22	0.1	0.09	0.085	0.06
Ir2	0.22	0.1	0.09	0.085	0.06
N1	0	0	0	0	0
N2	0	0	0	0	0

Tableau 1

IV.4.2.4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

En alimentant les deux machines à l'aide d'un réseau triphasé identique où Les deux rotors sont liés électriquement avec le respect des phases (couplage direct), on remarque que les machines sont au repos et les paramètres courants rotoriques vitesses et couples sont nuls puisque les F.E.M au niveau des rotors sont égales et opposées.

IV.4.3. ESSAI EN CHARGE

Dans ce cas, le récepteur est relié à une charge importante de telle manière à ce que les deux machines restent bloquées (court-circuit). Les résultats de l'expérience sont représentés sur le tableau ci-dessous montrant l'existence de courants au niveau des rotors et des stators donc d'un couple. Cependant la vitesse est nulle.

U	Is1	Is2	Ir1	Ir2	N1	N2	P1	P2	Q1	Q2
100	2.2	1.5	1.5	3	0	0	50	50	140	140

Tableau 2

IV.4.3.1. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

On remarque sur les résultats de tableau 1, qu'aucun mouvement sur les deux arbres des deux machines n'est observé. A chaque fois qu'on applique manuellement un mouvement (angle) arbitrairement dans un sens ou d'un l'autre, on remarque que l'autre arbre (récepteur) prend le même angle appliqué sur le transmetteur.

Dans le cas d'inversement de deux lignes de couplage entre les rotors, tant que l'alimentation des deux machines existe, on remarque que les deux rotors tournent avec une même vitesse.

En appliquant un mouvement sur le transmetteur et en freinant le récepteur (charge), on remarque que le courant rotorique croît pour des charges importantes.

IV.4.4. ESSAI DE COUPLAGE AVEC INSERTION DE RÉSTANCES AU ROTOR

On insère des résistances au rotor dans la ligne de transmission. Dans ce cas, les deux machines marchent au synchronisme comme dans le cas d'inversement de deux phase rotorique à cause du court-circuit dans la ligne de transmission.



Photo (3) : Montage de l'arbre électrique par insertion des résistances au niveau de la ligne de transmission.

IV.5. CONCLUSION

On a présenté dans ce chapitre, la simulation du couplage de deux MADA électriquement (arbre électrique), où les deux machines sont alimentées en tension, et couplées électriquement par une ligne de transmission entre les rotors. Les expériences effectuées au niveau du laboratoire de machines électrique avec des couplages directs et inverse confirmant les résultats obtenus par simulations.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but de ce mémoire consiste à étudier la liaison électrique entre deux machines à rotor bobiné afin de l'exploiter dans des applications à vitesse variable et de synchronisation. Pour cela, on a traité tous les aspects qui englobent le développement d'un tel système, sa modélisation, l'analyse de son fonctionnement, etc....

Nous avons présenté une étude approfondie sur le fonctionnement de la machine dans les systèmes synchro, leur classifications et leur utilisations selon un critère de fabrication avec ou sans contacts. Sachant que l'arbre électrique qui nous cherchons à modéliser est basé sur le couplage électrique de deux machines asynchrones à rotor bobinée, nous avons modélisé la MADA en modes moteur et générateur.

On a élaboré une étude théorique des SELSYNS monophasé et triphasé, ainsi qu'un modèle de SELSYNE triphasé.

Nous avons aussi étudié le phénomène de l'arbre électrique. Une comparaison entre la modélisation et l'expérimentation du système a permis de confirmer les résultats obtenus.

Les observations qu'on peut en tirer sont:

- L'absence de contact bague-balais dans les SELSYNS augmente sa fiabilité ;
- L'étude effectuée dans le premier chapitre démontre que les avantages des SELSYNS dépendent du type de couplage électrique des deux rotors, ou des deux stators.

Avant de clôturer, quelques suggestions et perspectives peuvent être faites :

- L'élaboration d'un modèle de simulation pour un transmetteur et plusieurs récepteurs ;
- L'introduction d'une commande du système où l'une des machines est exploitée comme machine de commande, alors que l'autre comme machine de puissance.

Annexe

PARAMÈTRES DE LA MADA UTILISÉ DANS CE MÉMOIRE

Valeur nominale : 0.8 KW, 220/380V, 50 Hz, 3.8/2.2 A

Connexion du rotor – étoile 3*120V , 4.1 A 1420 tr/min.

- Puissance : $P = 0.8 \text{ KW};$
- La tension : $U_s = 220 \text{ V};$
- Résistance statorique: $R_{s1} = R_{s2} = 11.98 \quad \Omega;$
- Résistance rotorique: $R_{r1} = R_{r2} = 9.04 \quad \Omega;$
- Inductance cyclique statorique: $L_{s1} = L_{s2} = 0.414 \quad \text{H};$
- Inductance cyclique rotorique: $L_{r1} = L_{r2} = 0.0556 \quad \text{H};$
- Inductance cyclique mutuelle: $M_1 = M_2 = 0.126 \quad \text{H};$
- Le nombre de paires de pôles est: $p_1 = p_2 = 2.$

CONSTANTES MÉCANIQUES DE LA MADA

- Moment d'inertie : $J_1 = J_2 = 0.01 \text{ kg.m}^2;$
- Coefficient de frottement visqueux : $f_1 = f_2 = 0 \text{ N.m.s/rd.}$

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **R.Abdessemed**, « Modélisation et simulation des Machines Électriques, » Editions Ellipses ,2011.
- [2] **Jean.Pierre caron –jan.paul Hantier**, « Modélisation et commande de la machine asynchrone, » Edition technip – pais 1995.
- [3] **Hakime bennani**, « Machine asynchrone à double alimentation les lois de command en régime permanent, » doctorat, UNIV LAVAL Québec 2011.
- [4] **André Genon, willy legros, :** « Machine électriques, » Paris, hermès science publication, 2000.
- [5] **Khettache Laid**, « Étude et Commande d'un Système Éolien à Base d'une Machine Électrique Double Alimentée, » Magister en Électrotechnique, université de Batna 2007.
- [6] **kostanko et L.Pitrovski**, « machine électrique, tome II : machine à courant alternatif, » Edition Mir. Moscou1979.
- [7] **Said Drid**, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'un machine à induction double alimenté à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation, » Thèse doctorat, l'Université de Batna, Algérie ,2005.
- [8] **Ayche Mohamed**, « étude des procédés des freinages des moteurs asynchrones triphasés par les automates programmables industriels (a.p.i.), » Ingénieur d'état en génie électrotechnique, université de M'sila 2007.
- [9] **M-A.Ivanov semolenski**, « machine électriques, » Edition Mir Moscou 1983.
- [10] **Rouabhi Riyadh**, « Étude et commande de la machine asynchrone à double alimentation application énergie éolien, » Magister en Électrotechnique, université Sétif, Algérie ,2012.
- [11] **Boucetta Abd allah**, « Étude des générateurs éoliens bases sur les machines asynchrones a rotor bobine, », Université de Batna Algérie ,2011.
- [12] **Handy Fortine Blanchette**, « Modélisation de la machine asynchrone a rotor bobinée, » document en ligne, 2011/5/10.
- [13] **Fenni Atmane**, « Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), » Magister en Electrotechnique , Univ-Biskra Algirie ,2013.

Bibliographie

- [14] **Youcef Bekakra**, « Contribution à l'Étude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation, » 3^{ème} édition, avec la collaboration de Gilbert Dybille, Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [15] **Rihani Lazhar**, « Modélisation et Commande de la Génératrice à Induction Double Alimentée Couplée sur un Réseau Électrique, » mémoire de magister. Univ-Batna -Algérie, 2012.
- [16] **S.J. Fattahi, A.A. Khayyat**, « Direct Torque Control of Brushless Doubly Fed Induction Machine, » Sharif University of Technology, International Campus, Kish Island, Iran International Journal of Control and Automation Journal of Control Vol. 3 No. 4, Vol. 3 No. 4, December, 2010.
- [17] **Gaafazi Abdesslam**, « Contribution À la Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentations (MADA), » Université Ziane Achour - Djelfa 2011 ingénieur d'état en électrotechnique.
- [18] **Bennour Cherif**, « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation, » Magister en Électrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra 2012.
- [19] **Dendouga Abdelhakim**, « Contrôle des puissances active est réactive de la machine à double alimentation (DFIM), » doctorat en électrotechnique, batna 10/02 /2010.
- [20] **Noureddine Lahcéne**, « Diagnostic de défaut au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil, », école national polytechnique 2005.
- [21] **Sgir Khojet Elkhil**, «Commande vectoriel d'une machine asynchrone doublement alimenté (MADA),», l'institut National Polytechnique de Toulouse 2006.
- [22] **Paul-Etienne VIDAL**, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation, » Docteur de l'institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [23] **Bendemmagh Walid**, «Commande de la machine asynchrone par la cascade hyposynchrone à base des logiciels SIMPLORER et MATLAB, » Magister En Électrotechnique, Université Ferhat Abbas - Sétif, Algérie 2012.
- [24] **Telli Abderrahim**, « Étude et commande d'une éolienne a vitesse variable intégrée au réseau MT, » Magister en électrotechnique, université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2012.

Bibliographie

- [25] **Rachide Azaizia**, « Étude et commande d'une machine asynchrone double alimentation alimentée par convertisseur multi niveau, » Magister en électrotechnique, université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2012.
- [26] **Georges Salloum**, « Contribution A la Commande Robuste de la Machine asynchrone a Double Alimentation » Docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse 2007.
- [27]: **Abdoulaye Mamadie Sylla**, « Modélisation d'un Émulateur Éolien à base de Machine Asynchrone à double Alimentation, » Maîtrise en Génie Électrique, Université du Québec, 2013.
- [28] **Tir Zoheir**, « Contribution à l'étude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade, » mémoire de magister. University Ferhat Abbas de Setif -Algeria, (2010).
- [29] **Deacounu Sorinioan**, «Electrical Shaft Scheme With static Frequency converters SFC and asynchronous machines with short circuit rotor » Univ- polytechnic Timisoara.
- [30] **Jhone Chisson**, «Modeling and high performance control of electric machine,» IEEE series power engineering, m. e. el-hawary, series editor.
- [31] **Daniel Dixneuf**, «Principes d'électrotechnique, cour et exercice corrigés,» Moog Components Max m.Mrty Institut nationale Polytechnique de Toulouse, école nationale d'ingénieur de Tarbes, Delphine Garcia Gilbert prof au lycée Déodat de Séverac.
- [32] **Ali S Akayla, and salah. M. Abdallah**, « The system of synchronous rotation in the base of electromagnetic working shaft with insertion capacitance in the rotor coils, » **altafela, Jordan** j. j. Appl. Sci., 2005:Vol. 7, No.1.
- [33] **Amar Maafa**, « Influence du décalage des stators sur les harmoniques dans une cascade de deux machines asynchrones, » The INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS & OIL: FROM THEORY TO APPLICATIONS March 05-06, 2013, Ouargla, Algeria.
- [34] **Yongchang Zhang, Zhengxi Li**, « A Cascaded Brushless Doubly Fed Induction Generator for Wind Energy Applications Based on Direct Power Control, »Faculty of Engineering and Information Technology, University of Technology Sydney, NSW 2007, Australia.
- [35] **Leanader W. Matsch**, « Electromagnetic & electromechanical Machines, » second Edition, IEP. A Dun Donnelly publisher .New York copyright c 1977, 1972 By Thomas y, Growell company,INC

Bibliographie

- [36] **Tony R.kuphaldt**, « lessons in electric circuit, » volume II-AC, sixth edition, last update, july25 .2007.
- [37] **Panama Canal Commission**, «Slave Motors. In: The Panama Canal Review, ». Vol. 13, No. 12, 1963, **online**.
- [38] **David A. Mindell**, «Between Human and Machine. Feedback, Control, and Computing before Cybernetics, ». Johns Hopkins University Press, 2004.
- [39] **G. Ghidus, A. Simion, L. Livadaru, S. Mihai**, «Analytic Method for Determination of the Amplitude-Phase Transmission Errors between SELSYNS, » In 10 th International Conference on Development and Application Systems. Suceava, Romania, 27.–29. Mai 2010.
- [40] **Dennis Horwitz**, « Overview of Position Feedback Sensors Available for Bridges and Other HMS Projects ». In: HMS Symposium. Newbury Park CA 93003 USA. November 2008.
- [41] **Richard J. Bliss**, «Navy Electricity and Electronics Training Series, » Module 15 – Principles of Synchros, Servos, and Gyros. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center (Hrsg.), 1998.
- [42] **Moog Components**, « Synchro and Resolver Engineering Handbook, ». Group 2004 (Présentation d'un fabricant de résolveurs de produit, consulté le 5 Décembre 2012).
- [43] **F. Postlethwaite**, « Review of Remote Indicating Systems for Aircraft Instruments, », communicated by the principal director of scientific research, 1945.
- [44]: **L. M. Nowachi**, « Induction motor as SELSYNE drive» associate, » A.IEEE general elec. Co. shenectady, N.y.
- [45]: **Daniel Sharon**, « Differential electrical shaft combined with a double Kramer cascade, » IEEE, transaction on industry applications vol. I A- 12.NO.03, 1976
- [46]: **RADAR CIRCUIT ANALYSIS**, « SELSYNS and Servomechanisms » CHAPTER 13, **on line**.
- [47]: **Dugneton Pierre**, « Le Transformateur à Fréquence Variable, » Maîtrise ès sciences appliquées, École polytechnique de Montréal 2009.
- [48] **Gabriel Ghidus, Alecsandru Simion**, « Analytic Method for Determination of the Amplitude-Phase Transmission Errors between SELSYNS, » 10th International Conference on DEVELOPMENT AND APPLICATION SYSTEMS, Suceava, Romania, May 27-29, 2010.

Bibliographie

[49] www.moog.com, « Synchro and Resolver, » Engineering Handbook, MOOG Components Group, 2004.