

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Électrique



Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

specialité : Machine électrique

Thème :

Étude par simulation d'une génératrice asynchrone double étoile
en fonctionnement autonome

Réalisé par :

Mr : BERKANE Tahar

Mr:KHALED Foudil

Encadré par :

Mme : CHEKKAL Samira

Mr: AOUZELLAG Djamel

Members de jury

Mr:

Mr:

Promotion 2018/2019

REMERCIEMENTS

ON TIENT TOUT PARTICULIÈREMENT, À EXPRIME NOTRE PROFONDE
GRATITUDE À MONSIEUR DJAMEL AOUZELLAG, PROFESSEUR À
L'UNIVERSITÉ DE BEJAÏA, ET MADAME SAMIRA CHEKKAL, DOCTEUR À
L'UNIVERSITÉ DE BEJAÏA POUR LES CONSEILS PRÉCIEUX, LA
CONFIANCE ET L'AIDE QU'ILS NOUS ACCORDÉ POUR MENER CE
TRAVAIL À TERME.

IL NOUS EST AGRÉABLE DE POUVOIR EXPRIMER NOS REMERCIEMENTS
ENVERS LES MEMBRES DU JURY POUR L'HONNEUR QU'ILS NOUS ONT
FAIT EN ACCEPTANT D'EXAMINER CE TRAVAIL.

ENFIN, QUE TOUS CEUX QUI NOUS ONT AIDÉ ET SOUTENU DURANT TOUT
NOTRE PARCOURS TROUVENT ICI L'EXPRESSION DE NOS
REMERCIEMENTS LES PLUS SINCÈRES.

DEDICACE

*À MES PARENTS AVEC TOUTE MA GRATITUDE POUR TOUTES
CES ANNÉES DE SACRIFICES ET D'ENCOURAGEMENT*

À MES FRÈRES

ET À TOUTE LA FAMILLE KHALED

À TOUS MES ENSEIGNANTS

À TOUS MES AMIS.

DEDICACE

À TOUTE LA FAMILLE

À TOUS MES AMIS.

BERKANE ...

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
I. Chapitre 1 : généralité sur les systèmes autonomes.....	2
I.1 Introduction.....	2
I.2 Définition d'un système autonome ou/et isolé	2
I.3 Raison d'avoir un système autonome	3
I.4 Différents systèmes autonomes.....	3
I.4.1 Générateur éolien	3
I.4.2 Système photovoltaïque.....	4
I.4.3 Groupe électrogène.....	5
I.4.4 Réseaux embarqués	8
I.5 Différentes machines utilisées dans ces systèmes.....	9
I.5.1 Machine à courant continu	9
I.5.2 Machine synchrone	10
I.5.3 Machine asynchrone	Erreur ! Signet non défini.
I.5.4 Machines multi phases.....	13
I.5.5 Différence entre la machine multi phase et double étoile.....	15
I.6 Amorçage de la génératrice asynchrone triphasée.....	15
I.7 Conclusion	16
II. Chapitre II : Modélisation des différents systèmes étudié.....	17
II.1 Introduction.....	17
II.2 Description de la machine asynchrone à double étoile	17
II.3 . Hypothèses simplificatrices	18
II.4 Modèle triphasé de la MASDE sur les axes réels.....	18
II.4.1 Équations électriques	19
II.4.2 Équations magnétiques	21
II.4.3 Équation mécanique.....	22
II.5 Modèle biphasé de la MASDE	23
II.5.1 Transformation de Park.....	23
II.5.2 Application de la transformation de Park à la MASDE	25
II.6 Simulation et interprétation des résultats	28
II.7 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande M.L.I.....	32
II.7.1 Modélisation de l'onduleur	32
II.7.2 Commande par modulation sinus-triangle.....	33

II.7.3	Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI	35
II.7.4	Simulation et interprétation des résultats	36
II.8	Conclusion	38
III.	Chapitre III : Étude par simulation d'une génératrice asynchrone double étoile en fonctionnement autonome	39
III.1	Introduction.....	39
III.2	Description de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE)	39
III.3	Modèle de la GASDE dans le repère de Park (d,q)	40
III.4	Choix du référentiel.....	40
III.4.1	Équations électrique.....	41
III.4.2	Équations magnétiques	41
III.5	Phénomène d'auto-amorçage.....	43
III.5.1	Détermination de la valeur des capacités d'auto amorçage.....	44
III.5.2	Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE	44
III.6	Modélisations des charges statiques	45
III.6.1	Charges résistives	45
III.6.2	Charge resistive inductive	45
III.6.3	Charge résistive avec compensation série	46
III.6.4	Charge résistive-Inductive avec compensation série	47
III.7	Simulation et interprétation des résultats	47
III.7.1	Fonctionnement à vide et en influence de la capacité d'auto-amorçage.....	48
III.7.2	Fonctionnement en charges purement résistives.....	51
III.7.3	Fonctionnement en charges résistives-inductives	53
III.7.4	Fonctionnement en charges résistives avec compensation série.....	57
III.7.5	Fonctionnement en charges résistives-inductives avec compensation série	60
III.8	Influence de la variation de la vitesse	63
III.9	Régulateur de la vitesse de GASDE.....	64
III.9.1	Régulation de la vitesse de fonctionnement en charge purement résistive.....	65
III.9.2	Régulation de la vitesse de fonctionnement en charges résistives-inductive	67
III.9.3	Régulation de la vitesse de fonctionnement en charge capacitive.....	69
III.9.4	Simulation de GASDE a charge résistive, en fixe l'étoile 1 et varier l'étoile 2.....	71
III.10	Conclusion	73
	Conclusion générale	74

Liste des figure

Chapitre I

Fig I. 1 Différents systèmes autonomes	2
Fig I. 2 Éoliennes à axe horizontal et verticale	4
Fig I. 3 Système de pompage solaire.....	5
Fig I. 4 Différents groupes électrogènes.....	6
Fig I. 5 Installation électrique d'une voiture	8
Fig I. 6 Coupe d'une machine à courant continu.....	10
Fig I. 7 Moteur à aimants permanent en géométrie cylindrique.....	10
Fig I. 8 Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents.....	11
Fig I. 9 Machine asynchrone à reluctance variable en fonctionnement autonome.....	11
Fig I. 10 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	12
Fig I. 11 Machine asynchrone à rotor bobiné.....	13
Fig I. 12 Exemple d'application d'une machine asynchrone à 6 phases.....	14
Fig I. 13 Auto-amorçage d'une génératrice asynchrone triphasé en fonctionnement autonome	16

Chapitre II

Fig II. 1 Représentation schématique des enroulements de la MASDE.....	19
Fig II. 2 Représentation du modèle de la MASDE selon les axes (d, q)	25
Fig II. 3 Performances de la MASDE	31
Fig II. 4 Schéma de l'onduleur triphasé	33
Fig II. 5 Principe de la commande par M.L.I sinus-triangle	35
Fig II. 6 MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI.....	35
Fig II. 7 Évolutions des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs, suivis de l'application des charges $C_r = 14\text{N.m}$, -14N.m respectivement entre les intervalles de temps $[3,5]\text{s}$ et $[7,10]\text{s}$	37

Chapitre III

Fig III. 1 Système de conversion d'énergie basée sur la GASDE	40
Fig III. 2 Schéma du phénomène d'auto-amorçage.....	44
Fig III. 3 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement à vide	51
Fig III. 4 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges purement résistives.....	53
Fig III. 5 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistives- inductives	56
Fig III. 6 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistives avec compensation série	59
Fig III. 7 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistives- inductives avec compensation série.....	62
Fig III. 8 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement de la variation de la vitesse	64
Fig III. 9 Représentation schématique du système régulé.....	65
Fig III. 10 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistives avec une régulation de vitesse	67
Fig III. 11 représente l'évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistive- inductive avec une régulation de vitesse.....	69
Fig III. 12 représente l'évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges capacitive avec une régulation de vitesse.....	71
Fig III. 13 représente l'évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistive fixé dans l'étoile 1 et variable dans l'étoile 2.....	73

Liste des tableaux

Chapitre III

TAB III. 1 Influence de la capacité d'excitation C.....	48
TAB III. 2 Influence de la charge résistive R.....	51
TAB III. 3 Influence de l'inductance L_{ch}	54
TAB III. 4 – Influence de la capacité de compensation C_{cse} en série avec les charges résistives.....	57
TAB III.5 – Influence de la capacité de compensation C_{cseL} en série avec la charges résistives-inductives	60
TAB III.6 – Influence de la variation de vitesse sur les performances de la GASDE.....	63
TAB III.7 – Influence de la charge résistive R avec une régulation de vitesse	66
TAB III. 8 – Influence de la charge inductive avec une régulation de vitesse	68
TAB III.9 – Influence de la charge capacitive avec une régulation de vitesse.....	70

Liste des symboles

$[V_{abc}]_{s1,s2}$: Tensions triphasées statoriques (étoiles 1 et 2) (V)

$[V_{abc}]_r$: Tensions triphasées rotoriques (V)

$V_{d,q1,2se}$: Tensions aux bornes des condensateurs séries suivant (d,q) (V)

$[i_{abc}]_{s1,s2}$: Courants triphasés statoriques (étoiles 1 et 2) (A)

$[i_{abc}]_r$: Courants triphasés rotoriques (A)

$i_{ds1} \cdot i_{qs1}$: Courants de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d,q) (A)

$i_{ds2} \cdot i_{qs2}$: Courants de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d,q) (A)

$i_{d,q1,2L}$: Courants des charges résistives-inductives selon (d,q) (A)

$i_{d,q1,2R}$: Courants des charges résistives selon (d,q) (A)

$[\varphi_{abc}]_{s1,s2}$: Flux triphasés statoriques (étoiles 1 et 2) (Wb)

$[\varphi_{abc}]_r$: Flux triphasés rotoriques (Wb)

$\varphi_{rd} \cdot \varphi_{rq}$: Flux rotoriques dans le référentiel de Park (d,q) (Wb)

$\varphi_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}$: Flux statoriques de (l'étoile 1) selon (d,q) (Wb)

$\varphi_{ds2} \cdot \varphi_{qs2}$: Flux statoriques de (l'étoile 1) selon (d,q) (Wb)

$C_1 \cdot C_2$: Condensateurs d'excitation (étoiles 1 et 2) (F)

$C_{se1} \cdot C_{se2}$: Capacités de compensation série (étoiles 1 et 2) (F)

$C_{p1} \cdot C_{p2}$: Capacités de compensation parallèle (étoiles 1 et 2) (F)

L : Inductance dynamique (H)

L_{s1} : Inductance propre d'une phase de l'étoile 1 (H)

L_{s2} : Inductance propre d'une phase de l'étoile 2 (H)

L_r : Inductance propre d'une phase du rotor (H)

L_{dq} : Inductance cyclique d'intersaturation selon (d,q) (H)

L_{lm} : Inductance de fuite mutuelle commune aux deux étoiles (H)

L_m : Inductance mutuelle cyclique stators-rotor (H)

L_{mr} : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique(H)

L_{ms} : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique (H)
 L_{sr} : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor (H)
 $L_{ds1,2}$, $L_{qs1,2}$: Inductances cycliques totales statoriques (étoiles 1 et 2) selon (d,q)(H)
 R_{s1} : Résistance d'une phase (statorique) de l'étoile 1 (Ω)
 R_{s2} : Résistance d'une phase (statorique) de l'étoile 2 (Ω)
 R_r : Résistance d'une phase rotorique (Ω)
 Ω : Vitesse de rotation rotorique de la machine(rd/s).
 ω_s : Pulsation électrique fondamentale des grandeurs statorique (rd/s)
 ω_r : Pulsation électrique fondamentale des grandeurs rotorique (rd/s)
 ω_{sl} : Pulsation électrique fondamentale du glissement (rd/s)
 C_{em} : Couple électromagnétique (N.m)
 C_r : Couple résistant (de charge) (N.m)
 K_f : Coefficient de frottement (Nms/rd)
 J : Moment d'inertie (Kg.m²)

Notation

GASDE : Génératrice asynchrone double étoile

MASDE : Machine asynchrone double étoile

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'Afrique subsaharienne dispose d'un fort potentiel en énergie renouvelable. Cependant, certaines localités urbaines et rurales éprouvent encore des difficultés d'accéder à l'énergie électrique [1].

L'accès à l'énergie électrique devient un facteur de croissance durable, on est donc amené à penser que les petites unités autonomes de production d'électricité sont des solutions alternatives, moins coûteuses et surtout respectueuses de l'environnement car basées sur les énergies renouvelables [2].

Le premier chapitre sera consacré à l'étude des systèmes électriques autonomes qui consistent de plusieurs sources de production d'énergie électrique (éolienne, panneau photovoltaïque, groupe électrogène, systèmes embarqués) utilisés dans les systèmes de secours ou bien dans les régions isolées où il n'y a pas de réseau électrique et d'autres endroits où il y a beaucoup de variation de courant dans le réseau.

Ensuite, on présentera les différentes machines qui peuvent être utilisées dans ce domaine qui fonctionnent en se basant sur les machines multi-phasées d'où notre travail consiste à l'étude d'une machine double étoile et leurs caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre on modélisera la machine asynchrone double étoile (MASDE) en utilisant des hypothèses simplificatrices avec la transformation de Park pour avoir un système biphasé plus simple, on finira par l'alimentation de la machine par deux sources de tension triphasées ensuite par l'onduleur de tension à commande M.L.I.

Le troisième chapitre sera dédié pour le fonctionnement en génératrice (modélisation et simulation) avec l'auto amorçage et aussi fonctionner la génératrice en régime saturé avec des différentes charges statiques après on réalisera un régulateur de vitesse.

En fin on terminera par une conclusion générale de l'étude et quelques perspectives de notre travail.

CHAPITRE : 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES AUTONOMES

I. Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes autonomes

I.1 Introduction

Les systèmes autonomes représentent la solution idéale pour les sites isolés ou non isolé (en cas de coupure comme les hôpitaux, les sites industriels comme CEVTIAL pour des diverse raisons (économique, personnelle, etc.), en effet un système autonome alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique.

Dans ce chapitre, on donnera quelques généralités et définitions sur les systèmes autonomes ainsi que leurs applications suivies par les différentes machines utilisées.

I.2 Définition d'un système autonome ou/et isolé

Les systèmes autonomes sont des systèmes de production et de consommation d'énergie sans raccordement au réseau public. Ils sont la solution idéale pour les endroits isolés où, pour diverses raisons (contrainte technique, financière, ou volonté de l'utilisateur dans une démarche personnelle) [3].

La philosophie propre au système autonome est de satisfaire seulement et localement aux besoins d'un utilisateur, après avoir défini son profil de consommation. Ils peuvent être composés d'un générateur diesel, d'un générateur photovoltaïque et éolien etc. [4].

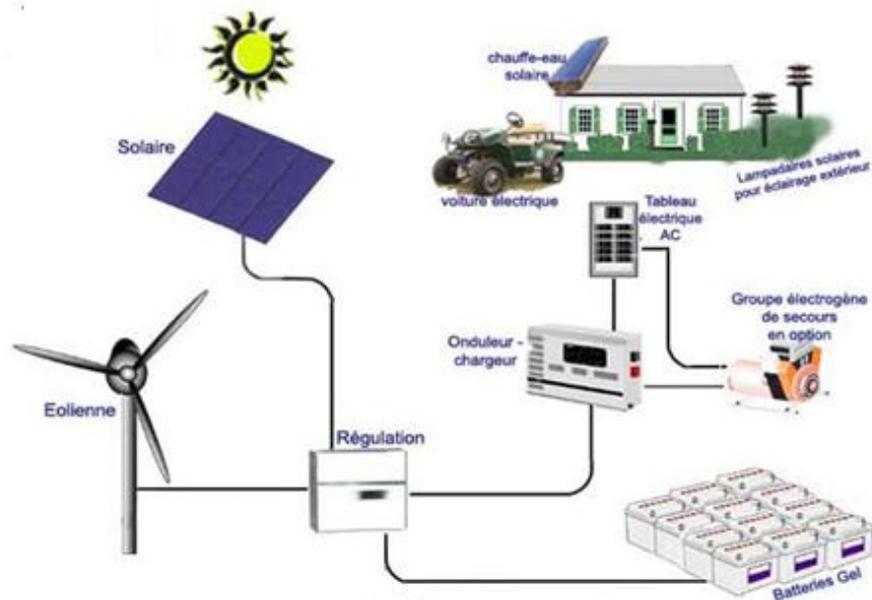


Fig. I. 1 Différents systèmes autonomes

I.3 Raison d'avoir un système autonome

- L'absence de réseau ;
- Le cout initial ;
- La fiabilité ;
- Une énergie renouvelable ;
- L'indépendance ;
- L'impact environnemental ;
- Des couts d'utilisation plus bas ;

I.4 Différents systèmes autonomes

Un système autonome de ce type se compose d'un ou plusieurs générateurs électriques, et on trouve parmi ses systèmes :

I.4.1 Générateur éolien

A. Définition

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, les éoliennes sont composées de pales en rotation autour d'un rotor et actionnées par le vent. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et entrent dans la catégorie des énergies renouvelables [5].

En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la qualité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus fiable. De ce fait la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de génératrice asynchrones à cage de par leur fiable cout, leur robustesse et leur standardisation. Ces derniers sont souvent associés à une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation [6].

B. Types d'éoliennes :

Il existe deux types d'éoliennes moderne utilisé dans le monde :

- Celles qui ont un axe horizontal dont le rotor ressemble à une hélice d'avion
- Celles qui ont un axe vertical.

Les plus courantes sont celles à axe horizontal



(a) Éolienne à axe horizontal

(b) Éolienne à axe verticale

Fig. I. 2 Éoliennes à axe horizontal et verticale

I.4.2 Système photovoltaïque

A. Système photovoltaïque isolé ou/et autonome (électrification rurale)

Un système photovoltaïque isolé alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau. C'est un moyen d'avoir l'énergie électrique lorsque le réseau d'alimentation n'est pas disponible : les bâtiments qui se trouvent dans la campagne, montagnes etc.

Ce type de système nécessite l'utilisation des batteries pour le stockage de l'électricité et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries [7].

B. Système de pompage solaire

C'est un exemple de système PV autonome il est conçu pour un approvisionnement en eau au fil du soleil : c'est-à-dire avec une durée de pompage tout au long de la journée, Ces systèmes ne prévoient pas l'utilisation de batteries.

Un réservoir stockage permet ainsi de répondre aux besoins toute la journée 24/24 [7].

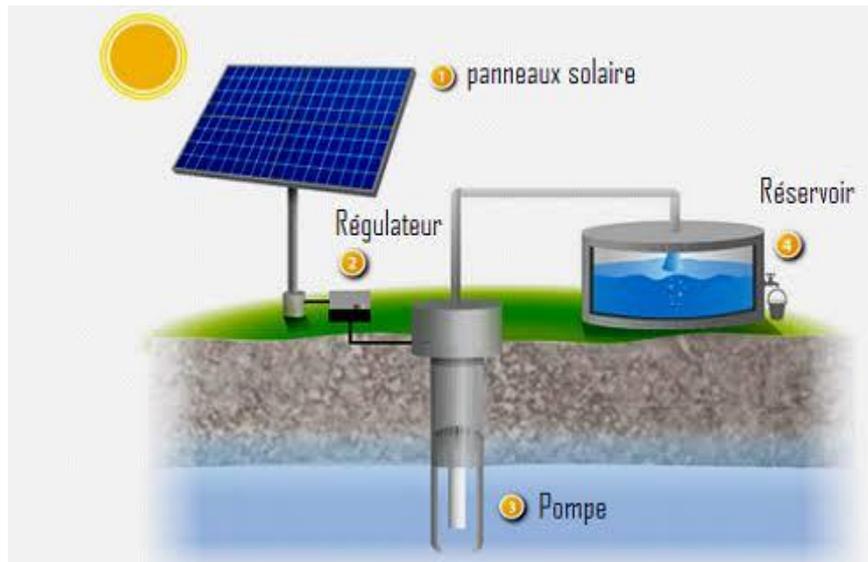


Fig. I. 3 Système de pompage solaire

I.4.3 Groupe électrogène

Un groupe électrogène est un appareil capable de fournir une source d'électricité de secours pour les diverses activités requérant de l'électricité, en l'absence d'une alimentation classique au secteur. Il est largement utilisé dans les zones victimes de coupures systématiques ou non raccordées à un réseau électrique.

Cet appareil doit absolument produire en toute autonomie de l'électricité sans avoir besoin pour cela d'une source d'énergie électrique. Le carburant sera l'énergie de substitution. L'électricité est issue d'une génératrice ou d'un alternateur. Le moteur entraîne un mouvement rotatif de l'arbre d'entraînement qui permet d'enclencher l'appareil.

Le groupe électrogène peut être d'appoint, c'est-à-dire mobile et déplaçable. Dans les milieux industriels, les modèles fixes sont par contre plus courants. Ils viennent en secours en cas de panne dans les stations militaires, les hôpitaux, les centres informatiques ou encore les aéroports.

L'alimentation fournie par l'appareil quant à elle peut être monophasée ou triphasée. Les génératrices issues des dernières générations sont constituées d'un dispositif de sécurité à la pointe ainsi que de systèmes électroniques de régulation qui permettent de préserver la stabilité du courant apporté [8].

Et sa fréquence qui varie selon le rapport entre la consommation et la production :

Quand la consommation exactement égale à la production (situation d'équilibre), l'arbre d'entraînement conserve son rythme et la fréquence est donc maintenue. Si la consommation

augmente (la force de résistance augmente), l'arbre ralenti, donc la fréquence du courant produit baisse. Si la consommation baisse (la force de résistance diminue), l'arbre de la turbine accélère, donc la fréquence du courant produit augmente.



Fig. I. 4 Différents groupes électrogènes

A. Différents types de groupes électrogènes

Les groupes électrogènes ne proposent pas tous des possibilités et des technologies identiques. Sur le marché, on distinguera essentiellement trois types de modèles à savoir le groupe électrogène à essence et /ou à gaz ,à gasoil et insonorisé.

- **Groupe électrogène à essence et /ou à gaz**

Le groupe électrogène à essence et /ou à gaz est apprécié pour sa polyvalence. Il convient pour une utilisation domestique dans le cadre de travaux de bricolage par exemple. Il s'accompagne d'un dispositif de démarrage électrique ou manuel. La puissance dépend

essentiellement de la taille de l'engin et peut aller de 1,5 kW à 6 kW. Comme il est compact, ce modèle généralement doté d'une alimentation monophasée émet très peu de bruit.

- **Groupe électrogène diesel**

Sur les chantiers ou pour une utilisation plus intensive, il est préférable de s'orienter vers les groupes électrogènes diesel. Leur avantage : ils offrent une variété de puissance, allant de quelques kW à plusieurs milliers KW. Pourvus d'un démarreur électrique, ces modèles fournissent une alimentation électrique monophasée, triphasée ou mixte.

- **Groupe électrogène insonorisé**

Dernier modèle et non des moindres : le groupe électrogène insonorisé qui fait partie du must en terme de confort sonore. Aucune nuisance n'est à craindre grâce au caisson isolé qui empêche le bruit de s'échapper. Si en général, les nuisances sonores émises par les groupes vont jusqu'à 150 dB voire plus, celles du modèle insonorisé ne vont pas au-delà de 90 dB. Rapide et léger, le groupe insonorisé offre un faible encombrement, le rendant parfait pour un usage domestique. Sa puissance étant limitée, il ne sera pas adapté à une utilisation intensive, il fonctionne généralement à essence.

- **Groupes électrogènes GTZ**

Connu également sous l'appellation « groupe no-break », un groupe électrogène temps zéro se distingue d'un groupe classique par un alternateur branché sur le réseau électrique. Celui-ci est en rotation permanente. Une autre particularité : un GTZ permet de stabiliser la tension, grâce à son accumulateur cinétique ou batterie électrochimique. On note aussi un moteur diesel qui démarre à vide en cas de creux de tension significatif.

Il met les appareils à alimenter à l'abri des risques liés aux variations de tension et un peu énergivore .

Il est beaucoup utilisé dans les zones qui subissent fréquemment des variations de tension, c'est le groupe électrogène adéquat.

- **Groupes électrogènes industriels**

Le groupe électrogène industriel révèle son utilité dans les gros chantiers, ou dans les entrepôts industriels. En mesure de satisfaire une demande en continu, il est effectivement adapté à un usage très intensif. Son rendement lui permet de faire de l'ombre à tout autre type de groupe électrogène. Il est d'une puissance inégalée et il convient à un usage professionnel mais il a un coût vertigineux.

Le groupe électrogène industriel est utilisé par les professionnels du bâtiment ou d'organisation d'activités gigantesques.

I.4.4 Réseaux embarqués

En opposition au réseau de distribution public, il se différencie par une faible puissance de court-circuit et l'alimentation de systèmes isolés. Dans la littérature, on parle aussi de réseau d'alimentation ou de bord suivant les systèmes étudiés. Ces derniers sont nombreux : Voitures, avions, navires, tramways voire les réseaux industriels ou îlotés, constituent des cas d'application où le réseau électrique fonctionne partiellement ou continûment de manière isolée. Ces réseaux sont fortement non linéaires car ils sont composés en grande partie de convertisseurs électriques [11].

A. Différents domaines utilisés le réseau embarqué

- *Automobile*

Ils ont éliminé une grosse majorité des câbles pour améliorer la sécurité et la fiabilité des véhicules. Les réseaux offrent aujourd'hui de nouvelles fonctionnalités dans les véhicules, comme des aides à la conduite, des informations sur les conditions routières et sur l'état du véhicule.

Les causes de cette révolution sont principalement issues de quatre facteurs : le confort, la sécurité, l'environnement, le coût [12].

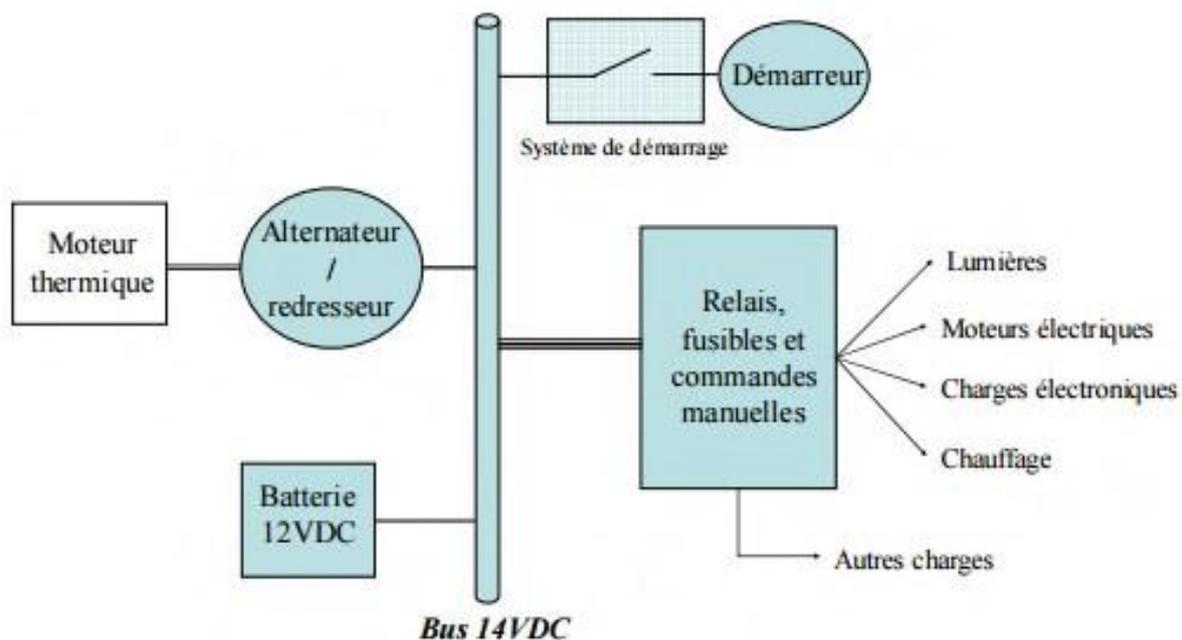


Fig. I. 5 Installation électrique d'une voiture

- *Navire*

Dans des proportions différentes, un autre exemple significatif de cette migration au tout électrique est le cas des navires. Sans parler des bateaux militaires, les navires de croisière ont bien évolué. Ces villes flottantes ont su également tirer un grand bénéfice de l'évolution de l'électronique de puissance. La première propulsion électrique ne date pourtant pas d'hier. Dans les années 1930, le Normandie était équipé de machines électriques permettant d'entraîner les quatre hélices. Cependant, il s'agissait à l'époque, de systèmes du type « arbre électrique » entre la turbine à vapeur et l'hélice, en remplacement de la longue ligne d'arbre et de réducteur associé. Par « arbre électrique » on entend une liaison borne à borne entre génératrice et moteur, laquelle, aux puissances considérées, ne pouvait se faire que par des « arbres » constitués par un alternateur entraîné par une turbine et un moteur synchrone ou asynchrone » [13].

Il faut attendre le début des années 90, le développement de l'électronique de puissance, pour voir l'application des systèmes modernes d'alimentation et de commande sur les machines de propulsion [14].

I.5 Différentes machines utilisées dans ces systèmes

Les machines qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique leur fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par déplacement relatif de celui-ci et d'un champ magnétique, à l'aide d'un engin d'entraînement mécanique.

I.5.1 Machine à courant continu

Les machines à courant continu sont essentiellement destinées pour fonctionner en moteur, la génératrice en tant que machine a été totalement remplacée par des dispositifs électroniques statiques réalisant la conversion alternatif-continu(Redresseurs). Cependant il est intéressant de connaître le fonctionnement générateur

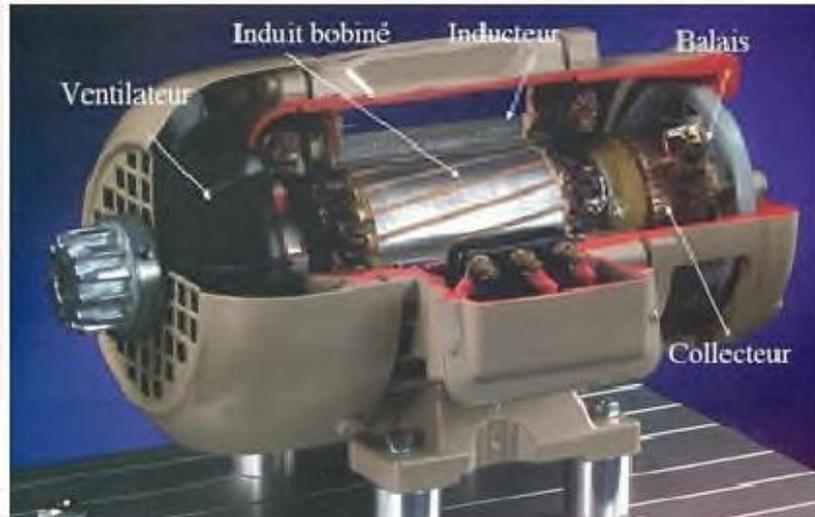


Fig. I. 6 Coupe d'une machine à courant continu

I.5.2 Machine synchrone

A. Machine synchrone à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs.

Les machines synchrones à aimants permanents se composent d'un stator comportant un bobinage qui est alimenté en triphasée produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation et d'un rotor où le champ magnétique est produit par des aimants permanents.



Fig. I. 7 Moteur à aimants permanent en géométrie cylindrique

La plupart des machines synchrones utilisées dans les applications éoliennes autonomes sont des machines synchrones à aimants permanents.

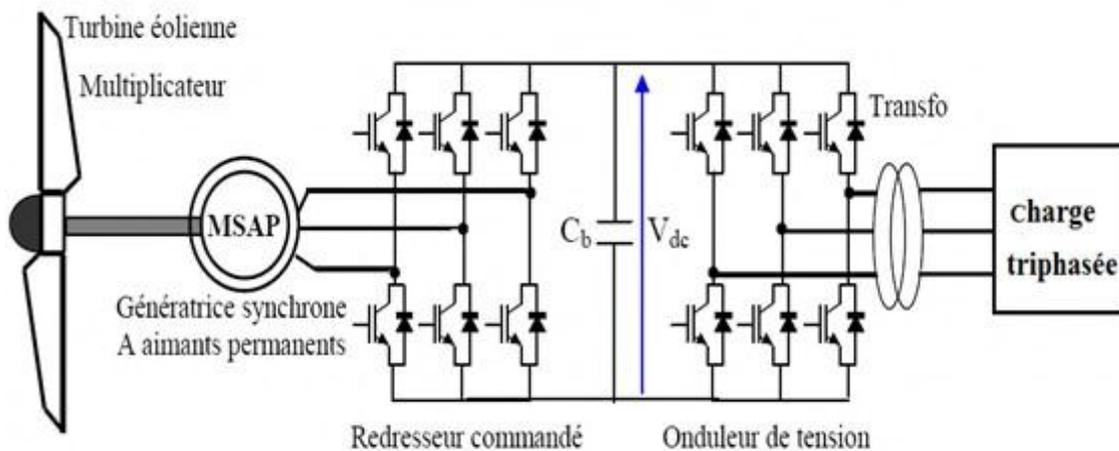


Fig. I. 8 Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents

B. Machine synchrone à reluctance variable

La machine à reluctance variable, est une machine synchrone à pôles saillants, démunie de bobinage d'excitation et fonctionne exclusivement sur le couple de reluctance.

Cette machine permet de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse suite à la diversité des applications des MRV, ces dernières se divisent en deux catégories (machine à stator lisse et machine à double denture) [12].

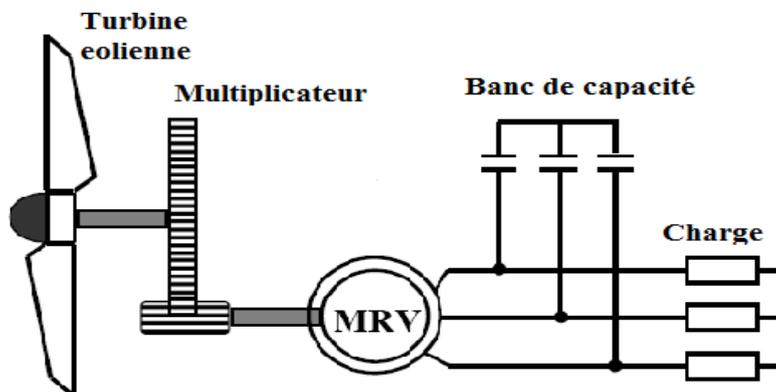


Fig. I. 9 Machine asynchrone à reluctance variable en fonctionnement autonome

C. Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [15].

I.5.3 Machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine à induction asynchrone qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique, Pour réaliser cette transformation elle doit pour cela être entraînée.

La puissance nécessaire à sa magnétisation par une batterie de condensateurs dans le cas de fonctionnement des systèmes autonomes [16].

On distingue deux types de machines asynchrones selon le type de rotor sont bobiné, ou à cage d'écureuil.

A. Machines asynchrones à cage d'écureuil

Les avantages des moteurs à cage d'écureuil résident dans leur simplicité de construction, de manœuvre et d'entretien, leur robustesse mécanique et leur faible prix de revient.

La génératrice asynchrone à cage développe une très grande sensibilité aux variations de la vitesse et de la charge lorsqu'elle est en fonctionnement autonome pour son amorçage il absorbe la puissance réactive



Fig. I. 10 Machine asynchrone à cage d'écureuil

B. Machines asynchrones à rotor bobiné

Le rotor est formé d'enroulements polyphasés répartis sur un cylindre magnétique. Ces enroulements constituent une succession de $2p$ pôles comme ceux du stator.

Dans tous les cas, les enroulements ainsi constitués sont fermés sur eux-mêmes. (Rotor en court-circuit). Admettons que le rotor tourne. La vitesse angulaire (ω) du rotor est nécessairement différente de la vitesse du champ tournant qu'il voit donc défilier. En effet : s'il y a rotation c'est qu'il s'est développé un couple, ce dernier résulte de l'interaction du champs statorique et champ rotorique. Or le champ rotorique est induit, c'est à dire qu'il résulte de la

génération de courants polyphasés induits par le stator dans le rotor. Cela signifie que chaque enroulement rotorique est le siège d'une f.é.m. induite donc d'une variation de flux, ceci n'est possible que dans la mesure où la vitesse du champ tournant (inducteur) se déplace à une autre vitesse que celle de l'enroulement (induit) rotorique.

La figure (I.11) présente les différentes parties de la machine asynchrone à rotor bobiné :

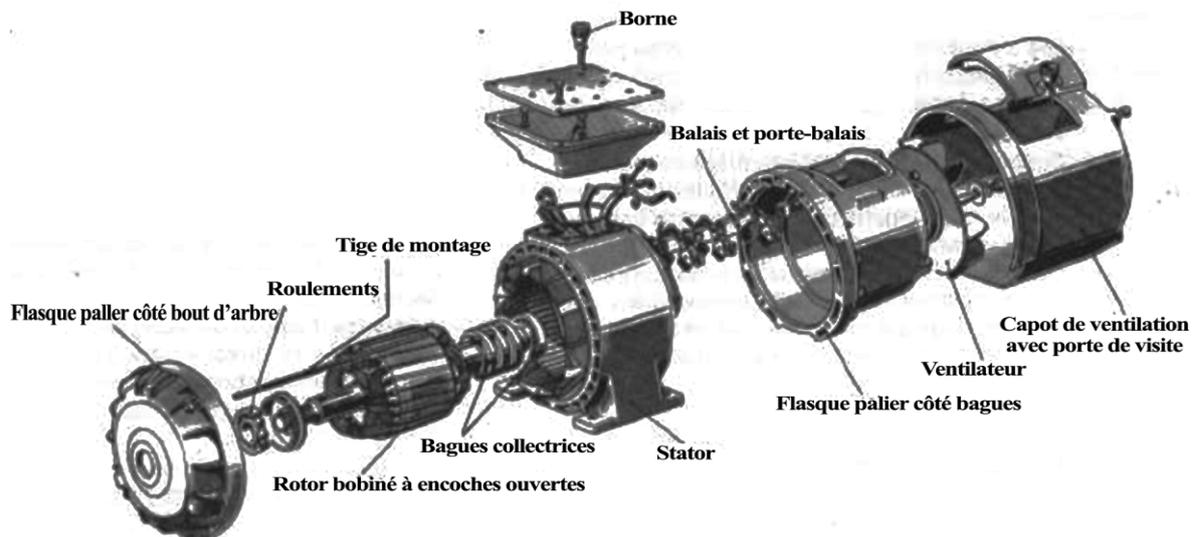


Fig I. 11 Machine asynchrone à rotor bobiné

I.5.4 Machines multi phasées

Les machines triphasées à courant alternatif dominent assez largement le domaine des machines, mais depuis un certain nombre d'années les machines ayant un nombre de phase supérieure à trois trouvent un regain d'intérêt, ces machines sont souvent appelées machines multi-phasées.

En effet, les progrès d'électronique de puissance permettent maintenant d'assurer des alimentations adaptées.

Les machines multi-phasées ont fait l'objet d'un intérêt grandissant pour défier l'avantage qu'elles présentent, à savoir, une segmentation de puissance qui répartit les contraintes sur plusieurs composants.

Cela permet, entre autre, d'utiliser des composants de puissance fonctionnant avec une fréquence de commutation élevée, et ainsi de réduire les taux d'harmonique des courants et l'ondulation du couple.

Enfin, ces machines autorisent des modes de marche dégradée lors d'une mise en défaut d'un bobinage ou d'un composant de puissance.

Cependant, ces divers avantages ne doivent pas occulter la complexité de leurs commandes, tant en mode normal qu'en mode dégradé.

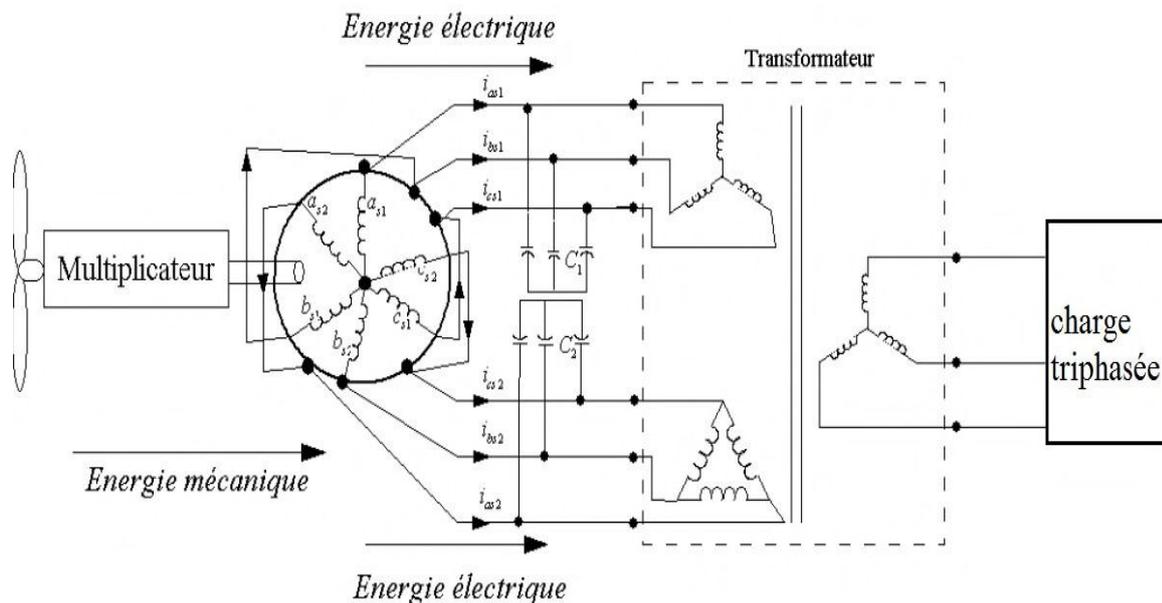


Fig. I. 12 Exemple d'application d'une machine asynchrone à 6 phases

A. Caractéristiques des machines multi-phasées

Suivant le nombre de phases qu'on peut avoir dans le stator (les phases statoriques) qui est ou non multiple de trois on distingue deux types de machines multi phases (type 1 et type 2) de plus, on considère rarement les ou le nombre de phases est un nombre pair sauf si celui-ci est un multiple de trois.

On peut avoir plusieurs configurations possibles dans une machine à nombre de phases donné suivant le décalage angulaire α entre deux bobines adjacentes.

B. Avantages et inconvénients des machines multi-phasées

➤ Avantages des machines multi-phasées

Les machines multi-phasées ont par la suite fait un intérêt grandissant, et en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage, ceux des machines multi-phasées suivantes

- Segmentation de puissance ;
- Amélioration de la fiabilité ;
- Réduction des courants harmoniques ;
- Amélioration du facteur de puissance.

➤ Inconvénients des machines multi-phasées

Elles présentent des inconvénients tels que :

- Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur- machine.
- La multiplication du nombre des semi-conducteurs avec la structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux, ce qui complique évidemment sa commande.

I.5.5 Différences entre les machines multi phasées et à double étoile

En plus des avantages de la machine multi-phasée la MASDE se démarque de fait qu'elle peut réduire de manière significatif les ondulations du couple électromagnétique et les pertes rotoriques, qui est un inconvénient pour les machines multi-phasées car l'ondulation du couple électromagnétique dont la fréquence est six fois celle du fondamentale est principalement créée par des harmoniques cinq et sept de temps existent, par contre dans la machine double étoile, ils sont naturellement réduits.

La machine double étoile est la machine multi-phasées la plus courante, sans doute parce qu'elle constitue un bon compromis entre la segmentation de puissance suffisante et un ensemble convertisseur- machine pas trop compliquée et de prix acceptable.

I.6 Amorçage de la génératrice asynchrone triphasée

Pour qu'une génératrice asynchrone produise de l'électricité, il faut que le rotor ait un champ magnétique rémanent. Cela s'appelle l'amorçage, il permet de créer la puissance réactive. L'amorçage se fait avec des condensateurs. Ces condensateurs doivent fournir une puissance réactive un peu supérieure à celle consommée par le bobinage de la machine dans le cas où elle est connectée à une charge. En variant la vitesse de rotation ou la valeur du banc de capacités, on aura d'autres points d'amorçage.

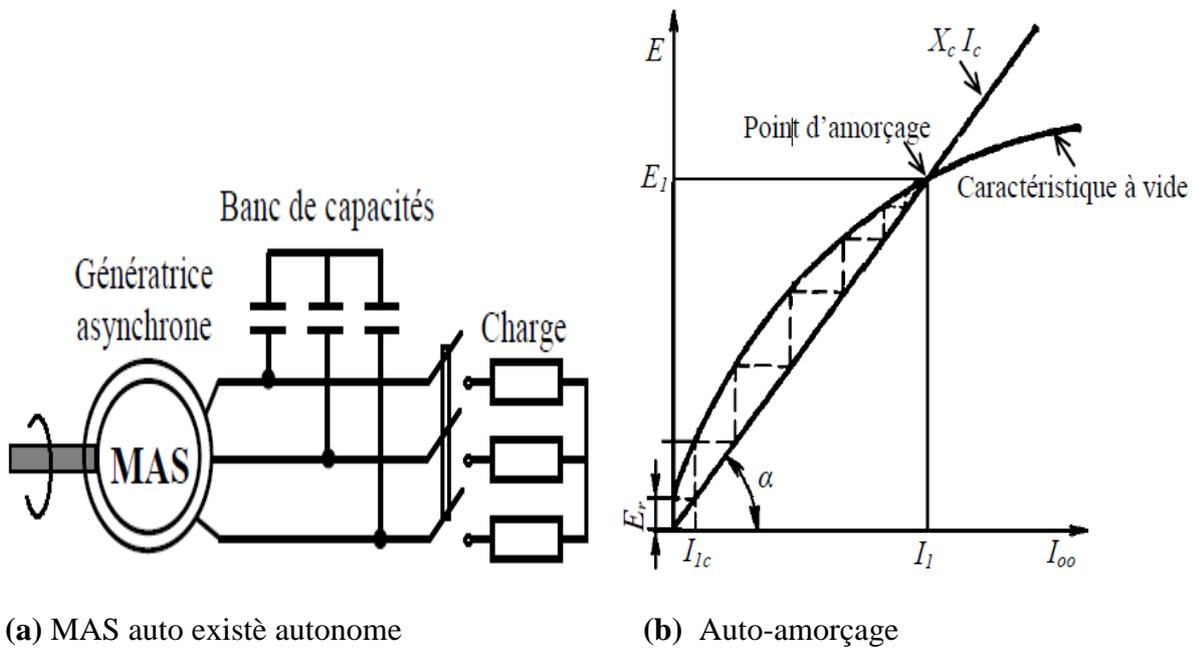


Fig. I. 13 Auto-amorçage d'une génératrice asynchrone triphasé en fonctionnement autonome

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques généralités et définitions sur les systèmes autonomes et les machines électriques qu'on peut utiliser dans ces systèmes.

On a conclu que les systèmes autonomes sont plus en plus indispensable dans notre vie qu'elle que soit dans l'industrie, endroit isolé, etc.

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation des différentes parties de notre système.

CHAPITRE 2
MODÉLISATION DES DIFFÉRENTES PARTIES DU SYSTÈME
ETUDIE

II. Chapitre II : Modélisation des différentes parties du système étudié

II.1 Introduction

La modélisation d'un système quelconque s'impose pour l'application d'une commande particulière. Dans ce chapitre, on s'intéressa à la modélisation de différentes parties de notre système. En commençant par la modélisation de la machines asynchrone double étoile, ensuite l'onduleur MLI.

La modélisation de la machine électrique fait appel à des équations en générale très complexes. En effet, la répartition des enroulements et la géométrie propre de la MASDE rendent son modèle difficile à mettre en œuvre, alors il est nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté. L'étude sera menée avec un décalage angulaire: $\alpha = 30^\circ$. Enfin, des résultats de simulation seront présentés et commentés.

II.2 Description de la machine asynchrone à double étoile

La machine asynchrone double étoile est une machine qui comporte deux enroulements triphasés au stator fixes déphasé entre eux d'un angle α et un rotor mobile. Parmi les angles les plus utilisés, on trouve le plus souvent $\alpha = 30^\circ$.

Chaque enroulement statorique de cette machine est composé de trois bobines identiques à p paire de pole. Leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique égal $2\frac{\pi}{3}$ dans l'espace. Ils sont logés dans des encoches du circuit magnétique [17].

Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé de courant équilibré, d'où la création d'un champ tournant glisse dans l'entrefer.

La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de paires de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques tel que :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{II.1})$$

Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de pair de pôles identique à celui du stator.

La structure électrique du rotor est supposée être un rotor à cage d'écureuil constituée des barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité (barre

conductrice en aluminium). Ce choix permet d'obtenir des machines peu onéreuses, robustes, faciles d'emploi et nécessitent un entretien limité.

Ainsi les effets de l'induction statorique sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de forces électromagnétiques sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit.

II.3 . Hypothèses simplificatrices

Avant de commencer la modélisation de la machine, on considère quelques hypothèses simplificatrices pour faciliter quelques difficultés concernant le comportement de la machine à étudier. Le modèle que nous adopterons tient compte des hypothèses suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- Nous n'admettons de plus que la f.e.m. créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition spatiale sinusoïdale ;
- Machine de construction symétrique ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau ;
- L'inductance de fuite mutuelle commune aux deux circuits (étoile1et2) est négligeable ;
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

II.4 Modèle triphasé de la MASDE sur les axes réels

La représentation schématique de la machine asynchrone à double étoile dans l'espace électrique est donnée sur la figure (II.1) :

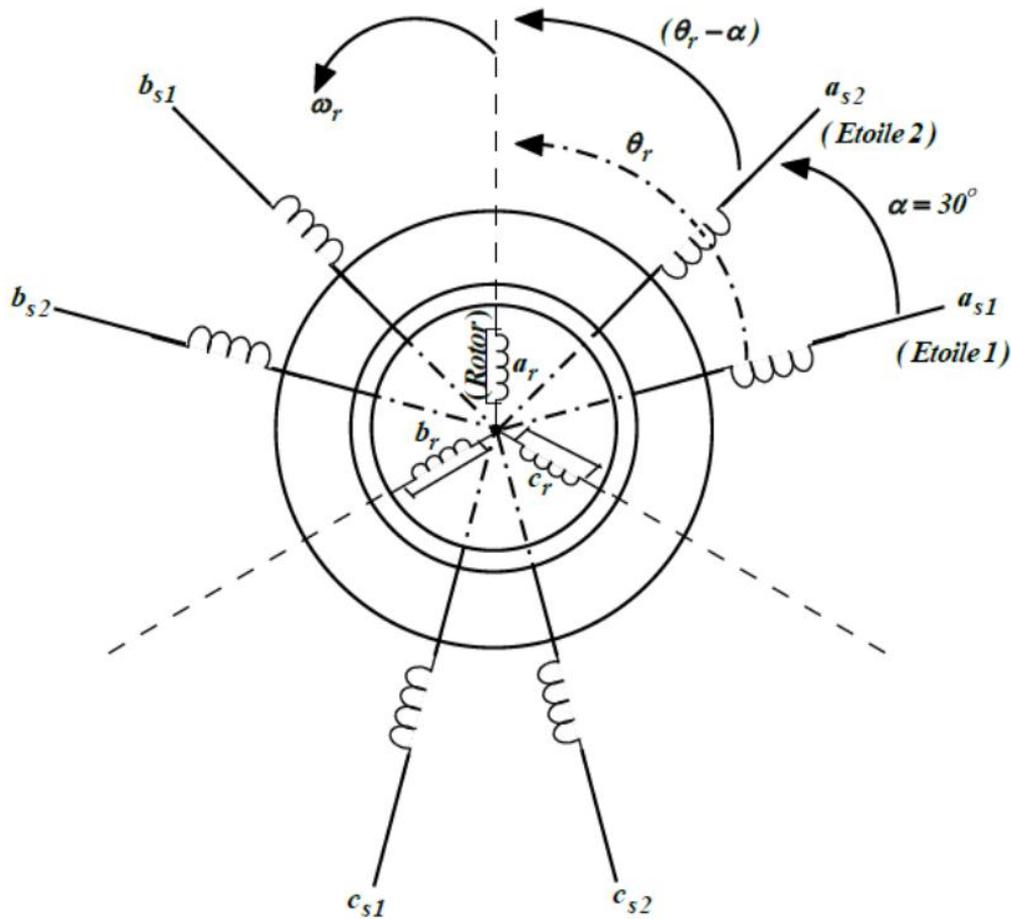


Fig. II. 1 Représentation schématique des enroulements de la MASDE

II.4.1 Équations électriques

Les équations des tensions de la machine asynchrone double étoile représentent pour chaque enroulement la somme de la chute ohmique et de la chute inductive due au flux :

➤ Pour l'étoile 1 :

$$[v_{abc}]_{s1} = [R_{s1}][i_{abc}]_{s1} + \frac{d[\varphi_{abc}]_{s1}}{dt}$$

$$\begin{cases} v_{as1} = R_{as1}i_{as1} + \frac{d\varphi_{as1}}{dt} \\ v_{bs1} = R_{bs1}i_{bs1} + \frac{d\varphi_{bs1}}{dt} \\ v_{cs1} = R_{cs1}i_{cs1} + \frac{d\varphi_{cs1}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

➤ **Pour l'étoile 2 :**

$$[v_{abc}]_{s2} = [R_{s2}][i_{abc}]_{s2} + \frac{d[\varphi_{abc}]_{s2}}{dt}$$

$$\begin{cases} v_{as2} = R_{as2}i_{as2} + \frac{d\varphi_{as2}}{dt} \\ v_{bs2} = R_{bs2}i_{bs2} + \frac{d\varphi_{bs2}}{dt} \\ v_{cs2} = R_{cs2}i_{cs2} + \frac{d\varphi_{cs2}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

➤ **Pour le rotor :**

$$[v_{abc}]_r = [R_r][i_{abc}]_r + \frac{d[\varphi_{abc}]_r}{dt}$$

$$\begin{cases} 0 = R_{ar}i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ 0 = R_{br}i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ 0 = R_{cr}i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

On pose : $R_{as1} = R_{bs1} = R_{cs1} = R_{s1}$ et $R_{as2} = R_{bs2} = R_{cs2} = R_{s2}$ et $R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r$

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} ; [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[i_{s1}] = \begin{bmatrix} i_{as1} \\ i_{bs1} \\ i_{cs1} \end{bmatrix} ; [i_{s2}] = \begin{bmatrix} i_{as2} \\ i_{bs2} \\ i_{cs2} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[v_{s1}] = \begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} ; [v_{s2}] = \begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} ; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[\varphi_{s1}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as1} \\ \varphi_{bs1} \\ \varphi_{cs1} \end{bmatrix} ; [\varphi_{s2}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as2} \\ \varphi_{bs2} \\ \varphi_{cs2} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

$[i_{s1}], [i_{s2}], [i_r]$: Vecteurs des courants statoriques de l'étoile 1,2 et des tensions rotoriques.

$[v_{s1}], [v_{s2}], [v_r]$: Vecteurs des tensions statoriques de l'étoile 1,2 et des tensions rotoriques.

$[\varphi_{s1}], [\varphi_{s2}], [\varphi_r]$: Vecteurs des flux statoriques de l'étoile 1,2 et des flux rotoriques.

II.4.2 Équations magnétiques

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{s1} \\ \varphi_{s2} \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{as1} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{bs1} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{cs1} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{as2} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{bs2} + L_{ms} & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{cs2} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_{ar} + L_{mr} & L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{br} + L_{mr} & L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{cr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$[L_{s1,s2}] = \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$[L_{s1,r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[L_{s2,r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Les sous matrices $[L_{s2,s1}] = [L_{s1,s2}]^t$; $[L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t$; $[L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t$

Avec : $L_{ms} = L_{mr} = L_{sr} = \frac{2}{3} L_m$;

$L_{as1} = L_{bs1} = L_{cs1} = L_{s1}$: Inductance propre du 1^{er} stator.

$L_{as2} = L_{bs2} = L_{cs2} = L_{s2}$: Inductance propre du 2^{eme} stator.

$L_{ar} = L_{br} = L_{cr} = L_r$: Inductance propre du rotor.

II.4.3 Équation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

A. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle d'énergie électromagnétique stockée par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

$$C_{em} = \frac{\partial w}{\partial \theta_{geo}} = p \frac{\partial w}{\partial \theta_{ele}} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$w = \frac{1}{2} ([i_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [i_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [i_r]^t [\varphi_r]) \quad (\text{II.14})$$

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{p}{2} ([i_{s1}] \frac{d[L_{s1r}]}{d\theta_r} [i_r]^t + [i_{s2}] \frac{d[L_{s2r}]}{d\theta_r} [i_r]^t) \quad (\text{II.15})$$

II.5 Modèle biphasé de la MASDE

II.5.1 Transformation de Park

Le principe de la transformation de Park consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles a, b, c par des grandeurs d'indices d, q, o (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de Park $[p(\theta)]$.

On transforme le système triphasé en un système biphasé tournant. La matrice de Park pour l'étoile 1 est définie comme suit :

$$[p(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 est définie comme suit :

$$[p(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La matrice de Park pour le rotor est définie comme montré par l'équation

$$[p(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Après étude du système, maintenant, simplifié, il est impératif de revenir à la dimension réelle de la machine à travers une autre matrice de passage appelée matrice de PARK inverse.

La matrice de PARK inverse pour l'étoile 1 :

$$[p(\theta_{s1})]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

La matrice de PARK inverse pour l'étoile 2 :

$$[p(\theta_{s2})]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

La matrice de PARK inverse pour le rotor :

$$[p(\theta_r)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$[p(\theta_{s1})]$: Matrice de transformation du premier enroulement statorique (étoile1) ;

$[p(\theta_{s2})]$: Matrice de transformation du deuxième enroulement statorique (étoile2) ;

$[p(\theta_r)]$: Matrice de transformation d'enroulement rotorique.

II.5.2 Choix du référentiel

Trois types de référentiels existent dans la pratique, le choix se fait selon le problème à étudier.

A. Référentiel lié au champ tournant

Dans celui-ci, on a :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - p\Omega$$

Ce référentiel n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques.

B. Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, on a :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{où} \quad \theta_s = \theta_r + \theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt}$$

D'où :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -p\Omega$$

Ce référentiel est utilisé dans l'étude des régimes transitoires avec une variation importante de la vitesse de rotation.

C. Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, on a :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = p\Omega$$

Ce référentiel est utilisé dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée constante.

Dans cette étude le modèle a été exprimé dans le repère (d, q) lié au champ tournant.

II.5.2 Application de la transformation de Park à la MASDE

La figure II.2 représente le modèle de la MASDE selon le système d'axes (d, q)

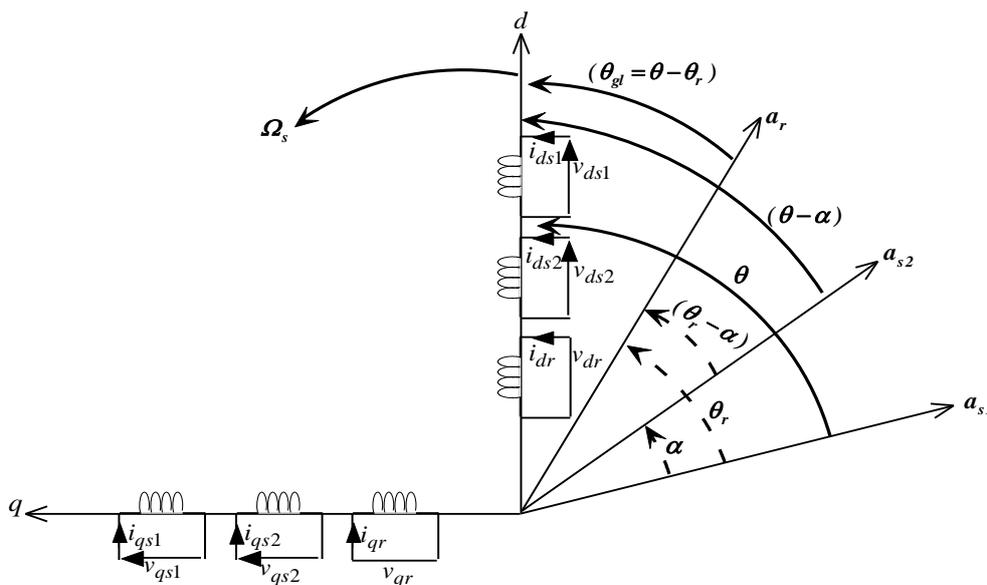


Fig. II. 2 Représentation du modèle de la MASDE selon les axes (d, q)

L'écriture du modèle de la MASDE dans un repère biphasé lié au champ tournant est obtenue en utilisant les transformations de Park permettant la conservation de la puissance et du couple. En appliquant ces transformations aux tensions ainsi qu'aux flux statoriques, nous obtenons le modèle électrique classique suivant :

A. Équations des tensions

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d\phi_{ds1}}{dt} - \omega_s \phi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d\phi_{qs1}}{dt} + \omega_s \phi_{ds1} \\ v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d\phi_{ds2}}{dt} - \omega_s \phi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d\phi_{qs2}}{dt} + \omega_s \phi_{ds2} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_{gl} \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_{gl} \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

B. Équations des flux

$$\begin{cases} \phi_{ds1} = L_{s1}i_{ds1} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qs1} = L_{s1}i_{qs1} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \phi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$L_{s1} + L_m$: Inductance cyclique du stator 1.

$L_{s2} + L_m$: Inductance cyclique du stator 2.

$L_r + L_m$: Inductance cyclique du rotor.

En introduisant le système d'équations (II.23) dans (II.22) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [L] [\dot{I}] + \omega_{gl} [C][I] + [D][I] \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$$

Où :

$[U] = [v_{ds1}, v_{qs1}, v_{ds2}, v_{qs2}, v_{dr}, v_{qr}]^t$: Vecteur de commande ;

$[I] = [i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}, i_{dr}, i_{qr}]^t$: Vecteur d'état ;

$$\text{Avec: } [\dot{I}] = \frac{d}{dt}[I]$$

$$[B] = \text{diag} [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$$

$$\begin{aligned}
[L] &= \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & (L_{s2} + L_m) & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & (L_{s2} + L_m) & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) \end{bmatrix} \\
[C] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_m & 0 & -(L_r + L_m) \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) & 0 \end{bmatrix} \\
[D] &= \begin{bmatrix} R_{s1} & -\omega_s(L_{s1} + L_m) & 0 & -W_s L_m & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s(L_{s1} + L_m) & R_{s1} & \omega_s L_m & 0 & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -\omega_s L_m & R_{s2} & -\omega_s(L_{s2} + L_m) & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_m & 0 & \omega_s(L_{s2} + L_m) & R_{s2} & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

En mettant le système (II.24) sous forme d'état, on trouve :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}([B] [U] - \omega_{g1}[C] [I] - [D] [I]) \quad (\text{II.25})$$

C. Équation mécanique

Pour calculer l'expression du couple instantané, il est nécessaire de déterminer la puissance instantanée.

La puissance instantanée absorbée par la machine asynchrone double étoile est donnée par l'expression suivante :

$$P_a = [V_S]^t [i_S] = v_{as1} i_{as1} + v_{bs1} i_{bs1} + v_{cs1} i_{cs1} + v_{as2} i_{as2} + v_{bs2} i_{bs2} + v_{cs2} i_{cs2} \quad (\text{II.26})$$

Comme la transformation de Park utilisée conserve la puissance instantanée, on peut écrire :

$$P_a = v_{ds1} i_{ds1} + v_{qs1} i_{qs1} + v_{ds2} i_{ds2} + v_{qs2} i_{qs2} \quad (\text{II.27})$$

En introduisant le système d'équation (II.20) dans l'expression de la puissance instantanée (II.23) on obtient :

$$\begin{aligned}
P_a &= [R_{s1} i_{ds1}^2 + R_{s1} i_{qs1}^2 + R_{s2} i_{ds2}^2 + R_{s2} i_{qs2}^2] \\
&+ [\omega_s (\varphi_{ds1} i_{qs1} - \varphi_{qs1} i_{ds1} + \varphi_{ds2} i_{qs2} - \varphi_{qs2} i_{ds2})] \\
&+ \left[\frac{d\varphi_{ds1}}{dt} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} i_{qs2} \right] \quad (\text{II.28})
\end{aligned}$$

Cette expression se compose de trois termes :

- ❖ Le premier terme est identifiable aux pertes à effet joule ;

- ❖ Le second terme correspond à la puissance électromagnétique emmagasinée ;
- ❖ Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique (les pertes fer sont supposées négligeables).

La puissance et le couple électromagnétique peuvent s'écrire sous la forme :

➤ **Couple électromagnétique**

$$P_{em} = C_{em} \Omega$$

$$P_{em} = \omega_s [\varphi_{ds1} i_{ds1} + \varphi_{ds2} i_{ds2} - \varphi_{qs1} i_{qs1} - \varphi_{qs2} i_{qs2}] \quad (II.29)$$

D'où :

$$C_{em} = \frac{\omega_s}{\Omega_s} [\varphi_{ds1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{qs2} - \varphi_{qs1} i_{ds1} - \varphi_{qs2} i_{ds2}]$$

$$C_{em} = p [\varphi_{ds1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{qs2} - \varphi_{qs1} i_{ds1} - \varphi_{qs2} i_{ds2}] \quad (II.30)$$

II.6 Simulation et interprétation des résultats

La simulation consiste à implanter le modèle électromécanique de la MASDE sous l'environnement Matlab/Simulink.

La MASDE est alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibrées, exprimées comme suit :

- **Pour la première étoile statorique :**

$$\begin{cases} v_{as1} = v_s \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_s t) \\ v_{bs1} = v_s \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{cs1} = v_s \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (II.31)$$

- **Pour la deuxième étoile statorique :**

$$\begin{cases} v_{as2} = V_s \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega_s t - \frac{\pi}{6}\right) \\ v_{bs2} = V_s \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) \\ v_{cs2} = V_s \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) \end{cases} \quad (II.32)$$

Avec :

V_s : Valeur efficace de tension ($V_s = 220$ V).

Les paramètres de MASDE utilisés dans ce travail sont donnés dans l'annexe A. La figure II.3 représente la réponse de la MASDE alimentée par un réseau triphasé suivi de l'application des charges nominales $C_r = 14N.m$ et $C_r = -14N.m$ respectivement à l'intervalle de temps [3,5]s et $C_r = -14N.m$ à 7s jusqu'à 10s, cette dernière montre que :

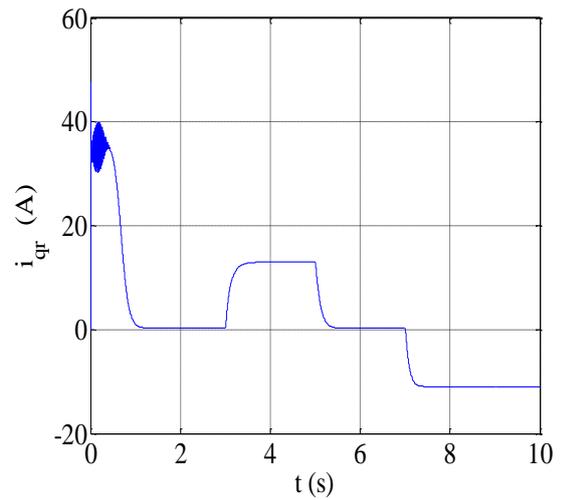
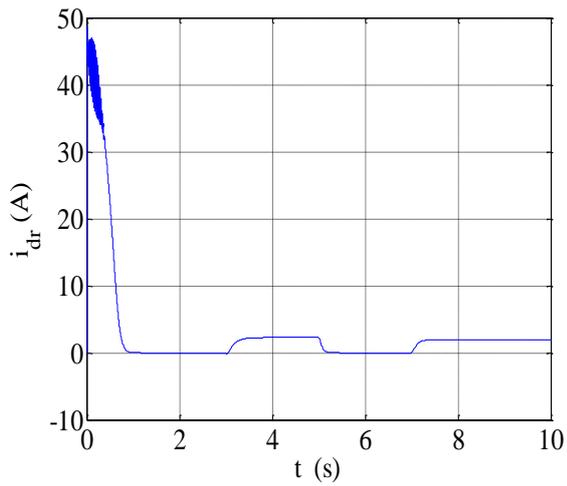
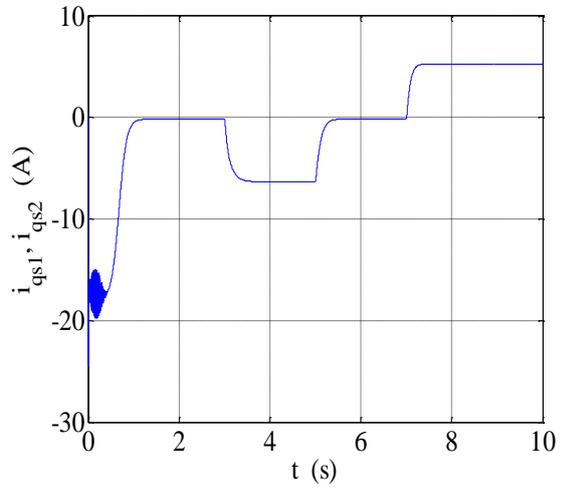
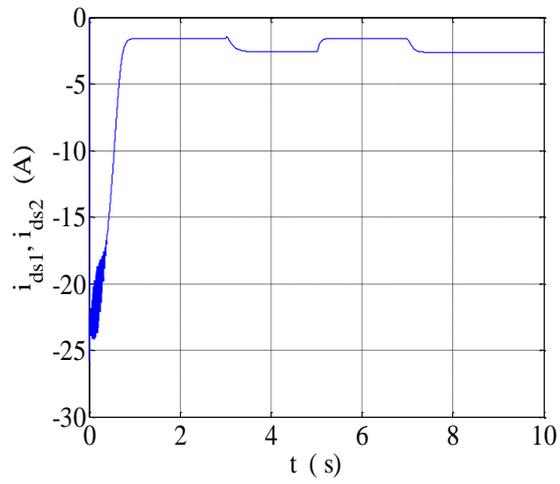
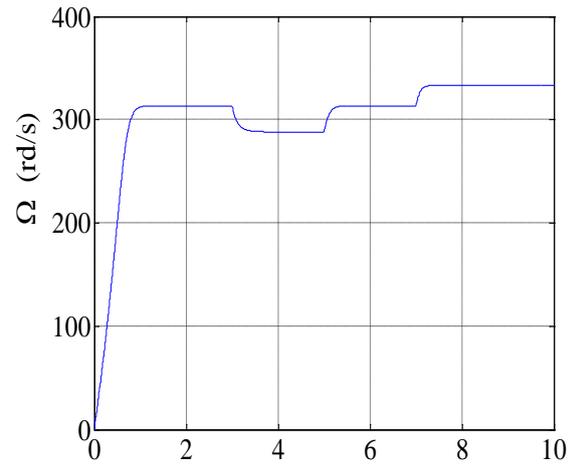
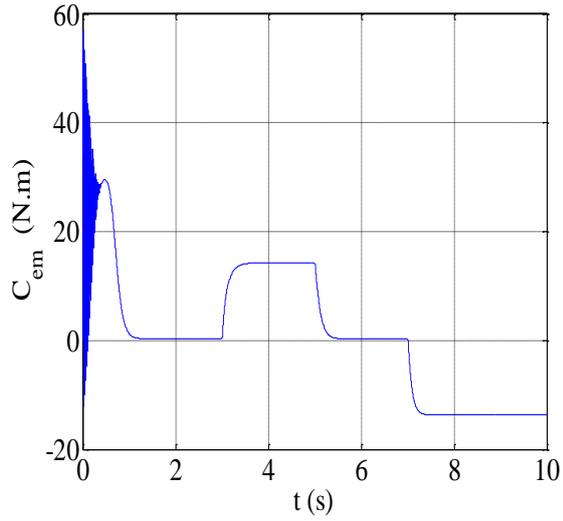
la vitesse de rotation de la MASDE augmente et évolue d'une manière presque linéaire au début du démarrage, puis elle se stabilise et prend la valeur de $313.8rad/s$ (très proche de celle du synchronisme).

On remarque une légère diminution à $t=3s$ lors de l'introduction d'un couple résistant positif puis une légère augmentation à $t=7s$ lors de l'introduction d'un couple résistant négatif.

On remarque des oscillations du couple électromagnétique pendant une durée de 0.5s qui correspondent aux instants de démarrage, puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stabilise à une valeur de $0.31N.m$ qui est due au frottement quand il atteint le régime permanent (compensation des pertes par frottement), à l'instant $t=3s$ et à $t=7s$, il prend des valeurs du couple résistant.

Les courants statoriques présentent des dépassements excessifs au démarrage qui sont d'environ 5 fois le courant nominal, ensuite ils diminuent et se stabilisent au régime permanent, à $t=3s$ et à $t=7s$, ils augmentent légèrement sous l'effet du couple.

on remarque aussi qu'à $t=3s$, la tension d'alimentation $v_{as1}(V)$ et le courant statorique $i_{as1}(A)$ sont de même signe donc, la machine absorbe de l'énergie active et réactive (nécessaire pour l'entraînement de la charge et pour sa magnétisation) de la source (réseau électrique). Par contre à $t=7s$, la tension statorique $v_{as1}(V)$ et le courant statorique $i_{as1}(A)$ sont de signe inverse alors, la machine fournit de la puissance active vers la source et absorbe de l'énergie réactive nécessaire pour sa magnétisation. On constate aussi que l'angle de déphasage électrique entre les deux étoiles est de $(\alpha=30^\circ)$, cet angle est observé par les grandeurs (tension et courant) selon les axes réels.



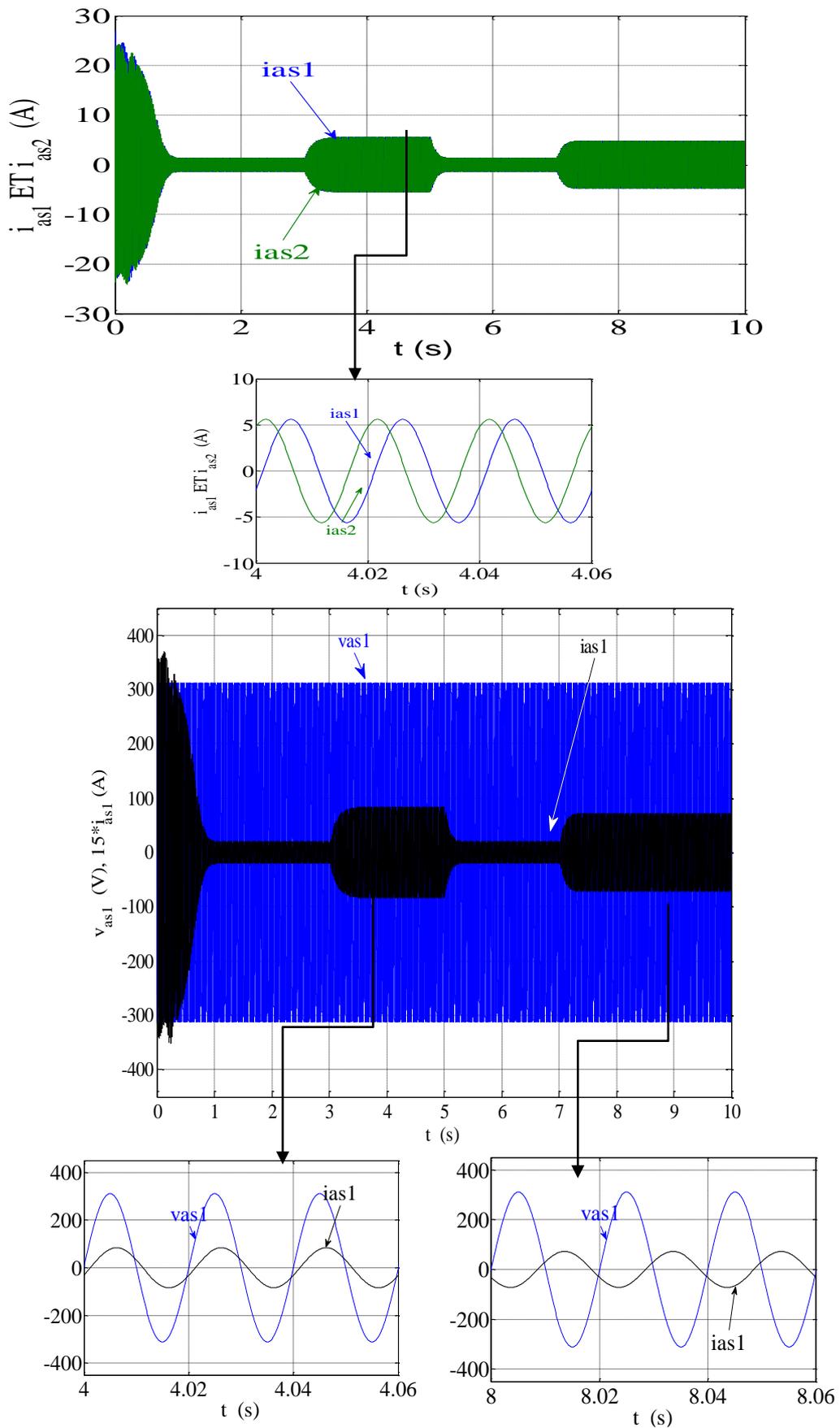


Fig. II. 3 Performances de la MASDE

II.7 Alimentation de la MASDE par onduleurs de tension à commande

M.L.I

II.7.1 Modélisation de l'onduleur

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou à M.L.I) est un convertisseur statique du domaine de l'électronique de puissance qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable.

Le contrôle de la vitesse et du couple de la MASDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable.

Chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches ou chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisée par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

Les tensions composées sont :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé (} K_i \text{ conduit, } \bar{K}_i \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert (} K_i \text{ bloqué, } \bar{K}_i \text{ conduit)} \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{cases} f_i + \bar{f}_i = 1 \\ i = 1 \dots 3 \end{cases}$$

La figure II.4 représente le schéma de l'onduleur triphasé.

Les tensions composées sont :

$$V_{AB} = v_{as1} - v_{bs1} = E(f_1 - f_2) \quad (\text{II.33})$$

$$V_{BC} = v_{bs1} - v_{cs1} = E(f_2 - f_3) \quad (\text{II.34})$$

$$V_{CA} = v_{cs1} - v_{as1} = E(f_3 - f_1) \quad (\text{II.35})$$

Les tensions simples $v_{as1}, v_{bs1}, v_{cs1}$ forment un système triphasé équilibré, tel que :

$$v_{as1} + v_{bs1} + v_{cs1} = 0 \quad (\text{II.36})$$

La résolution des équations (II.33), (II.34), (II.35) et (II.36) donne :

$$\begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Pour le second onduleur, on obtient aussi :

$$\begin{bmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

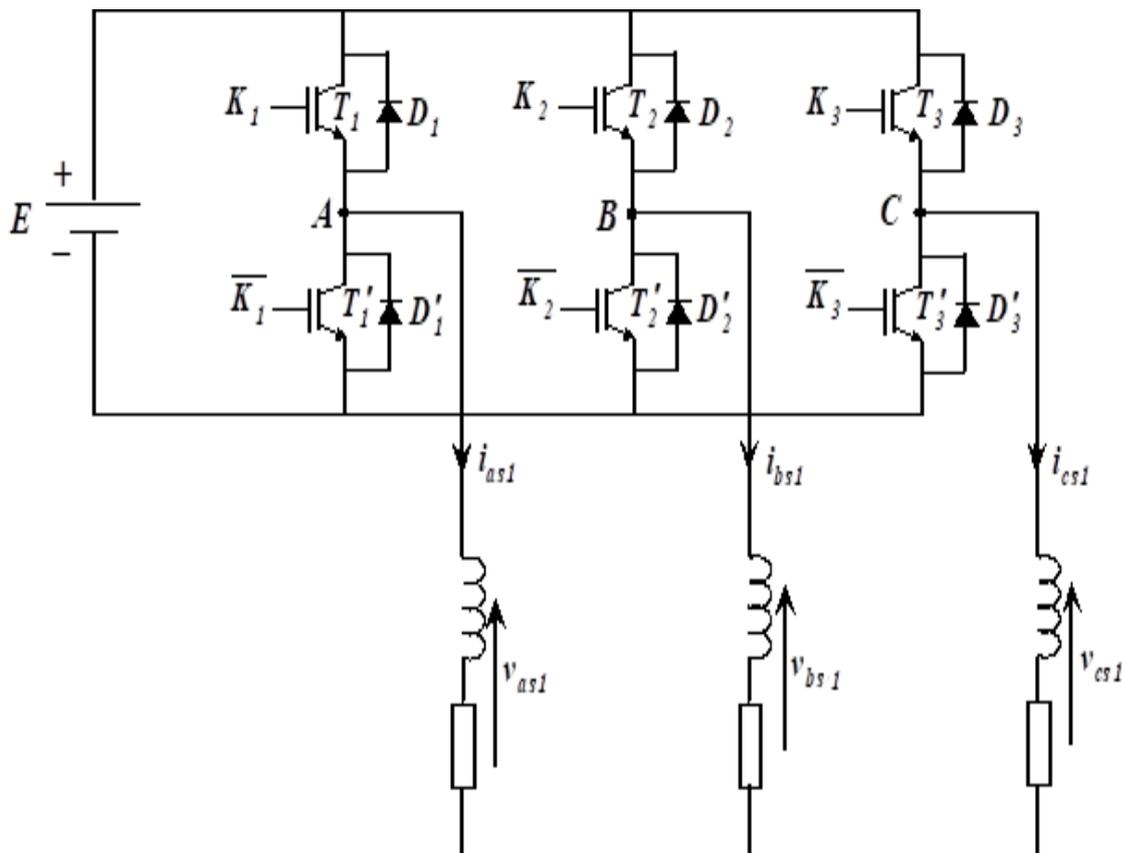


Fig. II. 4 Schéma de l'onduleur triphasé

II.7.2 Commande par modulation sinus-triangle

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la

modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

Pour la première étoile :

$$\begin{cases} v_{a1}^* = v_m \sin(2\pi ft) \\ v_{b1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c1}^* = v_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Pour la seconde étoile, il suffit de remplacer dans le système d'équations (II.39), $(2\pi ft)$ par $(2\pi ft - \alpha)$ et l'indice 1 par 2.

$$\begin{cases} v_{a2}^* = v_m \sin(2\pi ft - \alpha) \\ v_{b2}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c2}^* = v_m \sin\left(2\pi ft - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} [4(t/T_p) - 1] & \text{si } 0 \leq t < T_p/2 \\ V_{pm} [-4(t/T_p) + 3] & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivant :

- L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f).
- Le coefficient de réglage en tension régal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_m) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_{pm}).

La figure II.5 représente le principe de la commande par M.L.I sinus-triangle [tension (V_m, V_{pm}), tension ($v_{as1} V$) et la commande (f)] respectivement dont $m= 21$ et $r= 0.8$

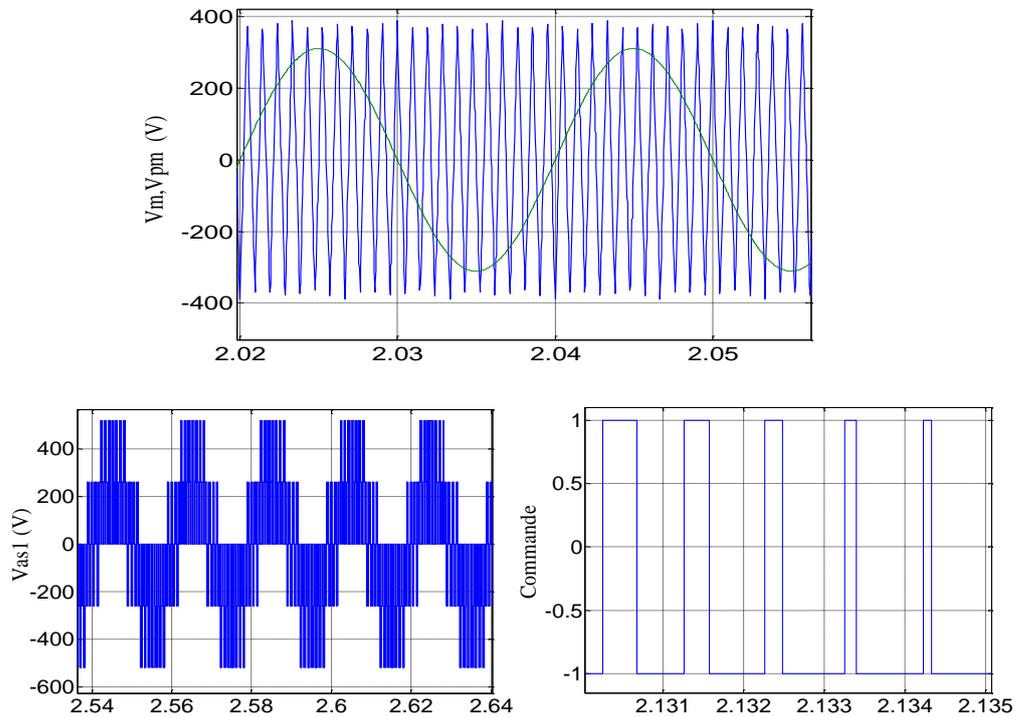


Fig. II. 5 Principe de la commande par M.L.I sinus-triangle

II.7.3 Association de la MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

La figure II.6 représente l'association de la MASDE-convertisseurs de tensions à commande MLI sinus-triangle

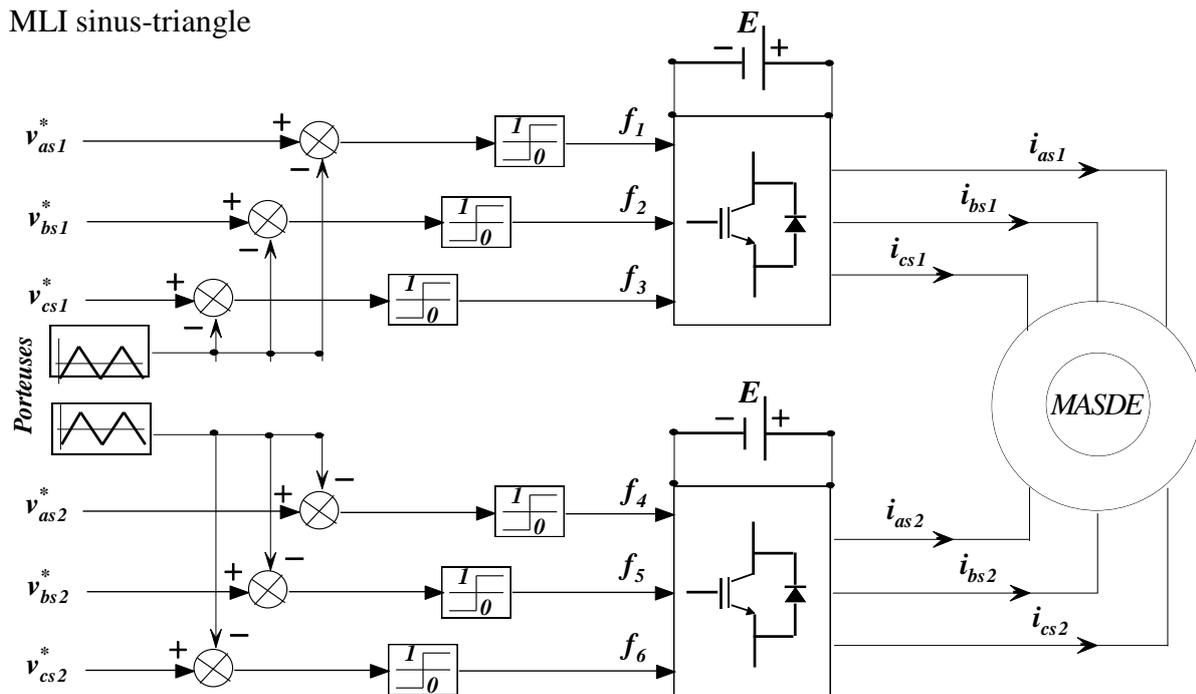


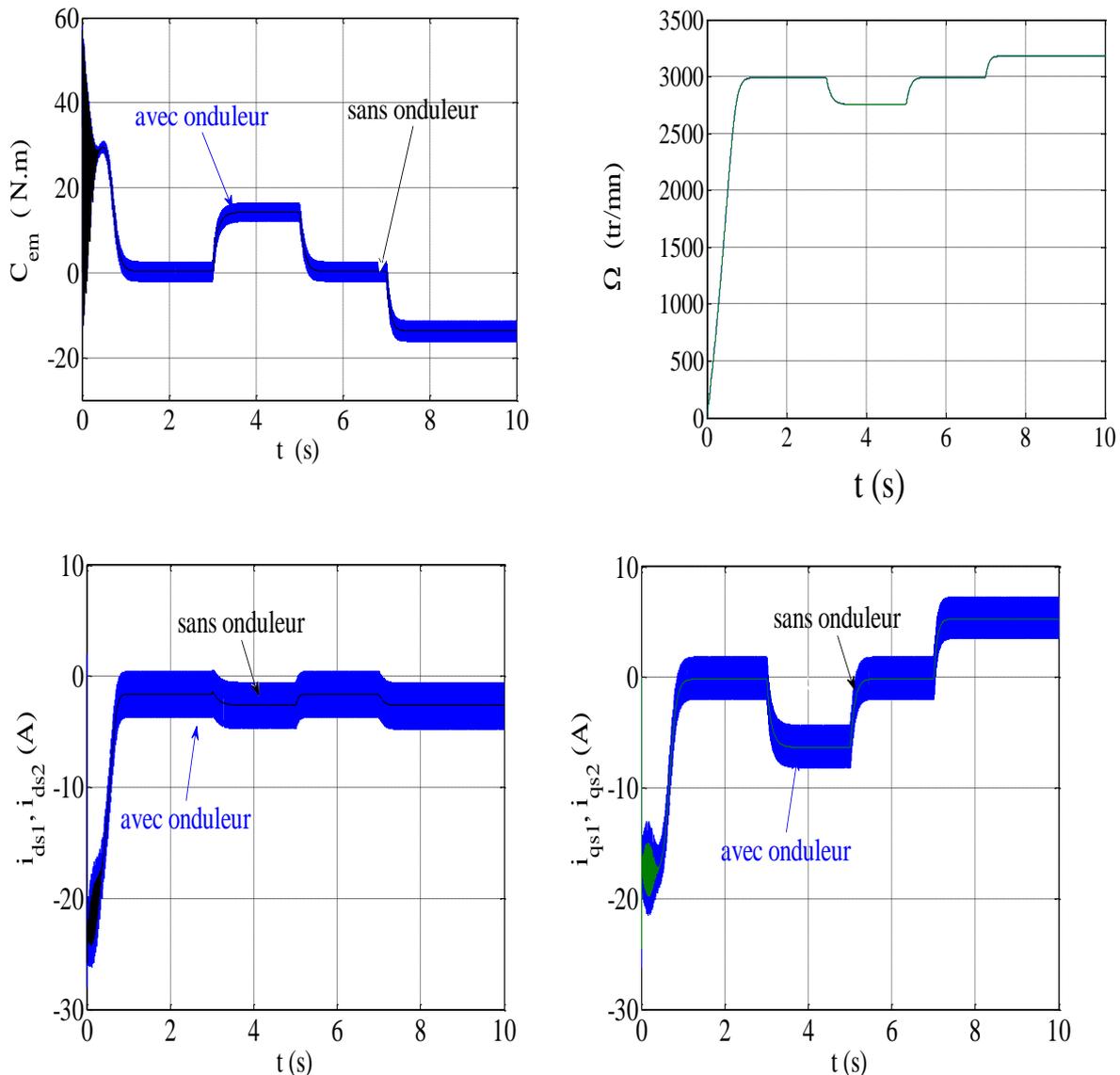
Fig. II. 6 MASDE-convertisseurs de tension à commande MLI

II.7.4 Simulation et interprétation des résultats

La simulation est effectuée pour un décalage angulaire $\alpha = 30$.

La figure II.7 représente les résultats de simulation de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension à commande M.L.I. sinus-triangle dont $r = 0.8$ et $m = 21$, avec l'application d'une charge $C_r = 14\text{N.m}$, -14N.m à $t=3\text{s}$, $t=5\text{s}$ respectivement puis $C_r = -14\text{N.m}$ à $t=7\text{s}$ jusqu'à 10s .

Les résultats montrent que les courbes sont similaires à celle obtenues par alimentation directe. Cependant on constate qu'il y a une apparition nette d'ondulation surtout dans les allures du couple électromagnétique, des courants statoriques et de ceux suivant les deux axes directs et en quadrature (étoiles 1 et 2), ces ondulations sont principalement dues aux harmoniques induits par l'onduleur de tension.



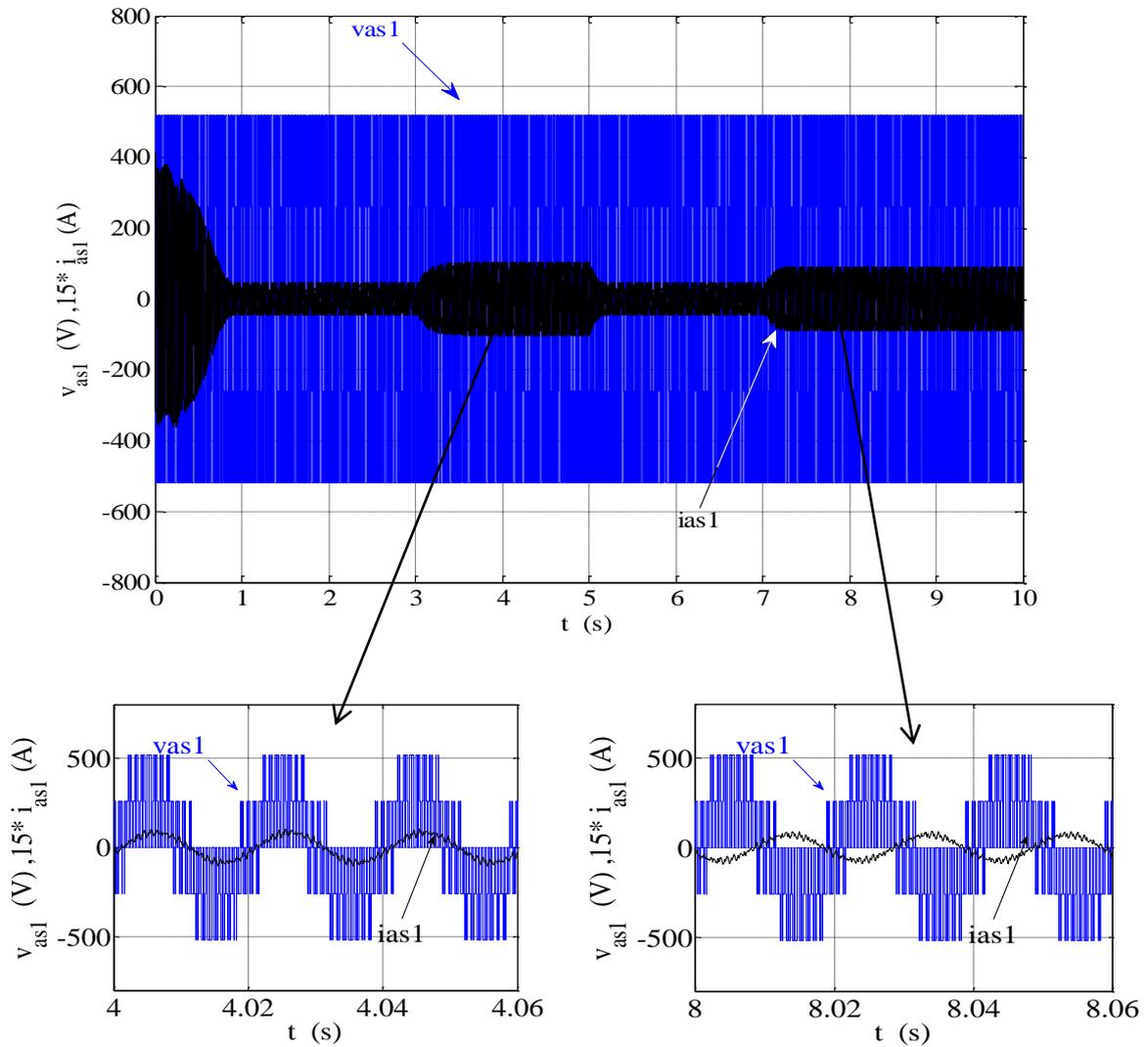


Fig. II. 7 Évolutions des caractéristiques de la MASDE alimentée par deux onduleurs, suivis de l'application des charges $C_r = 14$ N.m, -14N.m respectivement entre les intervalles de temps [3,5]s et [7,10]s

II.8 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la modélisation de la machine asynchrone à double étoile dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park.

L'étude des caractéristiques de la MASDE alimentée par des sources sinusoïdales, puis par des convertisseurs de fréquences à commande MLI, en démarrage à vide puis en charge a été accomplie. Le processus de démarrage de la machine, suivi de l'application d'une charge a été simulé sous le logiciel Matlab/Simulink.

Lors du fonctionnement de la machine en charge, on a observé une diminution de la vitesse en fonctionnement moteur et une augmentation en fonctionnement génératrice, ce qui nécessite une régulation.

Dans le chapitre suivant, nous modéliserons la génératrice asynchrone double étoile en fonctionnement autonome en tenant compte de la saturation de circuit magnétique.

**CHAPITRE 3 : ETUDE PAR SIMULATION D'UNE GENERATRICE
ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE EN FONCTIONNEMENT
AUTONOME**

III. Chapitre III : Étude par simulation d'une génératrice asynchrone double étoile en fonctionnement autonome

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est la modélisation et l'analyse de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE), puis en tenant compte de la saturation du circuit magnétique, ensuite nous déterminons la capacité d'excitation et la modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE, et les différentes charges statiques après illustration et visualisation des résultats de simulation des différentes charges statiques et des différentes formes de compensations et nous enfin simulerons cette génératrice avec un régulateur de vitesse pour pouvoir régler le problème des chute de tension.

III.2 Description de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE)

La génératrice asynchrone double étoile (GASDE) comme la génératrice asynchrone à cage (GAS), si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, elle se développe alors une force électromagnétique similaire à celle qui obtenue avec un générateur synchrone, la machine n'engendre pas sa propre énergie d'excitation. Pour cela, il faudra lui apporter cette énergie et stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence à travers des condensateurs connectés à la borne du stator [18].

Une présentation schématique de la GASDE auto-amorcée est donnée par la figure III.1.

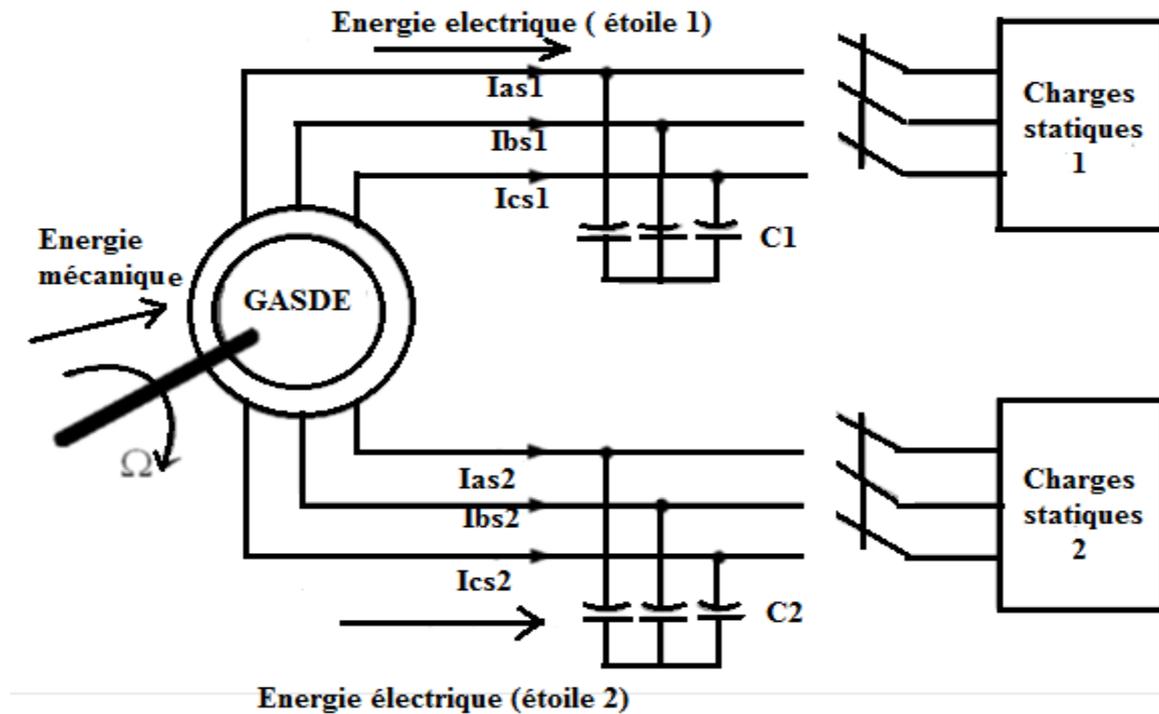


Fig. III. 1 Système de conversion d'énergie basée sur la GASDE

III.3 Modèle de la GASDE dans le repère de Park (d,q)

Afin d'étudier la machine asynchrone double étoile en fonctionnement génératrice il faut réécrire les équations des tensions et des flux pour mode génératrice par le placement devant chaque courant statorique d'un signe moins et prise en compte des hypothèses simplificatrices en considération la saturation du circuit magnétique n'est pas négligeable car l'inductance de magnétisation est le facteur principale stabilisation de la tension générée.

III.4 Choix du référentiel

Il est plus intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit au stator, soit au rotor, ou au champ tournant, selon les objectifs de l'application. Dans chacun de ces nouveaux référentiels, les équations de la machine deviennent plus simples que dans le référentiel quelconque.

En choisissant un référentiel (d,q) lié au stator $\omega_{\text{coor}} = \omega_s = 0$ car C'est le référentiel le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées du régime transitoire avec une variation importante de la vitesse de rotation, on obtient les équations suivants :

III.4.1 Équations électriques

$$\begin{cases} v_{ds1} = -R_{s1}i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} \\ v_{qs1} = -R_{s1}i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} \\ v_{ds2} = -R_{s2}i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} \\ v_{qs2} = -R_{s2}i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.1)$$

III.4.2 Équations magnétiques

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = -L_{s1}i_{ds1} - L_{lm}(i_{ds1} + i_{ds2}) - L_{dq}i_{qs2} + L_{md}(-i_{ds2} - i_{ds1} + i_{rd}) \\ \varphi_{qs1} = -L_{s1}i_{qs1} - L_{lm}(i_{qs1} + i_{qs2}) - L_{dq}i_{ds2} + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{rq}) \\ \varphi_{ds2} = -L_{s2}i_{ds2} - L_{lm}(i_{ds1} + i_{ds2}) - L_{dq}i_{qs1} + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{rd}) \\ \varphi_{qs2} = -L_{s2}i_{qs2} - L_{lm}(i_{qs1} + i_{qs2}) - L_{dq}i_{ds1} + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{rq}) \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{md}(i_{dr} - i_{ds1} - i_{ds2}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{md}(i_{qr} - i_{qs1} - i_{qs2}) \end{cases} \quad (III.2)$$

L_{s1}, L_{s2}, L_r : Les inductances de fuite statoriques (étoile 1 et 2) et rotorique respectivement.

L_{md}, L_{mq} : Les inductances cycliques de saturation sont données par [19]

$$L_{md} = L_m + \frac{i_{md}}{i_{mq}} L_{dq} = L \cos^2 \mu + L_m \sin^2 \mu \quad (III.3)$$

$$L_{mq} = L_m + \frac{i_{mq}}{i_{md}} L_{dq} = L \sin^2 \mu + L_m \cos^2 \mu \quad (III.4)$$

Avec :

$$\cos^2 \mu = \frac{i_{md}}{|i_m|} \quad (III.5)$$

$$\sin^2 \mu = \frac{i_{mq}}{|i_m|} \quad (III.6)$$

Les inductances cycliques totales statoriques et rotoriques selon les axes d et q sont exprimé par [] :

$$\begin{aligned} L_{ds1} &= L_{s1} + L_{md} \\ L_{qs1} &= L_{s1} + L_{mq} \\ L_{ds2} &= L_{s2} + L_{md} \end{aligned} \quad (III.7)$$

$$L_{qs2} = L_{s2} + L_{mq}$$

$$L_{rd} = L_r + L_{md}$$

$$L_{rq} = L_r + L_{mq}$$

L_{dq} : L'inductance cyclique d'inter saturation est donnée par [20].

$$L_{dq} = \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|} \frac{dL_m}{d|i_m|} = \frac{i_{md}i_{mq}}{|i_m|^2} (L - L_m) \quad (III.8)$$

L: L'inductance dynamique donnée par la relation suivante :

$$L = \frac{d|\varphi_m|}{d|i_m|} \quad (III.9)$$

L_m : est l'inductance de magnétisation donnée par:

$$L_m = \frac{|\varphi_m|}{|i_m|} \quad (III.10)$$

Pour tenir compte de la saturation du circuit magnétique de la machine, on doit introduire la courbe de magnétisation qui est généralement obtenue par expérimentation et approximée par un polynôme d'interpolation.

L'inductance de magnétisation L_m en fonction de i_m est approximée par le polynôme d'interpolation suivant [17] :

$$L_m = 0.1406 + 0.0014i_m - 0.0012i_m^2 + 0.00005i_m^3$$

Il en résulte à partir des équations (III.3), (III.4), (III .7) que sous les conditions magnétiques linéaires

$$L_{dq}=0, L_{md} = L_{mq} = L_m, L_{s1d} = L_{s1q}, L_{s2d} = L_{s2q} \text{ et } L_{rd} = L_{rq} \quad (III.11)$$

L'expression du courant de magnétisation est exprimée par [21] :

$$i_m = \sqrt{(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{rd})^2 + (-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{rq})^2} \quad (III.12)$$

La relation du couple électromagnétique de la génératrice est donnée par :

$$C_{em} = pL_m ((i_{qs1} + i_{qs2})i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})i_{qr}) \quad (III.13)$$

Le couple électromagnétique en fonction de flux :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r + L_m} [\varphi_{dr}(i_{qs1} + i_{qs2}) - \varphi_{qr}(i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (III.14)$$

L'équation dynamique est :

$$C_r - C_{em} = \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (III.15)$$

En remplaçant le système d'équations (III.2) dans (III.1), on obtient Le système d'équations (III.16) suivant :

$$\begin{aligned} \frac{di_{ds1}}{dt} &= -\frac{1}{(L_{s1} + L_m)} [v_{ds1} + R_{s1}i_{ds1} + L_m \left(\frac{di_{ds2}}{dt} - \frac{di_{dr}}{dt} \right) + L_m \left(\frac{di_{ds2}}{dt} + \frac{di_{ds1}}{dt} \right)] \\ \frac{di_{qs1}}{dt} &= -\frac{1}{(L_{s1} + L_m)} [v_{qs1} + R_{s1}i_{qs1} + L_m \left(\frac{di_{qs2}}{dt} - \frac{di_{qr}}{dt} \right) + L_m \left(\frac{di_{qs2}}{dt} + \frac{di_{qs1}}{dt} \right)] \\ \frac{di_{ds2}}{dt} &= -\frac{1}{(L_{s2} + L_m)} [v_{ds2} + R_{s2}i_{ds2} + L_m \left(\frac{di_{ds1}}{dt} - \frac{di_{dr}}{dt} \right) + L_m \left(\frac{di_{ds2}}{dt} + \frac{di_{ds1}}{dt} \right)] \\ \frac{di_{qs2}}{dt} &= -\frac{1}{(L_{s2} + L_m)} [v_{qs2} + R_{s2}i_{qs2} + L_m \left(\frac{di_{qs1}}{dt} - \frac{di_{qr}}{dt} \right) + L_m \left(\frac{di_{qs2}}{dt} + \frac{di_{qs1}}{dt} \right)] \\ \frac{di_{dr}}{dt} &= \frac{1}{(L_r + L_m)} [v_{dr} - R_r i_{dr} + L_m \left(\frac{di_{ds1}}{dt} + \frac{di_{ds2}}{dt} \right) + \omega_r ((L_r + L_m)i_{qr} - L_m \omega_r (i_{qs1} + i_{qs2}))] \\ \frac{di_{qr}}{dt} &= \frac{1}{(L_r + L_m)} [v_{qr} - R_r i_{qr} + L_m \left(\frac{di_{qs1}}{dt} + \frac{di_{qs2}}{dt} \right) - \omega_r ((L_r + L_m)i_{dr} + L_m \omega_r (i_{ds1} + i_{ds2}))] \end{aligned} \quad [III.16]$$

III.5 Phénomène d'auto-amorçage

En l'absence de réseau pilote, il est possible d'auto-exciter la génératrice asynchrone au moyen d'un banc du condensateur, mais l'amorçage et la protection contre les surtensions de résonance nécessitent une étude très soignée de l'installation. Le phénomène d'auto-amorçage de la génératrice commence par le flux rémanent et avec la rotation du rotor, il donne une petite tension/courant aux bornes de la GASDE et à travers le condensateur d'auto-amorçage qui augmentera la tension/courant par sa nature, puis il renvoie de tension/courant de valeur supérieur par rapport à celle envoyée par la génératrice. Ce processus est répété jusqu'à l'instant où la tension/courant renvoyée par le condensateur soit égale à celle envoyée par la génératrice (point de fonctionnement) [22].

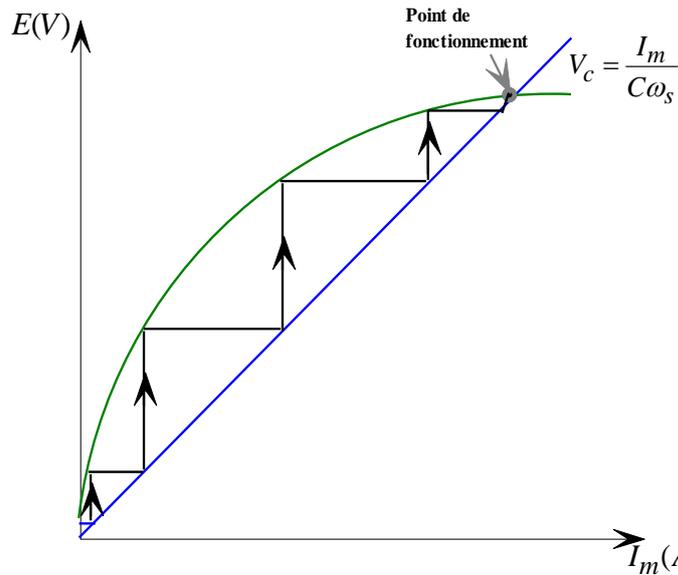


Fig III. 2 Schéma du phénomène d'auto-amorçage

III.5.1 Détermination de la valeur des capacités d'auto amorçage

L'auto-amorçage de la GASDE, ne peut avoir lieu que si la puissance apparente qu'elle produit correspond à celle qu'elle absorbe. Cependant, pour la partie puissance réactive, on doit insérer et déterminer la valeur des capacités d'excitation [23]

$$C > \frac{1}{\omega_s^2 L_S}$$

Cette condition montre que la valeur minimale (critique) conduisant à l'auto amorçage est fonction de l'inductance cyclique statorique ainsi que de la pulsation rotorique du glissement, car pour $g = 0$, on a $\omega_s = \omega_r$, d'où :

$$C_{\min} > \frac{1}{\omega_r^2 L_S}$$

En pratique, seule la valeur de C_{\min} est intéressante, car au-delà de C_{\max} correspond à un fonctionnement instable.

III.5.2 Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE

La modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE se résume par les équations des tensions aux bornes des condensateurs donnés, sachant que le système d'axe est lié au stator, le système d'équations suivant « d, q » devient :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}V_{ds1} = \frac{1}{C_1}i_{dc1} \\ \frac{d}{dt}V_{qs1} = \frac{1}{C_1}i_{qc1} \\ \frac{d}{dt}V_{ds2} = \frac{1}{C_1}i_{dc2} \\ \frac{d}{dt}V_{qs2} = \frac{1}{C_2}i_{qc2} \end{cases} \quad (III.17)$$

Où :

- $i_{dc1}, i_{qc1}, i_{dc2}, i_{qc2}$: Courants d'excitation selon les axes d et q.
- C_1, C_2 : Condensateurs d'excitation aux bornes des étoiles 1 et 2

Dans le cas d'un fonctionnement à vide, on a : $i_{ds1}, i_{qs1}, i_{ds2}, i_{qs2}, i_{dr}, i_{qr}$

$$\begin{aligned} i_{ds1} &= i_{dc1} \\ i_{qs1} &= i_{qc1} \\ i_{ds2} &= i_{dc2} \\ i_{qs2} &= i_{qc2} \end{aligned} \quad (III.18)$$

III.6 Modélisations des charges statiques

III.6.1 Charges résistives

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}V_{ds1} = \frac{1}{C_1} [i_{ds1} - \frac{V_{ds1}}{R_{ch1}}] \\ \frac{d}{dt}V_{qs1} = \frac{1}{C_1} [i_{qs1} - \frac{V_{qs1}}{R_{ch1}}] \\ \frac{d}{dt}V_{ds2} = \frac{1}{C_1} [i_{ds2} - \frac{V_{ds2}}{R_{ch2}}] \\ \frac{d}{dt}V_{qs2} = \frac{1}{C_2} [i_{qs2} - \frac{V_{qs2}}{R_{ch2}}] \end{cases} \quad (III.19)$$

III.6.2 Charge à effet inductive

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds1}}{dt} = \frac{1}{C_1} [i_{ds1} - i_{ds1L}] \\ \frac{di_{ds1L}}{dt} = \frac{1}{L_{ch1}} [V_{ds1} - R_{ch1}i_{ds1L}] \\ \frac{dv_{qs1}}{dt} = \frac{1}{C_1} [i_{qs1} - i_{qs1L}] \\ \frac{di_{qs1L}}{dt} = \frac{1}{L_{ch1}} [V_{qs1} - R_{ch1}i_{qs1L}] \end{cases} \quad (III.20)$$

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds2}}{dt} = \frac{1}{C_2} [i_{ds2} - i_{ds2L}] \\ \frac{di_{ds2L}}{dt} = \frac{1}{L_{ch2}} [v_{ds2} - R_{ch2}i_{ds2L}] \end{cases}$$

(III.21)

$$\begin{cases} \frac{dv_{qs2}}{dt} = \frac{1}{C_2} [i_{qs2} - i_{qs2L}] \\ \frac{di_{qs2L}}{dt} = \frac{1}{L_{ch2}} [v_{qs2} - R_{ch2}i_{qs2L}] \end{cases}$$

III.6.3 Charge résistive avec compensation série

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds1}}{dt} = \frac{1}{C_1} [i_{ds1} - i_{ds1R}] \\ \frac{dv_{ds1se}}{dt} = \frac{i_{ds1R}}{C_{cse1}} \\ i_{ds1R} = \frac{1}{R_{ch1}} [v_{ds1} - v_{ds1se}] \end{cases}$$

(III.22)

$$\begin{cases} \frac{dv_{qs1}}{dt} = \frac{1}{C_1} [i_{qs1} - i_{qs1L}] \\ \frac{dv_{qs1se}}{dt} = \frac{i_{qs1L}}{C_{cse1}} \\ i_{qs1R} = \frac{1}{R_{ch1}} [v_{qs1} - v_{qs1se}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds2}}{dt} = \frac{1}{C_2} [i_{ds2} - i_{ds2L}] \\ \frac{dv_{ds2se}}{dt} = \frac{i_{ds2L}}{C_{cse2}} \\ i_{ds1R} = \frac{1}{R_{ch2}} [v_{ds2} - v_{ds2se}] \end{cases}$$

(III.23)

$$\begin{cases} \frac{dv_{qs1}}{dt} = \frac{1}{C_2} [i_{qs2} - i_{qs2L}] \\ \frac{dv_{qs2se}}{dt} = \frac{i_{qs2L}}{C_{cse2}} \\ i_{qs1R} = \frac{1}{R_{ch2}} [v_{qs2} - v_{qs2se}] \end{cases}$$

III.6.4 Charge à effet Inductive avec compensation série

$$\begin{cases} \frac{dV_{ds1}}{dt} = \frac{1}{C_1} [i_{ds1} - i_{ds1L}] \\ \frac{dv_{ds1se}}{dt} = \frac{i_{ds1L}}{C_{cse1}} \\ \frac{di_{ds1L}}{dt} = \frac{1}{L_{ch1}} [V_{ds1} - v_{ds1se} - R_{ch1}i_{ds1L}] \end{cases}$$

(III.24)

$$\begin{cases} \frac{dV_{qs1}}{dt} = \frac{1}{C_1} [i_{qs1} - i_{qs1L}] \\ \frac{dv_{qs1se}}{dt} = \frac{i_{qs1L}}{C_{cse1}} \\ \frac{di_{qs1L}}{dt} = \frac{1}{L_{ch1}} [V_{qs1} - v_{qs1se} - R_{ch1}i_{qs1L}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dV_{ds2}}{dt} = \frac{1}{C_2} [i_{ds2} - i_{ds2L}] \\ \frac{dv_{ds2se}}{dt} = \frac{i_{ds2L}}{C_{cse2}} \\ \frac{di_{ds2L}}{dt} = \frac{1}{L_{ch2}} [V_{ds2} - v_{ds2se} - R_{ch2}i_{ds2L}] \end{cases}$$

(III.25)

$$\begin{cases} \frac{dv_{qs1}}{dt} = \frac{1}{C_2} [i_{qs2} - i_{qs2L}] \\ \frac{dv_{qs2se}}{dt} = \frac{i_{qs2L}}{C_{cse2}} \\ \frac{di_{qs2L}}{dt} = \frac{1}{L_{ch2}} [V_{qs2} - v_{qs2se} - R_{ch2}i_{qs2L}] \end{cases}$$

III.7 Simulation et interprétation des résultats

Pour la simulation, il suffit d'introduire le système (III.16) au modèle de la GASDE et de l'implanter sous l'environnement Matlab/Simulink.

Notre simulation est basée sur les paramètres donnés dans l'annexe A.

III.7.1 Fonctionnement à vide et en influence de la capacité d'auto-amorçage

La figure III. 3 représente respectivement l'évolution des tensions et des courants statoriques (étoiles 1 et 2), le courant de magnétisation de la GASDE en fonctionnement avide, avec $C = C_1 = C_2 = 40\mu\text{F}$. Les allures montrent que :

Au démarrage, les tensions générés par les deux étoiles croient d'une façon exponentielle, puis ils se stabilisent respectivement à 224.5 (V) en régime totalement établi à $t = 2.8\text{s}$, et c'est l'instant où le courant de magnétisation atteint son régime sature de $i_m = 6.89(\text{A})$.

La forme des courants statoriques est identique à celle des tensions statoriques (mêmes fréquences) avec un déphasage de 90° .

On voit aussi le déphasage entre les courants de l'étoile 1 et 2 (i_{as1}, i_{as2}) qui est égale à 30° .

On constate que les évolutions des tensions et des courants statoriques suivent la forme de l'évolution du courant de magnétisation.

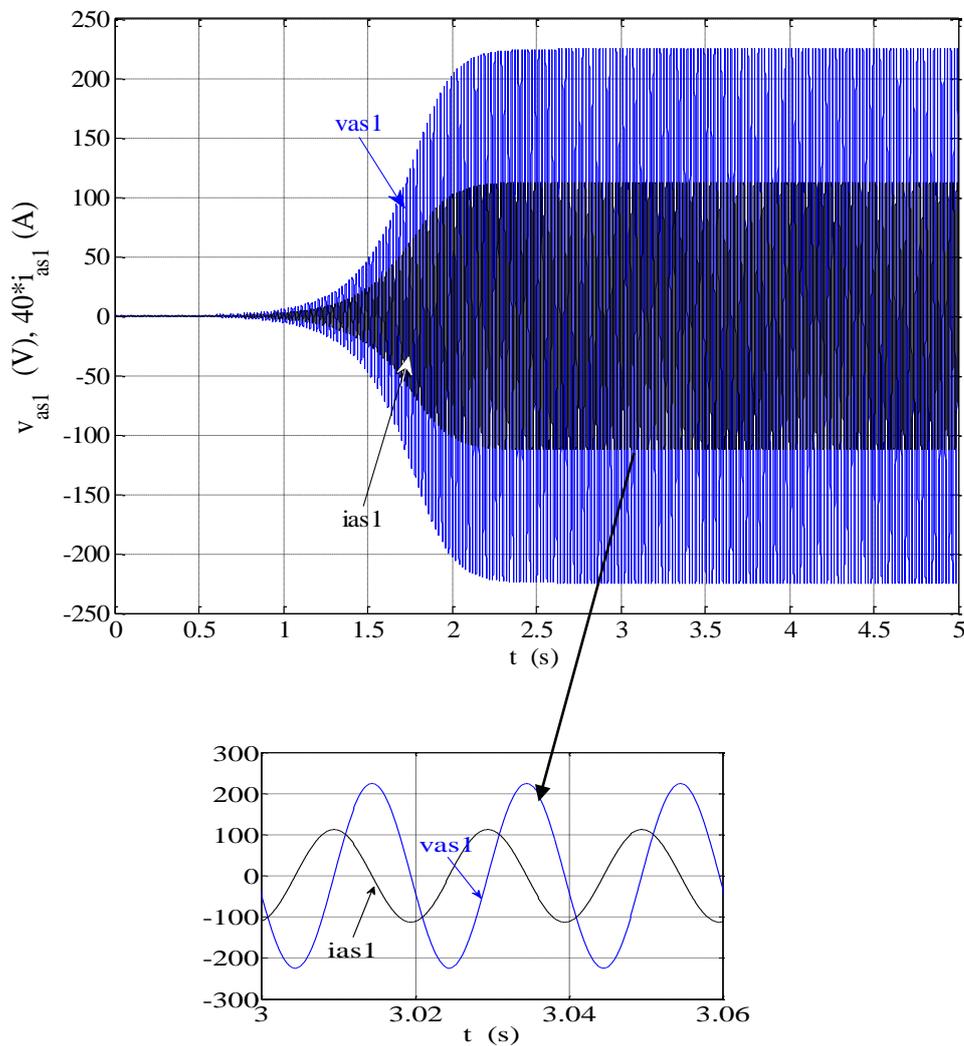
La fréquence est égale 50 Hz.

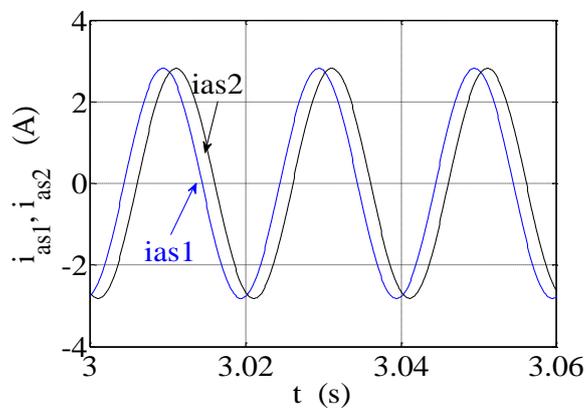
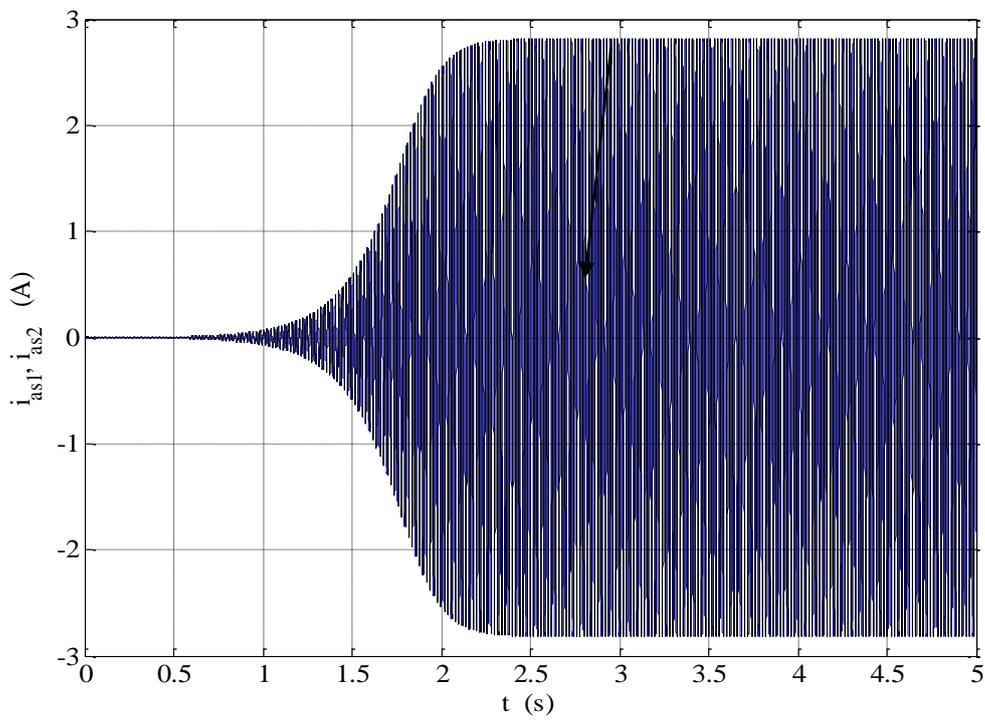
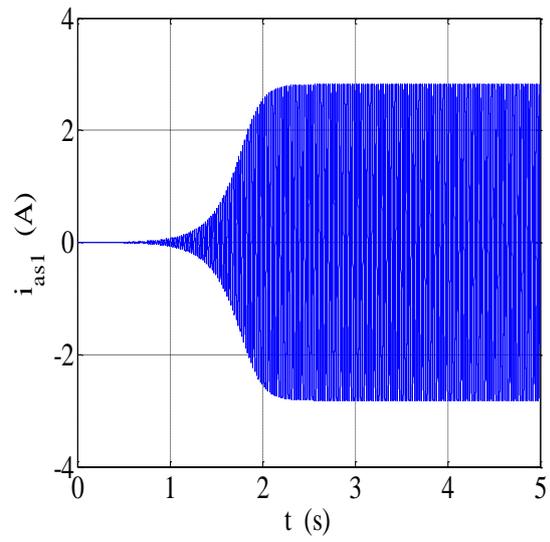
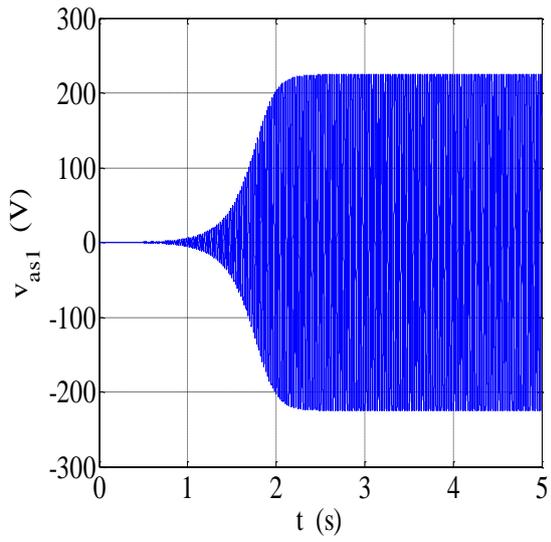
Dans le but de voir l'influence de la capacité d'excitation sur les caractéristiques de la génératrice, on a simulé cette dernière pour des différentes valeurs de C. Le tableau (III. 1) montre les résultats obtenus à l'instant du régime établi (saturé).

TAB III. 1 Influence de la capacité d'excitation C

C	t (S)	v_{as1} (V)	i_{as1} (A)	i_m (A)
35 μF	7	164.8	1.8	4.43
40 μF	2.8	224.5	2.82	6.89
45 μF	1.93	249.5	3.51	8.61

Pour chaque cas, on remarque que l'augmentation de la capacité d'excitation engendre une augmentation au niveau des caractéristiques de la machine ainsi qu'une diminution du temps d'amorçage (plus rapide), ce qui veut dire que les performances de la machine sont fortement influencées par la dimension des condensateurs d'excitations, qui sont limités par un minimum et par un maximum. Dorénavant, les grandeurs des condensateurs d'excitations seront fixées à $40\mu\text{F}$.





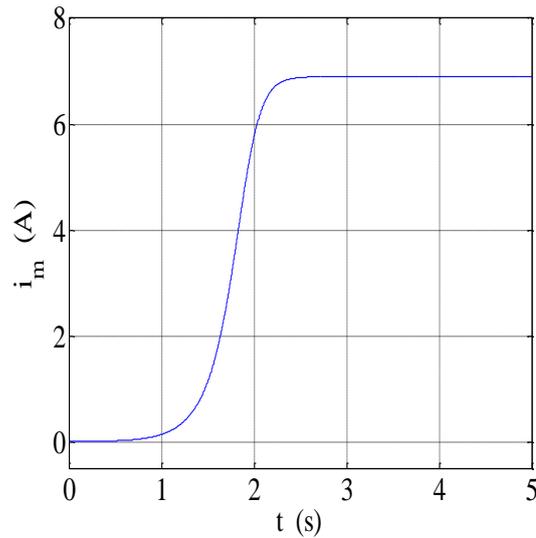


Fig. III. 3 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement à vide

III.7.2 Fonctionnement en charges purement résistives

Au démarrage la génératrice est à vide, Les résistances est insérées a $t = 3s, 6s, 9s$ respectivement $R_{ch} = 250 (\Omega), 200(\Omega), 150. (\Omega)$

- Pour $R_{ch} = 200(\Omega)$

On observe à partir des courbes obtenues de la figure (III.4) que la tension et le courant statoriques ainsi que le courant de magnétisation diminuent puis se stabilisent respectivement à 163.8(V), 2.16(A) et 4.57(A).

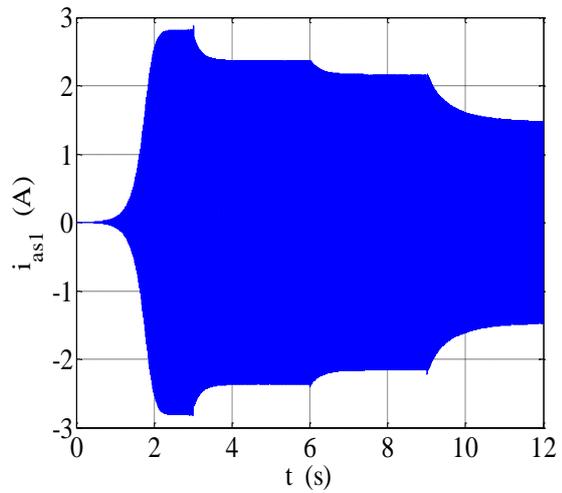
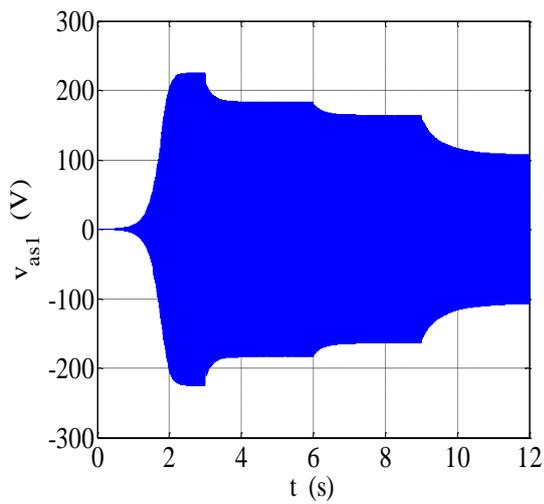
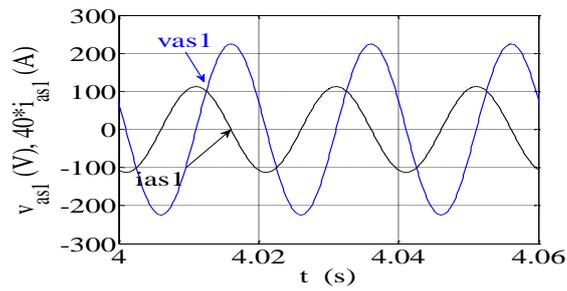
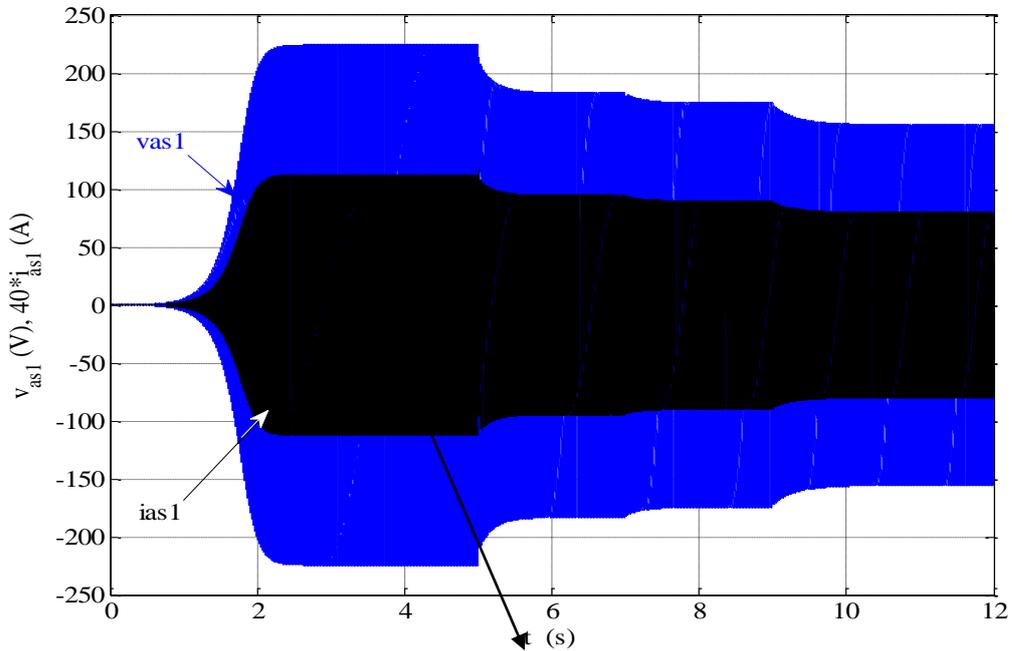
Le tableau suivant nous permet de voir l'influence de la connexion des charges résistives sur les caractéristiques de fonctionnement de la GASDE.

TAB III. 2 Influence de la charge résistive R

$R_{ch} (\Omega)$	$v_{as1} (V)$	$i_{as1} (A)$	$i_m (A)$
150	107	1.48	2.82
200	163.8	2.16	4.57
250	183.3	2.367	5.26

Ces résultats montrent que, l'augmentation de la résistance (diminution de la charge) engendre une augmentation au niveau des caractéristiques de la machine. Alors, la GASDE ne

peut être utilisée qu'avec des charges bien déterminées à cause des performances de fonctionnement de la génératrice qui sont influencées par ses charges



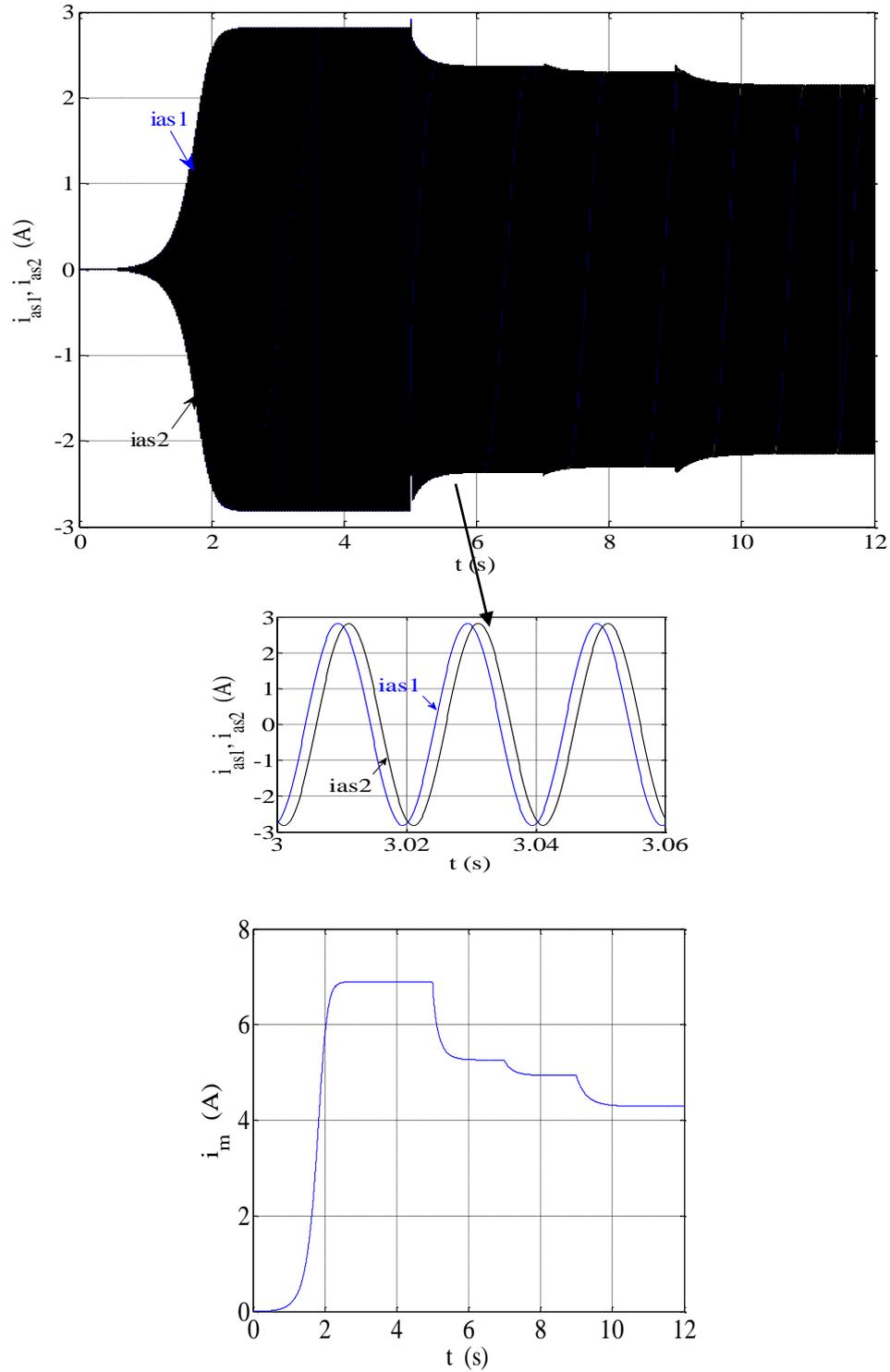


Fig III. 4 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges purement résistives

III.7.3 Fonctionnement en charges à effet inductives

La figure (III. 5) représente l'évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistives-inductive

On fixe la résistance à $200(\Omega)$ est insérées a $t = 3s, 6s, 9s$ respectivement $L_{ch} = 0.01(H), 0.05(H), 0.1 (H)$.

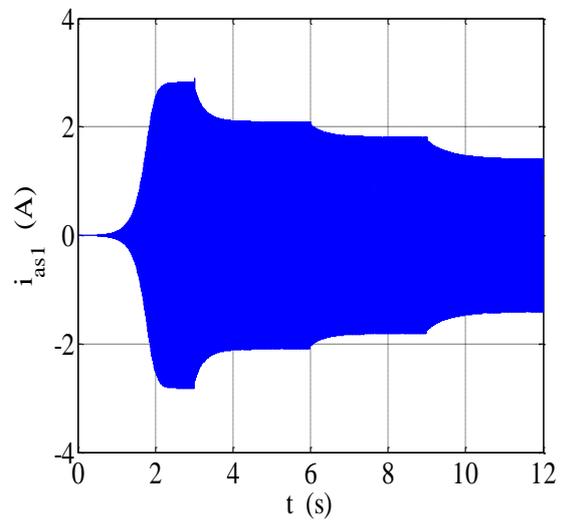
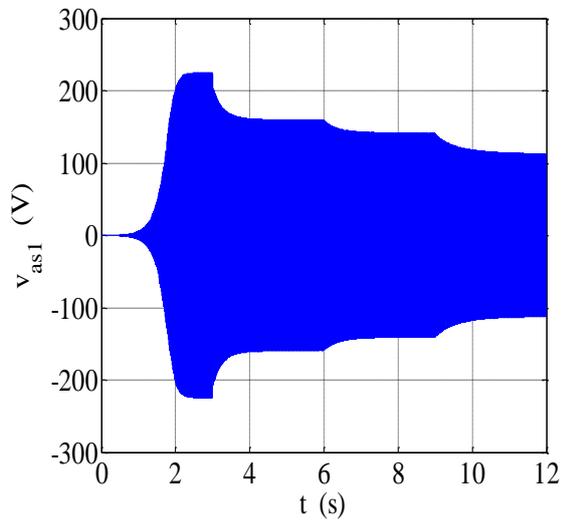
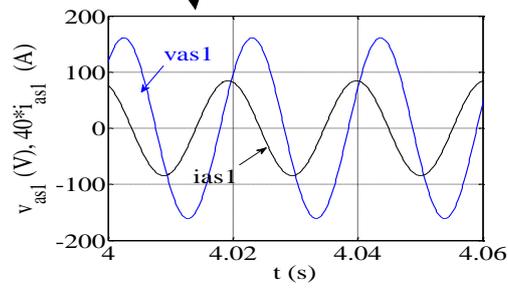
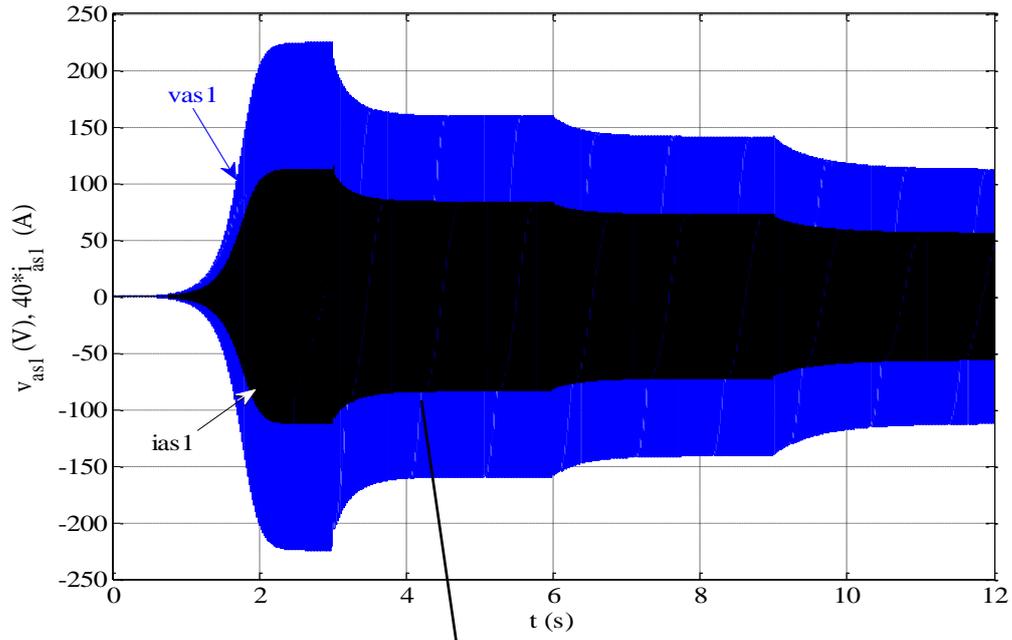
On remarque le même phénomène que la charge purement résistive avec plus de charge qui engendre de diminution supplémentaire au niveau des tensions, des courants statorique et de courant de magnétisation.

Les valeurs de la simulation des différentes valeurs de l'inductance sont données dans le tableau III .3 :

TAB III. 3 Influence de l'inductance L_{ch}

$L_{ch} (H)$	$v_{as1} (V)$	$i_{as1} (A)$	$i_m (A)$
0.01	159.7	2.01	4.428
0.05	141.2	1.814	3.822
0.1	112.3	1.4	2.95

On voit que Les valeurs relevées pour les différentes grandeurs sont inversement proportionnelles à la valeur de l'inductance (proportionnelle à la charge). Cela est dû à l'effet que la charge inductive est consommatrice d'énergie réactive, ce qui est nuisant à la magnétisation de la machine et engendre des diminutions supplémentaires des caractéristiques, car ce sont les capacités d'excitations qui doivent partager la puissance réactive qu'elles produisent entre la machine et les inductances.



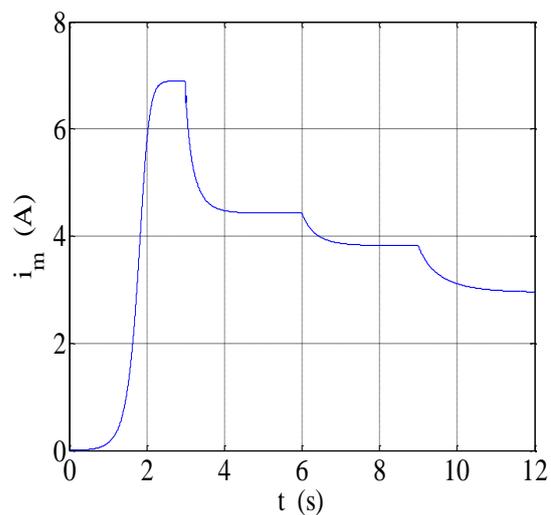
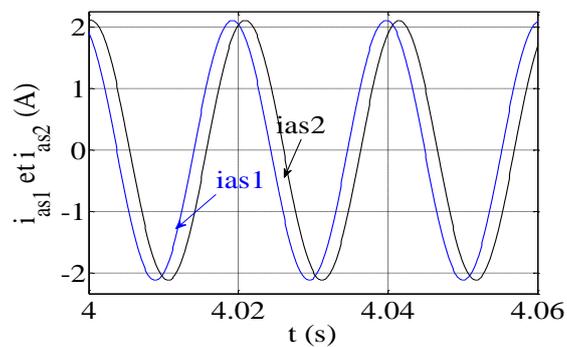
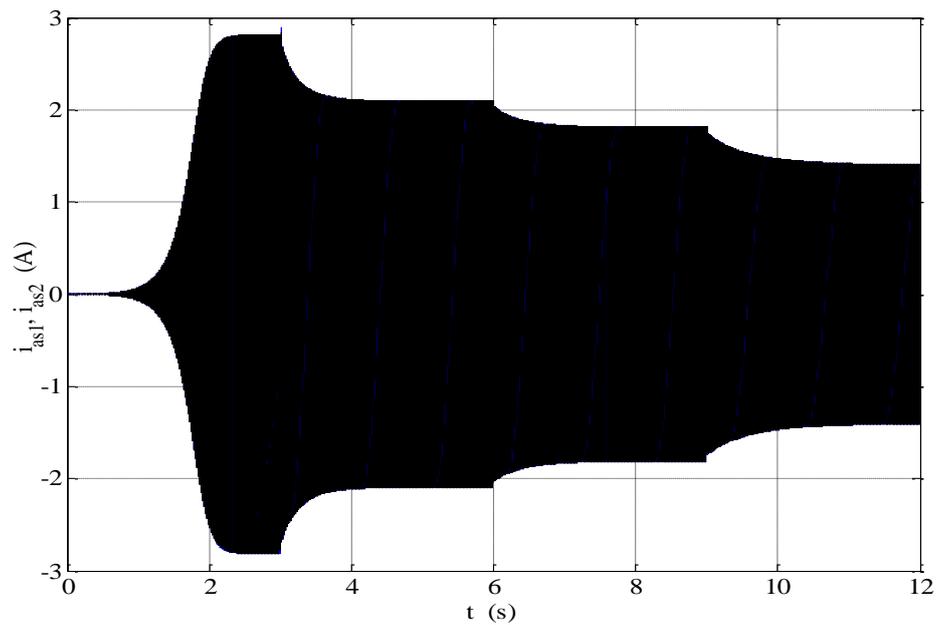


Fig. III. 5 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistives-inductives

III.7.4 Fonctionnement en charges résistives avec compensation série

On fixe la résistance à 200 (Ω) et l'inductance à 0.05(H) est insérées a $t = 5s, 7s, 9s$ respectivement $C_{cse1} = C_{cse2} = 65, 55, 45 (\mu F)$.

D'après la figure (III.6) on remarque que la valeur de la tension diminue de (3.72%) et de courant de magnétisation de 1.45% de la valeur qui correspond au fonctionnement à vide.

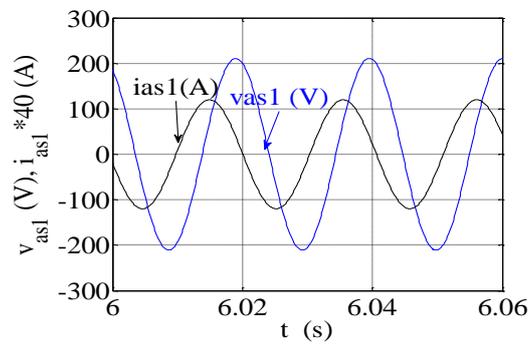
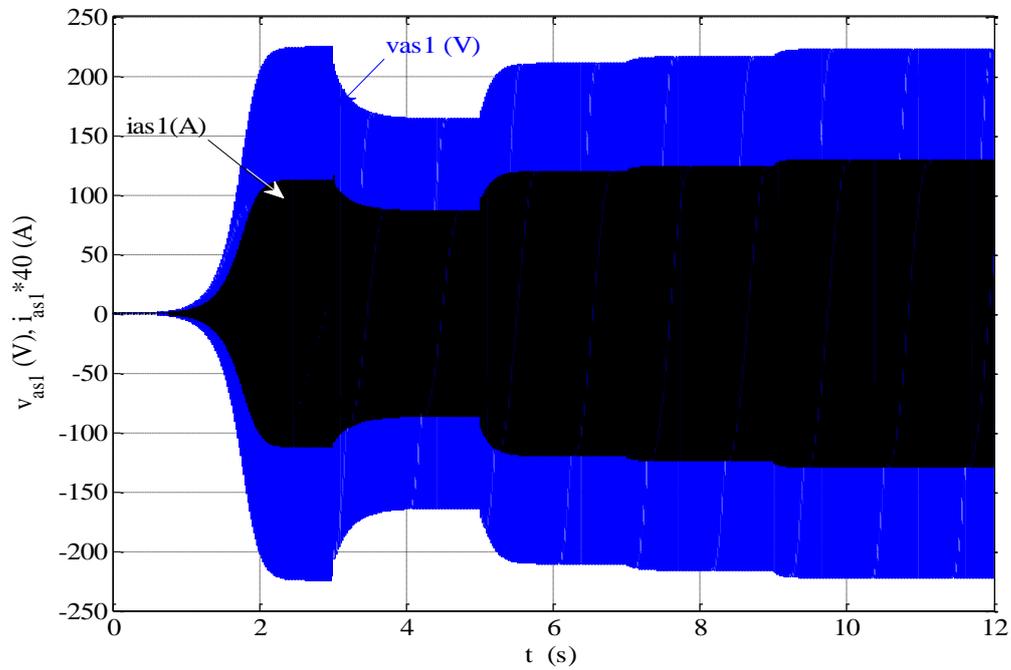
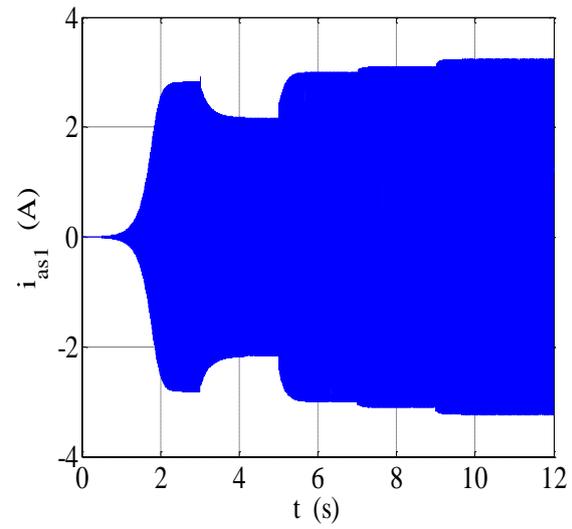
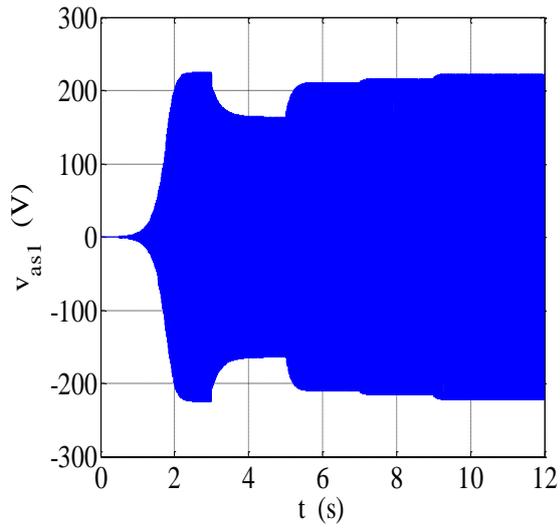
Mais les courants statoriques sont augmentés légèrement par rapport à ceux relevés en charges résistives, et cela est dû au fait que, les condensateurs séries représentent aussi des charges supplémentaires absorbant une partie de l'énergie active, et ce qui se traduit encore par l'augmentation du courant statorique.

Le tableau III.4 représente les différentes valeurs obtenues de la simulation :

TAB III. 4 – Influence de la capacité de compensation C_{cse} en série avec les charges résistives

$C_{cse} (\mu F)$	$v (V)$	$i_{as1} (A)$	$i_m (A)$
45	222.6	3.23	7.15
55	216.14	3.10	6.79
65	210.81	2.99	6.51

Les valeurs des caractéristiques relevées sont inversement Proportionnelles à l'augmentation des capacités.



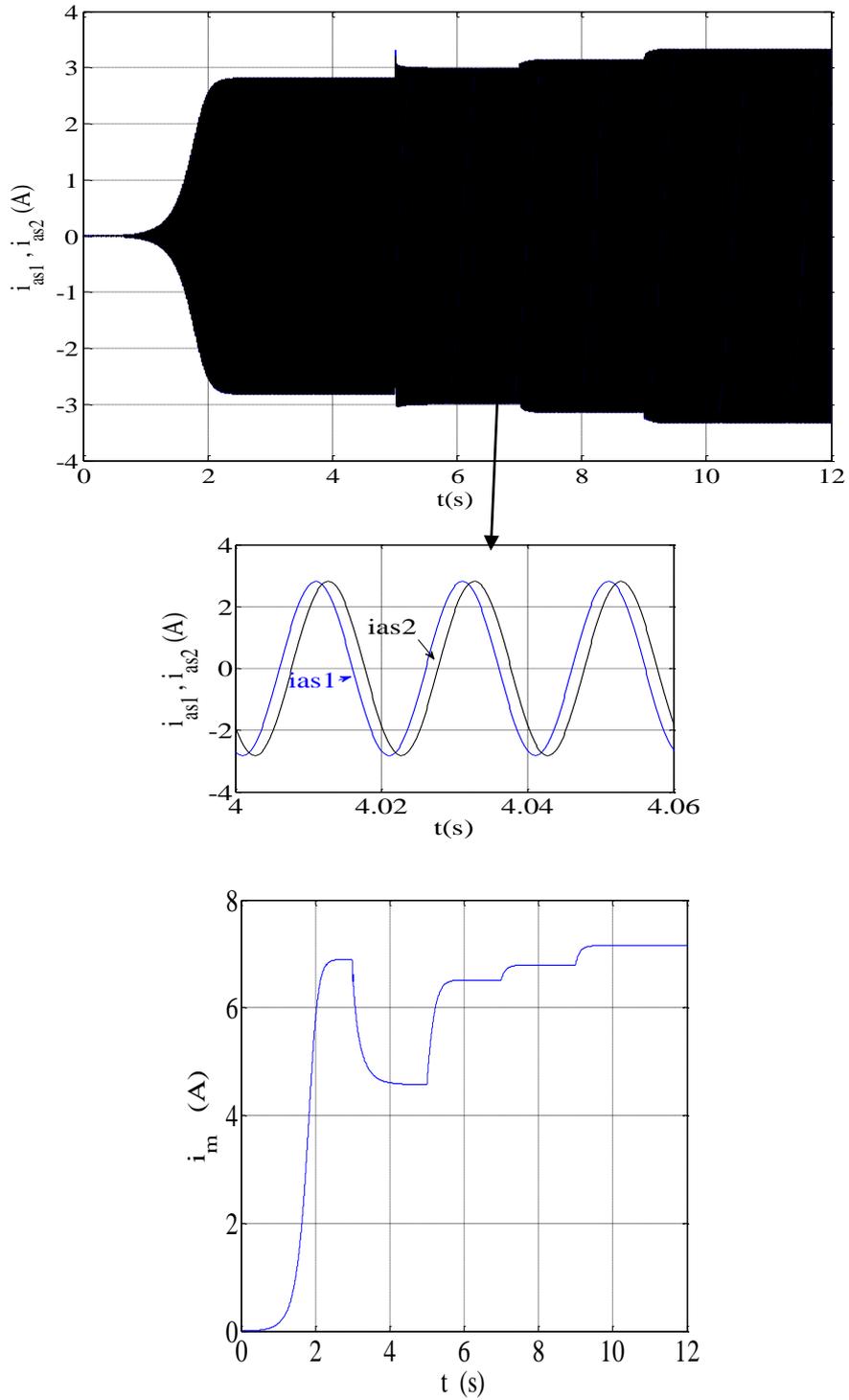


Fig. III. 6 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistives avec compensation série

III.7.5 Fonctionnement en charges à effet inductives avec compensation série

On fixe la résistance à 200 (Ω) et l'inductance à 0.05 est insérées a $t = 5s, 7s, 9s$ respectivement $C_{cseL} = 55(\mu F), 45(\mu F), 35 (\mu F)$.

A l'instant que les capacités de compensation sont connectées en série avec les charges, qui sont insérées séparément (la charge résistive est insérée à $t=3s$) pour mieux voir les résultats obtenus et d'après la figure (III.7), on note que des augmentations importantes au niveau de l'ensemble des caractéristiques observées pour des différentes valeurs de la capacité de compensation.

- Pour $C_{cseL} = 45 (\mu F)$:

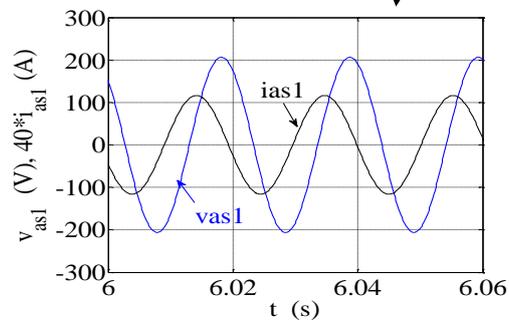
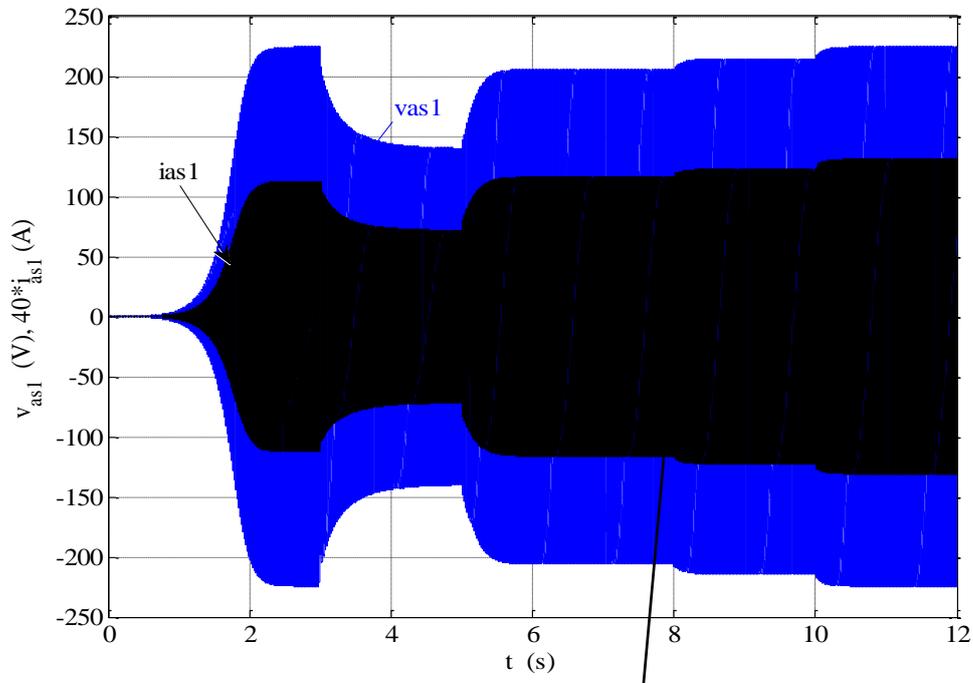
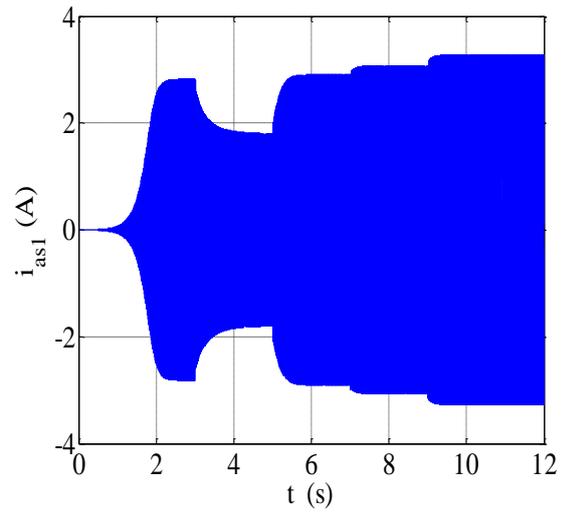
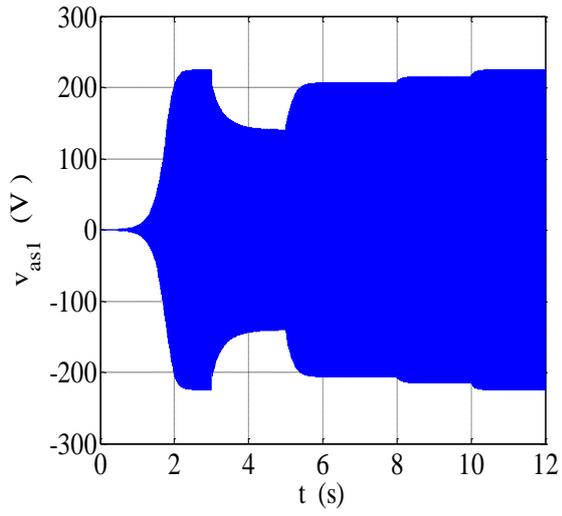
On remarque que la valeur de la tension diminue légèrement (4.5%) de la valeur qui correspond au fonctionnement à vide. Ainsi que les courant statorique et de magnétisation.

Le tableau (III.5) représente les différentes valeurs obtenues de la simulation :

TAB III.5 – Influence de la capacité de compensation C_{cseL} en série avec la charges résistives-inductives

$C_{cseL} (\mu F)$	$v_{as1} (V)$	$i_{as1} (A)$	$i_m (A)$
35	224.5	3.27	7.26
45	214.6	3.07	6.71
55	206.2	2.9	6.293

Ces derniers montrent que, pour un surcroît de $20\mu F$ de la capacité de compensation, on parvient à des diminutions de 18.3V de la tension, 0.37A du courant statoriques et 0.967A du courant de magnétisation. En comparant par rapport aux résultats montres antérieurement dans le tableau III.4, on remarque que les diminutions sont plus importantes. Ce qui veut dire que les inductances consomment de l'énergie réactive apporté par les capacités.



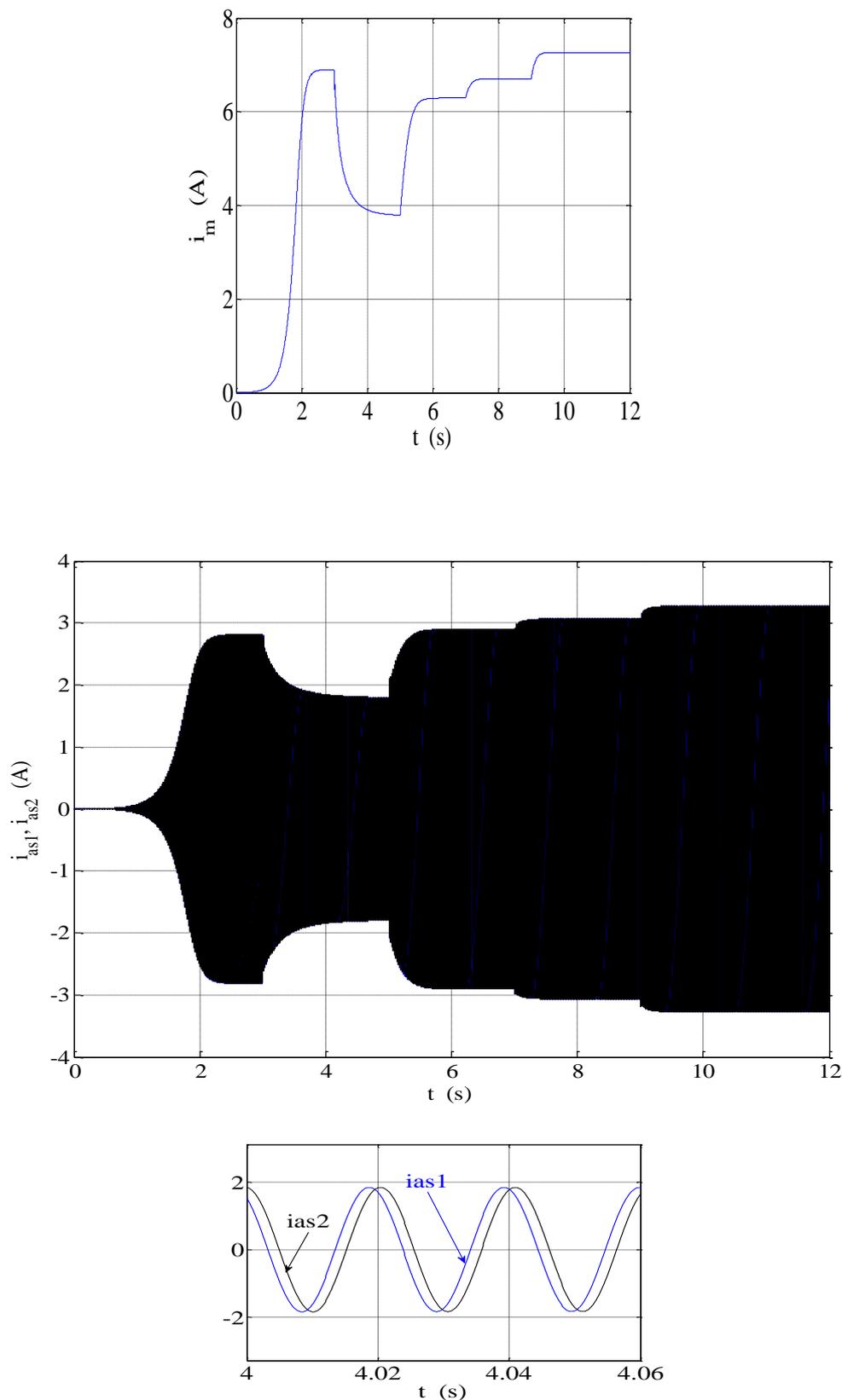


Fig. III. 7 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistives-inductives avec compensation série

III.8 Influence de la variation de la vitesse

La GASDE est simulée à vide et insérée à $t=3s,6s$ respectivement les vitesses « 300.15 (rd/s),286.15 (rd/s). Le but est de voir l'influence de la variation de la vitesse sur les performances et le Fonctionnement de la GASDE.

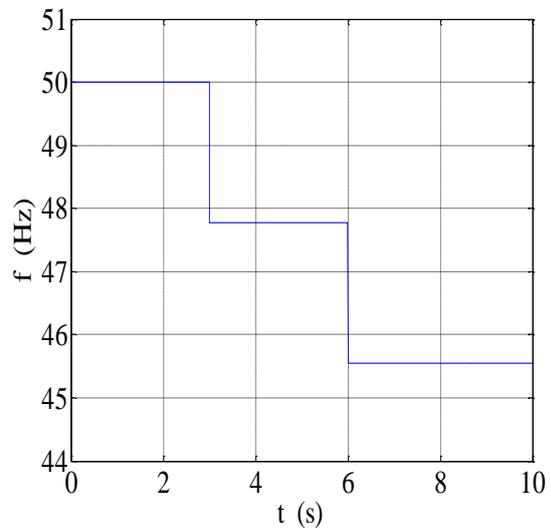
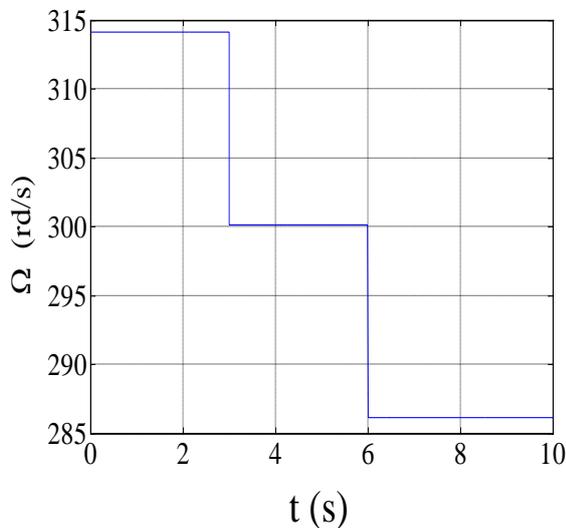
Les résultats obtenus par la figure (III.8) montrent que la diminution de la vitesse provoque des diminutions au niveau de l'ensemble des caractéristiques de fonctionnement de la génératrice, qui sont affichés dans le tableau (III.6) suivant :

TAB III.6 – Influence de la variation de vitesse sur les performances de la GASDE

ω_r (rd/s)	f(Hz)	V_{as1} (V)	i_{as1} (A)	i_m (A)
314.15	50	224.5	2.81	6.89
300.15	47.77	181.04	2.17	5.31
286.15	45.54	105.69	1.2	2.95

On diminuée la vitesse de 4.45% qui a engendré le même pourcentage pour la fréquence, 19.35% pour la tension, 22.41% pour le courant statorique, 22.93% le courant de magnétisation.

Alors les performances de la GASDE sont fortement influencées par la variation de la vitesse d'entraînement.



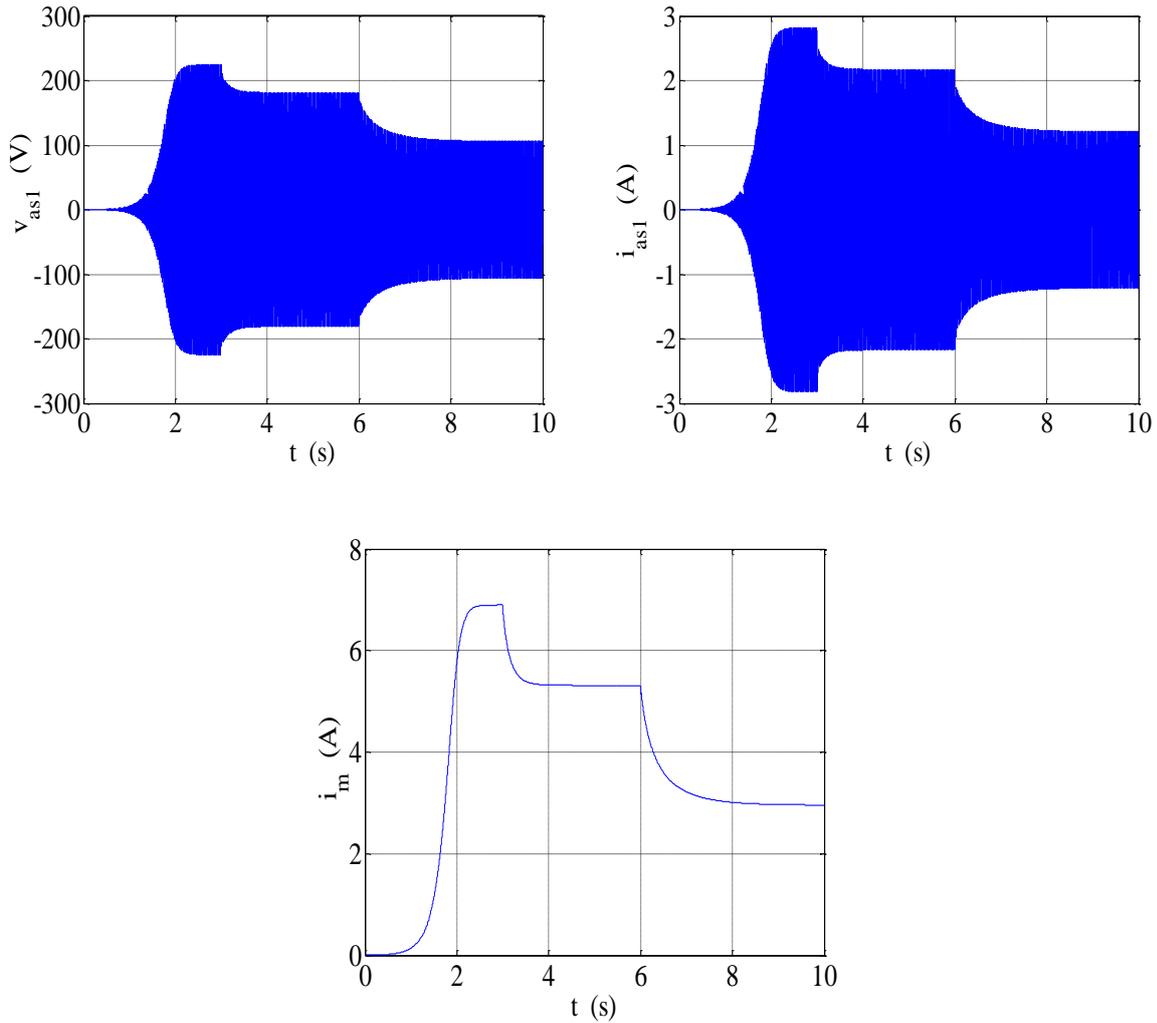


Fig III. 8 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement de la variation de la vitesse

III.9 Régulateur de la vitesse de GASDE

Veut l'influence de la variation de vitesse sur la GASDE on doit réaliser la régulation de vitesse pour cette machine afin d résoudre les chutes de tension causée par les charges, comme la tension est proportionnelle à la vitesse on a juste besoin de la tension de référence et vitesse référence qui est de 224.5 (V) et 314.15 (rd/s), avec la tension mesurée :

$$V_{mes} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \sqrt{v_{ds1}^2 + v_{qs1}^2} \quad (III.33)$$

➤ **Le schéma réalisé**

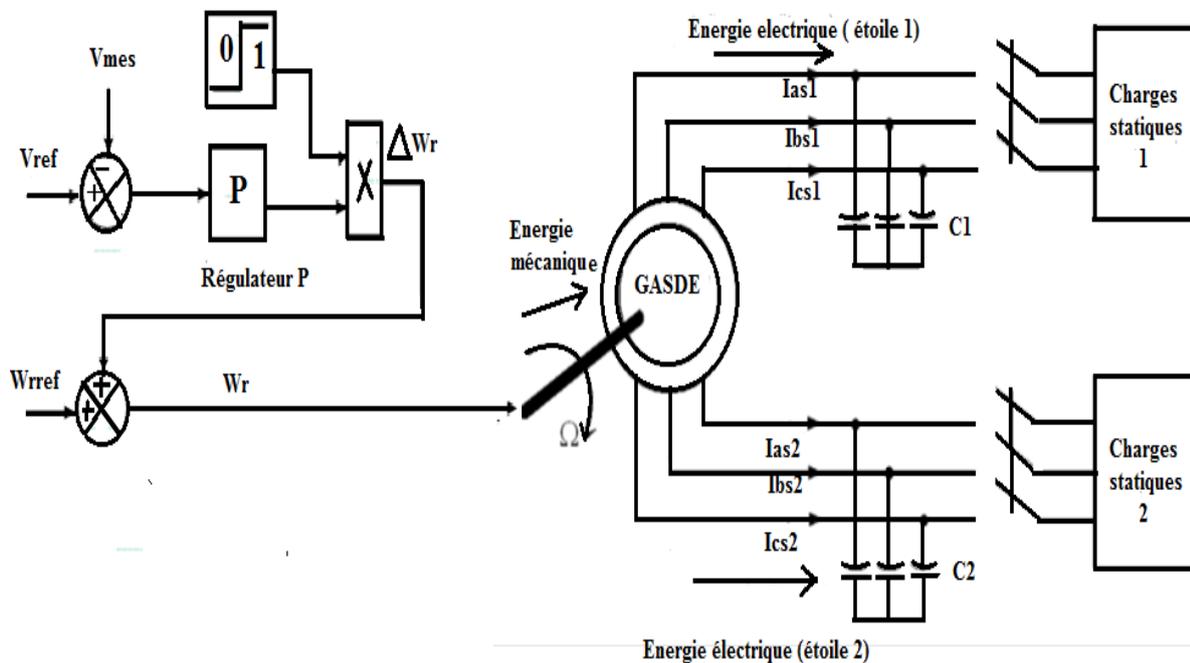


Fig. III. 9 Représentation schématique du système régulé

III.9.1 Régulation de la vitesse de fonctionnement en charge purement résistive

Le régulateur sera actionné à $t=3s$, les charges (250, 200,150) (Ω) est insérés à $t= (5s, 6s, 9s)$ respectivement.

On remarque d'après la figure (III.10) que lors de fonctionnement à vide le régulateur ne réagit pas puisque la tension est stable donc la vitesse aussi stable.

Quand la charge est appliquée à $t=5s$ la vitesse augmente de 9.13% pour compenser la chute de tension causé par la charge et la tension reste constante à 224.4 (V).

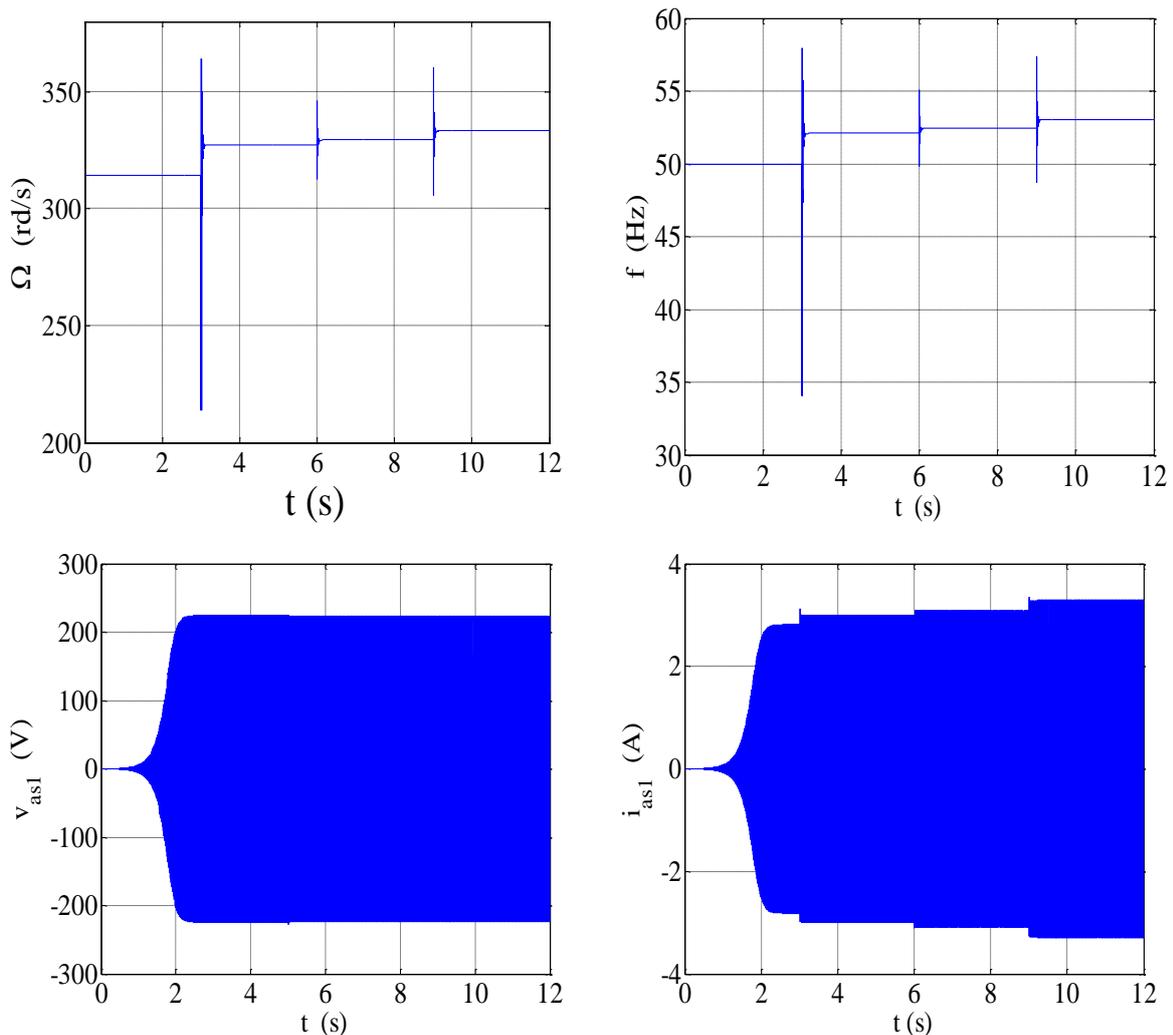
On remarque une légère augmentation dans les courants statoriques (1et 2) de 6.76% contraire au courant de magnétisation qui diminue de 2.9%.

Le tableau suivant représente les valeurs obtenues de la simulation pour des déférentes charges.

TAB III.7 – Influence de la charge résistive R avec une régulation de vitesse

R_{ch} (Ω)	ω_r (rd/s)	f (Hz)	i_{as1} (A)	i_m (A)
150	341.63	54.37	3.3	6.37
200	332.24	52.87	3.1	6.6
250	327.58	52.13	3	6.7

On voit que la vitesse, la fréquence et les courants statoriques sont proportionnelle à la charge, contraire au courant de magnétisation, il est proportionnelle à la résistance. Sachant que la charge diminue en augmentons la résistance.



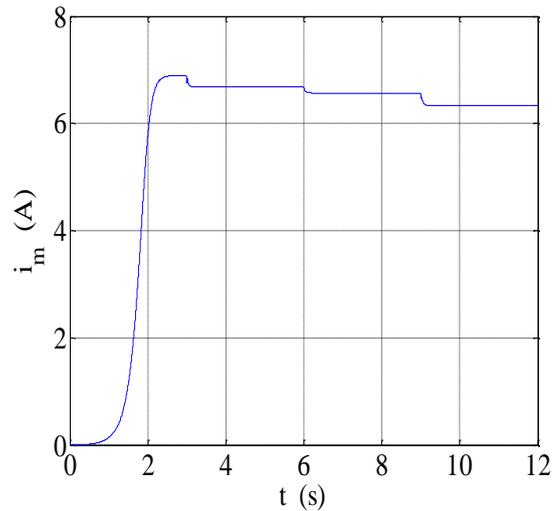


Fig III. 10 Évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistives avec une régulation de vitesse

III.9.2 Régulation de la vitesse de fonctionnement en charges à effet inductive

On fixe la résistance à 200 (Ω) est insérées a $t = 5s, 7s, 10s$ respectivement $L_{ch} = 0.01, 0.05, 0.1$ (H).

D'après la figure (III.11) on remarque que lors de fonctionnement à vide le régulateur ne réagit pas puisque la tension est stable donc la vitesse aussi stable.

Quand la charge est appliquée à $t=5s$ la vitesse augmente de 10.8% (un peu plus grand que la charge résistive) pour compenser la chute de tension causée par la charge et la tension reste constante à 224.4 (V) comme on le voit dans la figure des tensions, Ainsi que la fréquence et proportionnelle à la vitesse.

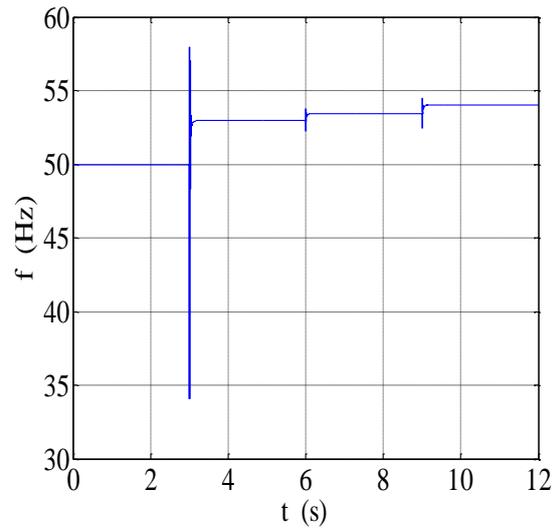
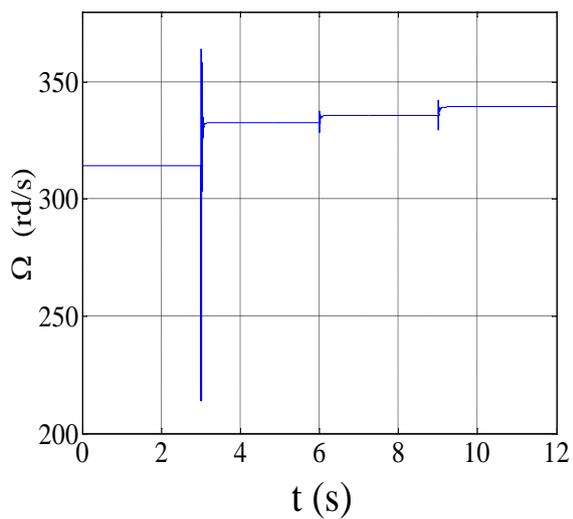
On remarque une légère augmentation dans les courants statoriques (1et 2) de contraire au courant de magnétisation qui diminue par rapport en fonctionnement à vide.

Les valeurs de la simulation des différentes valeurs de l'inductance sont dans le tableau suivant :

TAB III. 8 – Influence de la charge inductive avec une régulation de vitesse

L_{ch} (H)	ω_r (rd/s)	f (Hz)	i_{as1} (A)	i_m (A)
0.01	333.05	53	309	6.57
0.05	336.15	53.5	3.04	6.46
0.1	339.78	54.08	2.98	6.34

On remarque l'augmentation de la vitesse et la fréquence. Cela est dû à l'effet que la charge inductive est consommatrice d'énergie réactive, ce qui nuit à la magnétisation de la machine et engendre des diminutions supplémentaires des caractéristiques, car ce sont les capacités d'excitations qui doivent partager la puissance réactive qu'elles produisent entre la machine et les inductances.



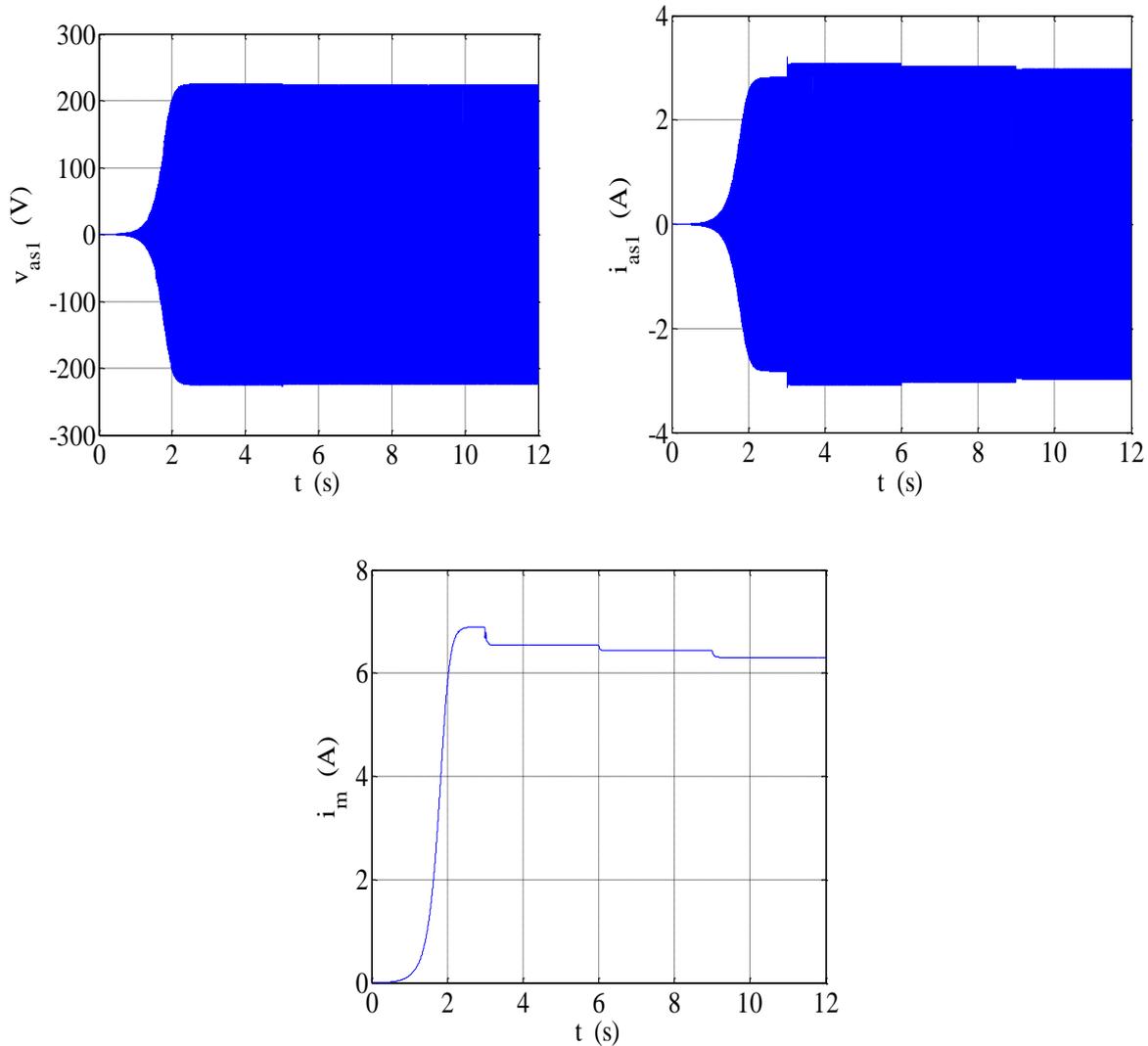


Fig III. 11 représente l'évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistive- inductive avec une régulation de vitesse

III.9.3 Régulation de la vitesse de fonctionnement en charge capacitive

On fixe la résistance à 200 (Ω) et insérées a $t = 5s, 7s, 9s$ respectivement $C_{cse}=65, 55, 45$ (μF).

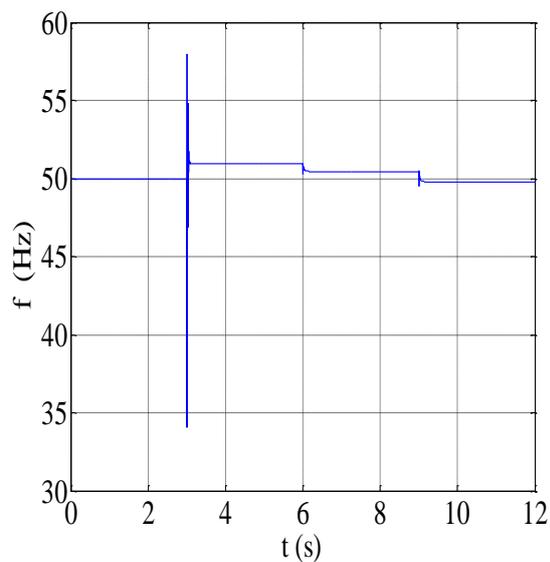
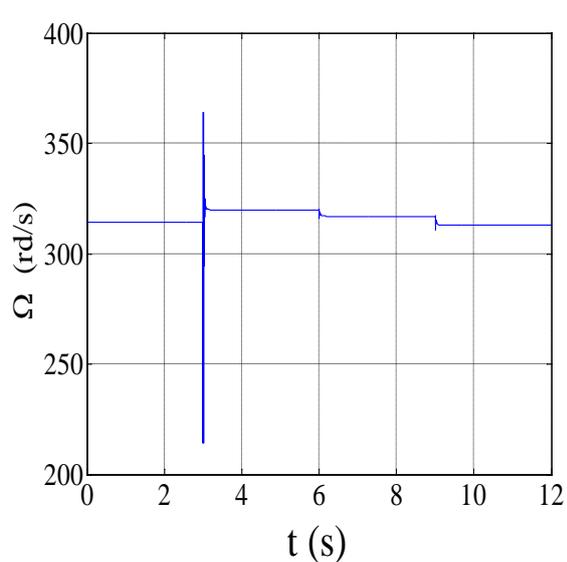
D'après la figure (III.12), on voit une légère diminution de la vitesse et de fréquence avec l'augmentation des courants par rapport à ceux relevés en charges résistives, et cela est dû au fait que, les condensateurs séries représentent aussi des charges supplémentaires absorbant une partie de l'énergie active.

TAB III.9 – Influence de la charge capacitive avec une régulation de vitesse

C (μF)	ω_r (rd/s)	f (Hz)	i_{as1} (A)	i_m (A)
45	312.81	49.78	3.28	7.32
55	317	50.46	3.25	7.15
65	320	50.93	3.23	7.07

La vitesse et la fréquence sont proportionnelles à la capacité.

Les courants statoriques, rotoriques et de magnétisation sont inversement proportionnelles à l'augmentation des capacités.



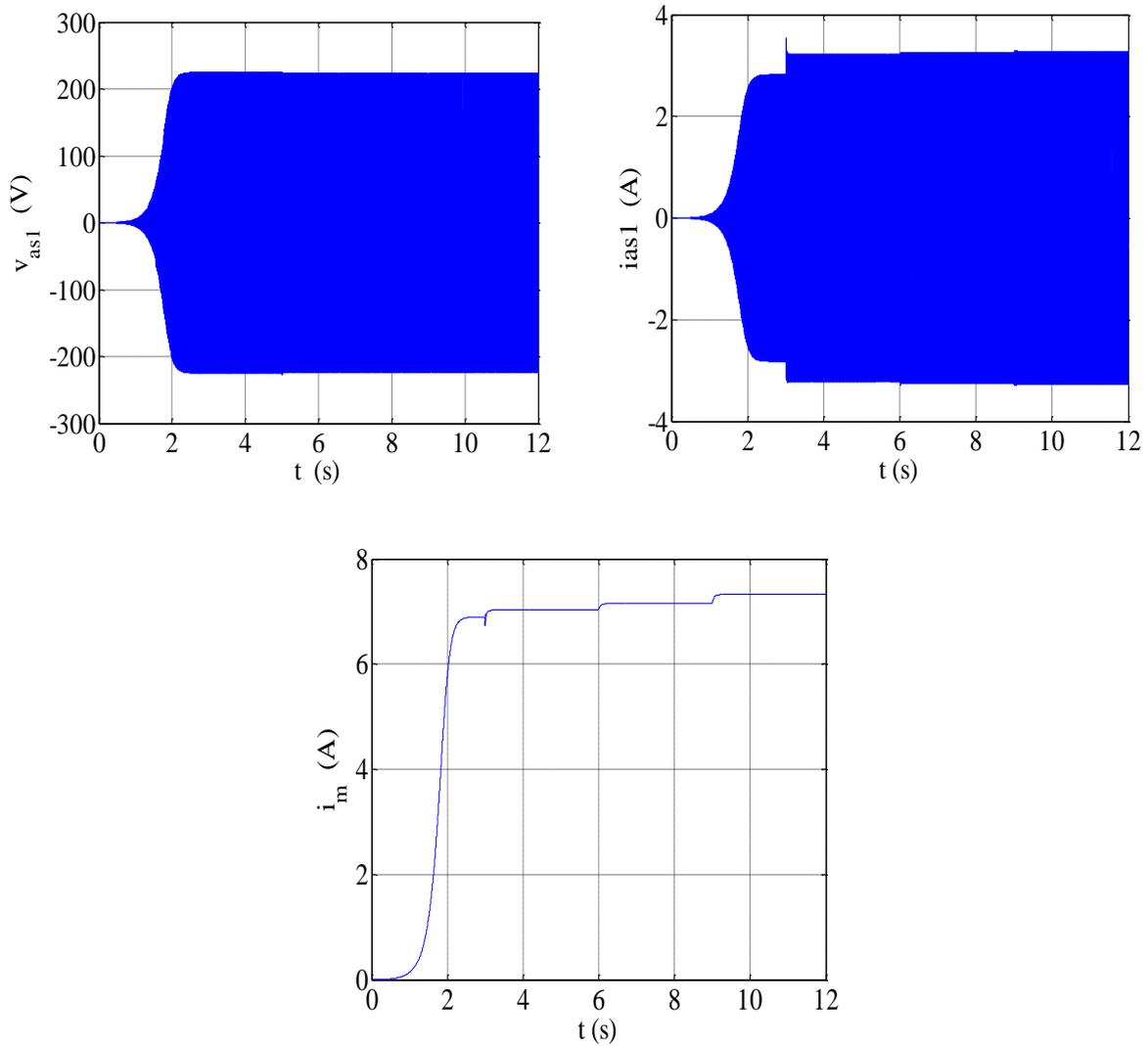
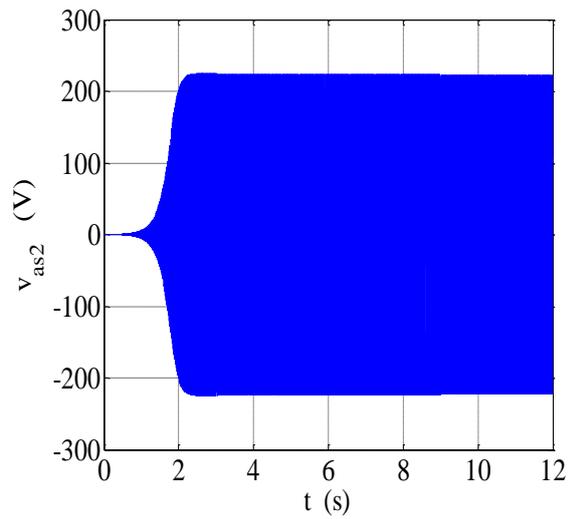
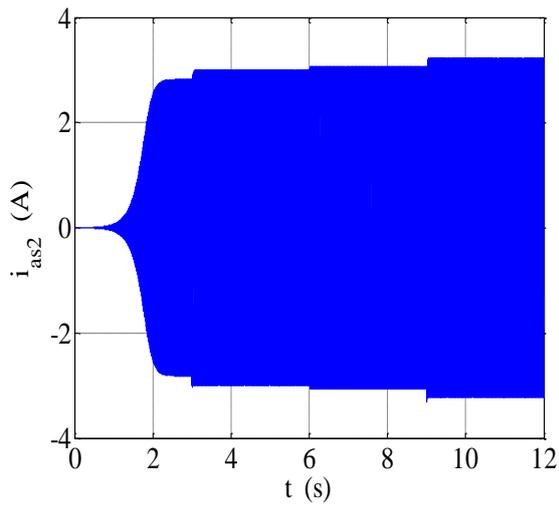
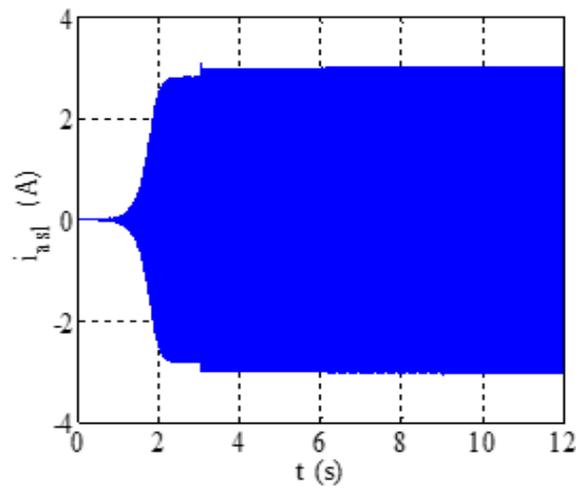
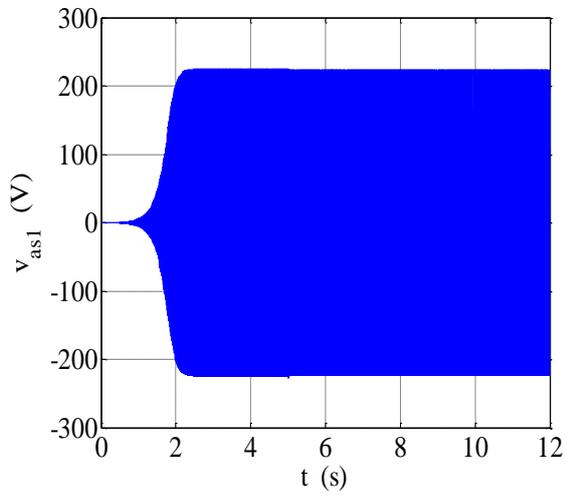
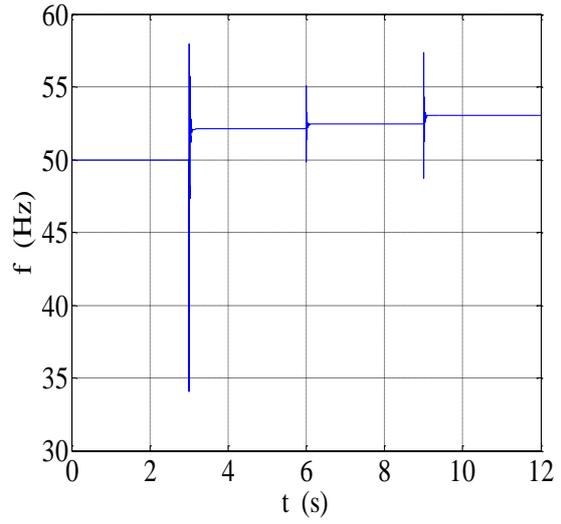
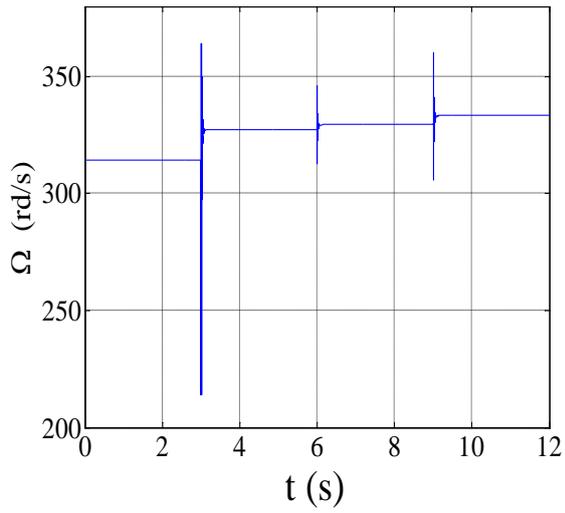


Fig. III. 12 représente l'évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges capacitive avec une régulation de vitesse

III.9.4 Simulation de GASDE à charge résistive, en fixe l'étoile 1 et varier l'étoile 2

Dans ce cas, on constate d'après la figure (III .13) que La GASDE fonctionne comme à charge résistive précédant malgré que la charge de l'étoile 1 soit fixé mais la vitesse et la fréquence varie ils suivent l'étoile 2 par la magnétisation



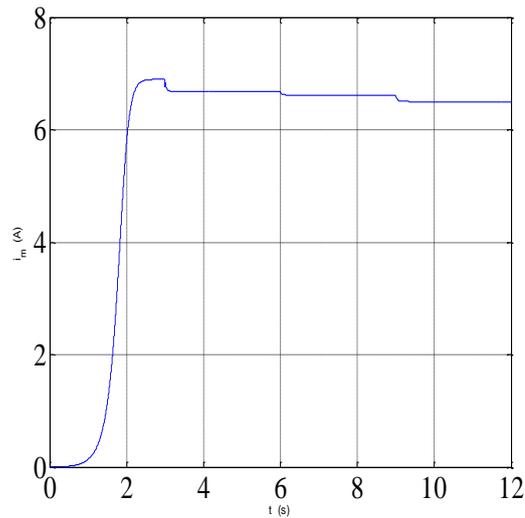


Fig. III. 13 représente l'évolution des caractéristiques de la GASDE en fonctionnement en charges résistive fixé dans l'étoile 1 et variable dans l'étoile 2

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre on a effectué des différentes simulations sur la GASDE auto amorçage en fonctionnement autonome. Pour cela, un modèle mathématique unifié de la GASDE a été développé, en incluant l'inductance de fuite mutuelle commune aux deux Circuits. L'auto-amorçage et la simulation des essais à vide et en charges de différents Facteurs de puissances ainsi que l'influence de la vitesse d'entraînement ont été présentes.

les performances de la génératrice sont affectées par les paramètres utiliser, la vitesse d'entraînement et par les charges, et en particulier les charges inductives qui sont consommatrices de l'énergie réactive, ce qui est nuit à la magnétisation de la machine, car ce sont les capacités d'excitation qui doivent partager la puissance réactivé qu'elles produisent entre la machine et les inductances, toutefois on a inséré des condensateurs de compensation en série permettent de résoudre approximativement le problème de l'énergie réactive puis un régulateur de la vitesse qui fait le même travail que les condensateur, et garde la tension constante quel que soit la charge (la chute de tension).

Conclusion Générale

Ce mémoire a été consacré à l'étude d'une machine plus courante parmi les machines multi-phasées, c'est la machines asynchrones double étoile. Cette étude suivie par la modélisation et l'analyse de cette la machine en régime moteur et générateur en fonctionnement autonome, afin de mieux maîtriser la machine.

Le premier chapitre est consacré sur l'état de l'art des différents systèmes autonomes et les machines utilisées dans ces différents systèmes.

Afin de mieux maîtriser la machine, le second chapitre a été consacré à la modélisation de la MASDE. Pour cela, on a commencé par la simulation de la machine alimentée par deux sources triphasées (étoile 1, étoile 2) puis avec onduleurs de tension à commande M.L.I.

Par ailleurs, la modélisation et la simulation de la GASDE ont été présentées dans le troisième chapitre. Dans ce dernier, la simulation de la génératrice en régime saturé est effectuée avec un auto-amorçage inclut des différentes charge statiques (résistive, inductive, capacitive), ensuite on a effectué la régulation de la tension statorique.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la machine sont envisageables :

- Utilisation des onduleurs multi-niveaux.
- Étude de la machine en régime dégradé.

Annexe A

- Les paramètres de la MASDE sont donnés par le tableau suivant [24]

vitesse nominale (synchronisme)	$v_n = 3000\text{tr/min}$
Puissance nominale :	$P_n = 4.5\text{KW}$
Tension nominale :	$V_n = 220/380\text{V}$
Courant nominal :	$I_n = 6.5\text{A}$
Résistance du premier enroulement statorique :	$R_{s1} = 3.72\Omega$
Résistance du deuxième enroulement statorique :	$R_{s2} = 3.72\Omega$
Résistance rotorique :	$R_r = 2.12\Omega$
Inductance de fuite premier enroulement statorique :	$L_{s1} = 0.022\text{H}$
Inductance de fuite deuxième enroulement statorique :	$L_{s2} = 0.022\text{H}$
Inductance de fuite rotorique :	$L_r = 0.006\text{H}$
Inductance mutuelle cyclique:	$L_m = 0.3672\text{H}$
Moment d'inertie :	$J = 0.0625\text{Kg.m}^2$
Coefficient de frottement :	$K_f = 0.001\text{Nms/rd}$
Fréquence nominale :	$f = 50\text{Hz}$
Nombre de paires de pôles :	$P = 1$

- Les paramètres de la GASDE suivante sont du cett source [24]

Résistance d'une phase statorique	$R_{s1} = R_{s2} = 1.9\Omega$
Résistance d'une phase rotorique (étoiles 1 et 2)	$R_r = 2.1\Omega$
Inductance de fuite d'une phase statorique (étoiles 1 et 2)	$L_{s1} = L_{s2} = 0.0132\text{H}$
Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r = 0.0132\text{H}$
Inductance mutuelle de fuite stators-rotor	$L_{lm} = 0.011\text{H}$
Inductance cyclique d'inter saturation stators-rotor	$L_{dq} = 0\text{H}$
Vitesse nominale (synchronisme)	$N_n = 1500\text{tr/mn}$
Moment d'inertie	$J = 0.038\text{kg.m}^2$

Bibliographie

- [1] : J.P. Yembi, A. Moukengué Imano, « Etude du temps d'amorçage d'une génératrice asynchrone auto-excitée par la méthode de plan d'expériences », B.P. 24157, Université de Douala, Cameroun
- [2]: D. Banks, J. Schaffer, « The Potential Contribution of Renewable Energy in South Africa, Earth life Africa », Johannesburg, South Africa, 2006.
- [3] : <http://valled.pt/fr/nous-made-products/syst%C3%A8mes-autonomes-de-production-d%E2%80%99%C3%A9lectricit%C3%A9>
- [4] : <http://www.surtec.fr/sites-autonomes-en-energie/principe/>
- [5]: https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/eolienne.php4
- [6] : Lounes Hama, M. K, « Étude et Commande d'une Machine Asynchrone », Mémoire de fin cycle, BEJAIA, 2014.
- [7] : <http://www.swibconsulting.com/etppm/types-dinstallations>
- [8] : <https://www.bricoleurpro.com/dossier-143-groupe-electrogene-fonctionnement-utilisation-choisir.html>
- [9] : <http://www.monchoixgroupeelectrogene.fr/types-de-produits/>
- [10] : N. Ratière, « Modéliser et concevoir les réseaux d'énergie électrique », Habilitation à diriger des recherches, UJF, Novembre 2003.
- [11] : P. Ladoux, F. Richardeau, L. Raulin, « Electronique de puissance pour la qualité de l'énergie des réseaux de bord d'avion », Club EEA, Cergy-Pontoise, Mars 2004.
- [12] : Faïd Merbah, Khirredine Fayçal. « Etude et Simulation d'une Génératrice Asynchrone Double », Mémoire de fin de cycle, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Bejaia, 2015.
- [13] : G. Filliau, A. Bondu, L. Mazodier, « Le Navire Tout Electrique, Propulsion Et Production d'énergie, Technique de l'ingénieur », D 5 610, novembre 2000.
- [14] : D.Gondouin, F. Menneron, « Nouvelles Topologies de Systèmes de Propulsion Electrique de Navires », Octobre 2000.
- [15] : Idjadarene, M, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Université Abderrahmane MIRA. Bejaia ,2010.
- [16] : <https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/generatrice-asynchrone-503>

[17] : Abdessemed, R, « Modélisation et simulation des machines électrique », Ellipses, Paris 2011.

[18] : Badi, H, « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Ecole Nationale Polytechnique, Algérie ,2007.

[19] : R. Abdessemed, M. Kadjoudj, « Modélisation des machines électriques », Université de Batna, Algérie, 1997.

[20] : A. Belamoudi, « Etude et simulation d'un système de conversion d'énergie à base d'une machine asynchrone », Mémoire de Magister de l'Université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, Décembre 1996.

[21]: G. K. Singh, K. B. Yadav, R. P. Saini, « Analysis of a saturated multi-phase (six phase) self-excited induction generator», International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 7, Iss. 2, Art. 5, pp. 1–21, 2006.

[22] : Louze, L, « Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée ». CONSTANTINE,2010.

[23] : Merabet, E, « Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile», Université de Batna ,2008.

[24] : Amimeur, H, « Contribution la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement », Université El Hadj Lakhdar de Batna,2008.