

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité Machines Électriques

présenté par

ALI KHEDDAOUI

&

ABDMEZIEM ABDELHAKIM

---

# Etude d'un ensemble alternateur a aimant permanent/redresseur IGBT Commandé application a un véhicule hybride

---

Proposé par : N. BRAHIMI

Année Universitaire 2016-2017

## Remerciements

---

### Remerciement

Tout d'abord, nous adressons nos remerciements premièrement à Dieu le tout puissant pour la volonté, le courage, la patience et la force qu'il nous a donné durant toute la période d'étude.

Remerciements à Mme N. Brahimi, directrice de projet, pour nous avoir proposé ce projet et avoir eu confiance en nous dans la réalisation de ce travail.

On la remercie pour la qualité de son encadrement, de son soutien tout au long de notre programme, ainsi que de sa disponibilité.

Enfin nous remercions tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'élaboration de ce travail.

## **Résumé :**

Ce travail concerne l'étude d'un ensemble alternateur à aimants permanents redresseur commandé destiné à l'alimentation électrique d'une plate-forme mobile de type véhicule hybride série, Cet ensemble doit fournir un courant continu, sous la tension de batterie, aux différentes charges connectées sur le bus continu.

L'alternateur est entraîné par un moteur diesel. Pour choisir le type de machine et celui du redresseur associé, nous avons tenu compte des contraintes propres aux systèmes embarqués et de celles plus spécifiques au système étudié. Pour la machine, nous avons choisi une machine synchrone à aimants posés sur la surface du rotor. Pour le redresseur, la contrainte liée au contrôle de tension et courant, nous a conduits à retenir un pont redresseur triphasé à IGBT de structure de tension. Pour la partie motrice nous avons sites la méthode vectorielle qui est célèbre par sa robustesse pression erreur nulle pour la commande du moteur en vitesse et nos besoins en puissance qui est indispensable dans notre application.

**Mots clés :** aimants permanents ; alternateur ; contrôle ; redresseur commandé ; véhicule hybride

## **Abstract**

This work concerns the study of a permanent magnet generator set and controlled rectifier for the power supply of a mobile platform of hybrid vehicle type series. This assembly must provide a DC current under the battery voltage to Different loads connected on the DC bus. The alternator is driven by a diesel engine. To choose the type of machine and that of the associated rectifier, we considered the constraints specific to the embedded systems and those more specific to the system studied. For the machine, we chose a synchronous machine with magnets placed on the surface of the rotor. For the rectifier, the stress related to voltage and current control, led us to retain a three-phase rectifier bridge with voltage structure IGBT. For the motor part we have the vector control method which is famous for its robustness zero error pressure for motor control in speed and our power requirements which is indispensable in our application.

**Keys words:** a permanent magnet, generator, control, controlled rectifier, hybrid vehicle

## المخلص:

إن هذا العمل يتعلق بدراسة ثنائية مولد ذو آلة متزامنة بالمغناطيس الدائم و مقوم لتشغيل المنصة المتنقلة لمركبة هجينة ذات النظام التسلسلي. يجب على هذه المنظومة بعث التيار الكهربائي المستمر تحت جهد البطارية لتوفير الطاقة لمختلف الأحمال المتصلة بها. يتم تدوير عمود المولد بواسطة محرك الديزل. لاختيار نوع الآلة و المقوم المتصل بها اتبعنا القيود المحددة في دفتر الشروط، بالنسبة للآلة(المستخدمة كمولد ومحرك) اخترنا آلة متزامنة بالمغناطيس الدائم المتمركز على مساحة العمود، أما المقوم فقد اخترنا نوع IGBT لتحقيق شرط التحكم في التوتر و التيار، في جهة الدفع استعملنا طريقة التحكم الشعاعي الشهيرة بصلابتها ودقتها للتحكم في السرعة والعزم.

**الكلمات المفتاحية:** المغناطيس الدائم، مولد، التحكم، التحكم في المقوم، مركبة هجينة

## Sommaire :

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

### **Chapitre 1 : généralités sur les véhicules hybrides**

1.1	Introduction .....	4
1.2	Différentes structures de véhicules hybrides (VH) :.....	4
1.2.1	La transmission parallèle .....	4
1.2.1.1	Principes et caractéristiques de la transmission hybride parallèle.....	5
1.2.2	La transmission série .....	5
1.2.2.1	Principe de la transmission série.....	6
1.3	Présentation de l'application spécifique étudiée .....	7
1.4	Choix d'une machine adaptée au fonctionnement alternateur.....	7
1.4.1	Choix de la structure du redresseur commandé .....	8
1.4.1.1	Pont redresseur commandé à transistors IGBT de structure tension.....	8
1.5.	Modèle électrique de la batterie.....	9
1.6	Choix d'une machine adaptée au fonctionnement moteur.....	12
1.7	Conclusion.....	13

### **Chapitre 2 : Modélisation de la MSAP**

2.1	Introduction.....	15
2.2	Présentation de la machine MSAP.....	15
2.3	Avantages des machines synchrones à aimants permanents.....	17
2.4	Domaines d'application .....	17
2.5	Modélisation de la MSAP.....	18
2.5.1	Descriptions.....	18
2.5.2	Les équations électriques.....	19
2.5.3	Equation mécanique .....	20
2.5.4	Mise en équation et modèle de PARK.....	21
2.5.4.1	Mise en équation.....	22

2.5.4.2	Principe de la transformation de Park .....	22
2.5.4.3	Passage du repère dq au repère $\alpha\beta$ .....	24
2.5.4.4	Modélisation de la MSAP dans le repère de PARK.....	24
2.6	Equations électriques.....	24
2.7	Calcul du couple électromagnétique.....	25
2.8	Résultats de simulations .....	26
2.8.1	Interprétation des résultats .....	28
2.9	CONCLUSION.....	29

### **Chapitre 3 : Association Alternateur- redresseur-batterie**

3.1	INTRODUCTION.....	31
3.2	REDRESSEUR A COMMANDE MLI.....	31
3.3	LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	32
3.4	Les techniques de commandes du redresseur .....	32
3.4.1	MLI à Bande d'hystérésis (modulé).....	32
3.4.2	La méthode de la MLI à porteuse triangulaire .....	33
3.5.	Modélisation du redresseur MLI.....	34
3.6	Association alternateur-redresseur-batterie .....	37
3. 6.1	Réglage du courant de batterie $I_{bat}$ .....	39
3.6.2.1	Interprétation des résultats.....	42
3.7	Conclusion .....	42

### **Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série**

4.1	Introduction .....	44
4.2	Schéma synoptique de l'application.....	44
4.3	Principe de la commande vectorielle de la MSAP .....	46
4.3.1.	Technique de découplage .....	46
4.3.2	Découplage par compensation .....	47

4.4	Calcul des Régulateurs.....	49
4.4.1	Dimensionnement des régulateurs.....	50
4.4.1.1	Régulateur du courant $I_q$ .....	50
4.4.1.2	Régulateur du courant $I_d$ .....	52
4.1.2	Régulation de la vitesse.....	53
4.1.3	Limitation des courants.....	55
4.5	Résultats de simulations.....	56
4.5.1	Interprétation de résultats.....	60
4.6	Conclusion.....	61
	<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>62</b>

# **Chapitre 1 : Généralité sur les véhicules hybrides**

# Chapitre 1 : Généralités sur les véhicules hybrides

## 1.1 Introduction :

Un véhicule hybride est un véhicule disposant d'au moins deux sources d'énergie, typiquement un réservoir de carburant et une batterie, associés à des machines de conversion de l'énergie, telles que les moteurs électriques et les moteurs à Combustion interne.

On définit communément deux familles d'architectures hybrides :

- Les hybrides parallèles, pour lesquels le moteur thermique fournit directement un couple aux roues,
- Les hybrides séries, où le moteur thermique n'est pas directement lié aux roues.

## 1.2 Différentes structures de véhicules hybrides (VH) :

Compte tenu de l'autonomie limitée des véhicules tout électriques, il a été imaginé de coupler deux sources d'énergies embarquées. On appelle ces véhicules des hybrides et il en existe deux principaux types: le véhicule hybride parallèle et le véhicule hybride série [1].

### 1.2.1 La transmission parallèle :

Un moteur thermique est couplé à un moteur électrique et ils fonctionnent soit simultanément, soit alternativement en fonction des différentes phases de roulage du véhicule.

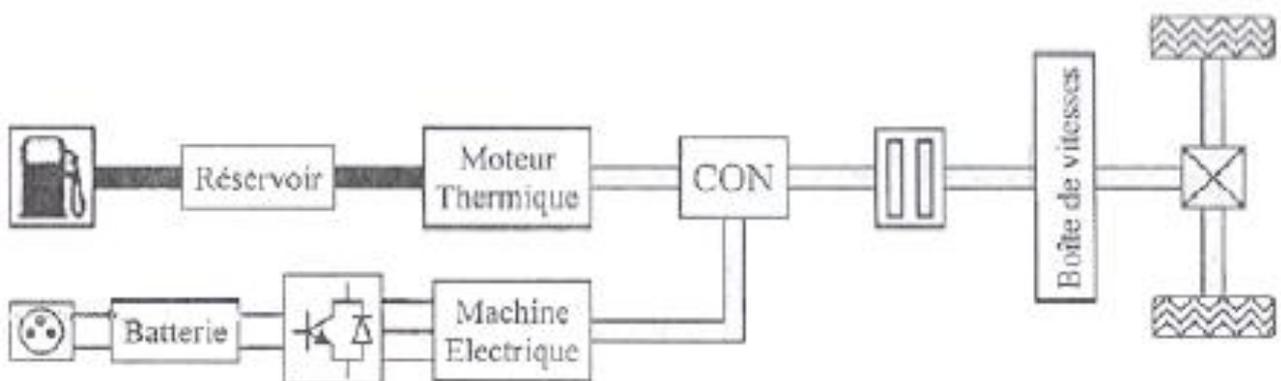


Figure I.1 : le véhicule hybride parallèle

# Chapitre 1 : Généralités sur les véhicules hybrides

## 1.2.1.1 Principes et caractéristiques de la transmission hybride parallèle :

Dans cette configuration [1], [2] le système de transmission mettra en œuvre l'énergie mécanique, il y aura donc possibilité d'une liaison mécanique directe entre le moteur thermique et les roues motrices du véhicule. L'énergie électrique échangée avec la batterie d'accumulateurs devra alors être transformée en énergie mécanique. Dans ce type de véhicule, on se rend vite compte qu'il faut gérer les flux d'énergie pour optimiser le fonctionnement et le rendement des différents organes. Par exemple, faire fonctionner le moteur électrique seul à bas régime ou bien encore récupérer l'énergie du freinage en utilisant le moteur électrique comme un alternateur.

Le système de transmission sera constitué d'un moteur/générateur électrique assurant la conversion de l'énergie de la batterie et d'un ensemble mécanique permettant la liaison des deux chaînes de propulsion aux roues motrices du véhicule.

## 1.2.2 La transmission série :

Ce type de véhicule est caractérisé par la présence de la batterie, qui joue le rôle d'élément de stockage (tampon), et d'un générateur électrique (ensemble moteur thermique – alternateur redresseur). De plus, on peut envisager soit un seul moteur électrique entraînant le véhicule, sans changer la transmission mécanique, soit deux ou quatre moteur-roues électriques sans liaisons mécaniques entre eux.

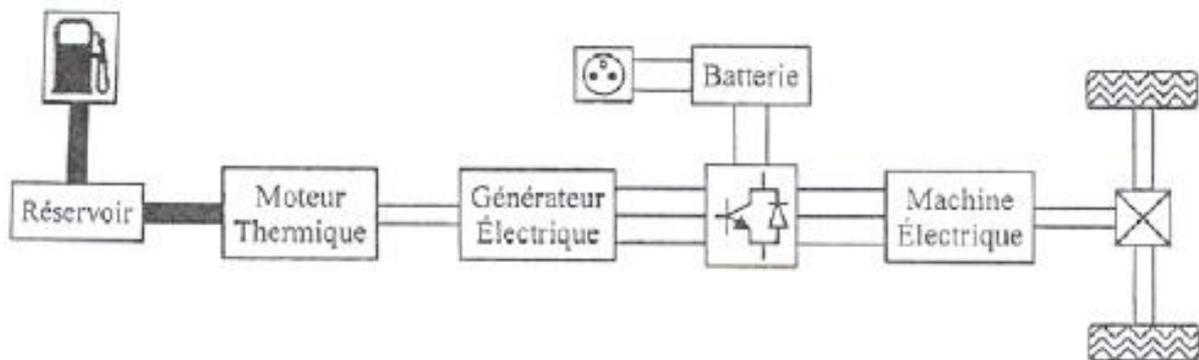


Figure I.2 : le véhicule hybride série

# Chapitre 1 : Généralités sur les véhicules hybrides

---

## 1.2.2.1 Principe de la transmission série :

Dans cette configuration [2], le système de transmission mettra en œuvre de l'énergie électrique, il n'y aura donc pas de liaison mécanique directe entre le moteur thermique et les roues, le mouvement au roux est donné par un moteur électrique ou le moteur thermique est utilisé seulement pour entrainer l'alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Alors le système est constitué d'un ou plusieurs moteurs électriques assurant la propulsion et la récupération d'énergie ainsi que d'un réseau électrique liant la génératrice et les moteurs électriques via leurs convertisseurs associés à la batterie.

Dans la transmission hybride série, la chaîne de propulsion qui assure le déplacement du véhicule est purement électrique.

La batterie constitue l'élément central de cette transmission vers lequel convergent l'ensemble des contraintes de puissance. Son fonctionnement en tampon permet de déconnecter la dynamique du moteur thermique de celle du véhicule.

Le principal avantage de la configuration hybride série concerne donc le fonctionnement du moteur thermique, pour lequel on pourra fixer a priori les éléments suivants:

- Vitesse de rotation
- Couple développé
- Puissance fournie
- Dynamique de fonctionnement

Ces propriétés permettent de réduire également la consommation des émissions polluantes tout en améliorant l'agrément et les performances de conduite en tout terrain.

Le véhicule hybride série peut donc rendre les mêmes services qu'un véhicule conventionnel. Les niveaux de tensions et de puissance sont similaires au véhicule tout électrique (VE). La différence se faisant sur la capacité de la batterie qui est bien plus faible (dans le cas du VH), ce qui permet de minimiser le surcoût de ces véhicules.

# Chapitre 1 : Généralités sur les véhicules hybrides

---

## I.3 Présentation de l'application spécifique étudiée :

L'application étudiée est la transmission série qui est une chaîne de conversion d'énergie utilisée dans un véhicule hybride à quatre roues motrices. Un moteur diesel entraîne un alternateur. Ce dernier est susceptible, par le biais de son redresseur associé, de fournir sous la tension de batterie (fonctionnant en tampon) le courant nécessaire aux différents dispositifs électriques connectés au bus continu.

En premier lieu, notre travail concernera l'étude de l'ensemble alternateur-redresseur associé à une batterie. Le choix du type de l'alternateur et de la structure du redresseur, appropriés à l'application, est primordial. En second lieu, cet ensemble sera associé à un onduleur et à un moteur de traction.

## 1.4 Choix d'une machine adaptée au fonctionnement alternateur :

Le domaine de la traction, [19] automobile est très contraignant vis-à-vis des machines électriques. Les exigences du secteur automobile sont en particulier les suivantes :

- **Faibles coûts** (concurrence, grande série, implantation sur le marché du moteur thermique)
- **Bonnes performances** (larges plages de fonctionnement, impératifs de couple et puissance, ...)
- **Fiabilité** (solllicitations diverses, environnement extérieur)
- **Compacité** (petits véhicules, emplacement dans un volume restreint, ...)

Les machines électriques qui présentent actuellement les meilleures performances sont les machines synchrones à aimants permanents. Elles peuvent fournir un couple massique très important. Elles ne posent pas de problèmes particuliers de refroidissement de la partie tournante (excitation au rotor par des aimants) contrairement aux autres machines (synchrone excitée par une bobine excitatrice ou asynchrone). Aussi leur alimentation ne nécessite qu'un seul convertisseur (redresseur) côté stator.

**Les machines à aimants** ont les **avantages** suivants:

# Chapitre 1 : Généralités sur les véhicules hybrides

---

- Couple volumique élevé et donc encombrement réduit.
- Faibles inductances, ce qui permet une réponse rapide du courant fourni vers la batterie et de ce fait sollicite moins la batterie.
- Fiabilité.
- L'obtention d'un couple dépourvu d'ondulations selon la stratégie de commande adoptée. (Alimentation par des courants sinusoïdaux d'une machine à f.é.m sinusoïdales).

## **I.4. Choix de la structure du redresseur commandé :**

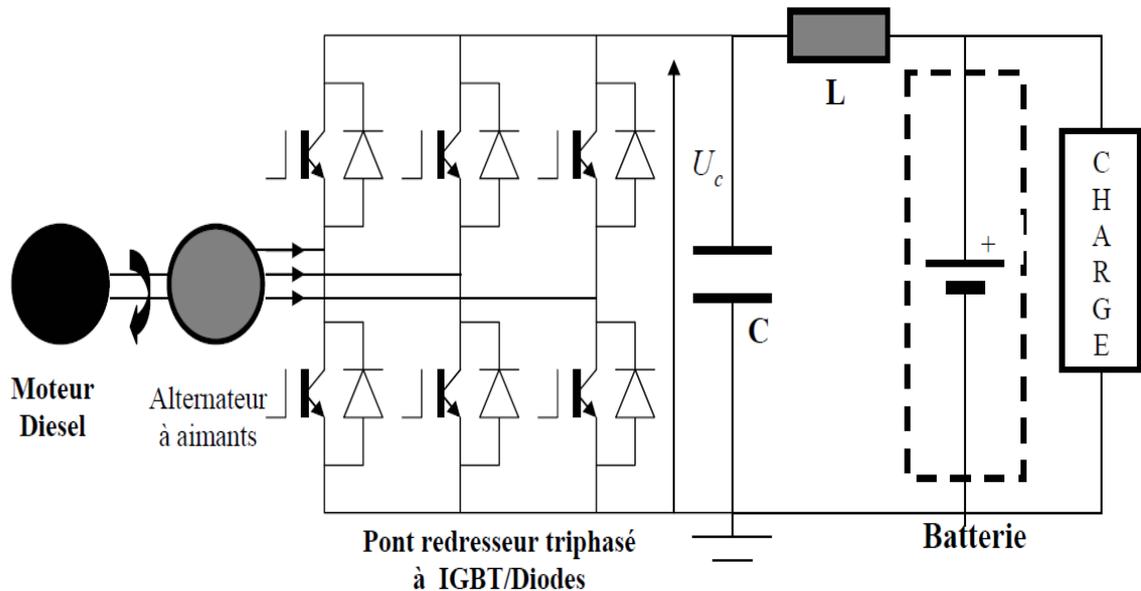
Le redresseur devant fournir sous la tension de batterie un courant variable en fonction de la charge et comme la tension de la batterie est susceptible de varier de  $-20\%$  à  $+12\%$  de sa valeur nominale, celui-ci doit être contrôlable en courant. De plus, le taux d'ondulation du courant fourni par le redresseur doit rester acceptable pour minimiser les pertes dans la batterie ou dans les condensateurs des différents onduleurs connectés sur le bus continu. En effet, la composante pulsatoire du courant est filtrée soit par la batterie soit par ses condensateurs. La batterie fonctionne dans ces conditions en tampon, son courant moyen en régime établi est nul.

Le premier critère de choix de la structure du redresseur se résume au fait que l'on puisse agir sur la valeur moyenne du courant fourni et sur son taux d'ondulation.

Pour satisfaire ce critère on a opté pour un Pont redresseur commandé à transistors IGBT de structure tension.

### **I.4.1. Pont redresseur commandé à transistors IGBT de structure tension :**

La figure (I.6) présente le schéma d'un tel redresseur [3], [4] pouvant fournir le courant nécessaire demandé par la charge. Cette structure est composée de six transistors IGBT avec leur diode antiparallèle. Elle est donc bidirectionnelle en puissance et peut fonctionner en alternateur aussi bien qu'en moteur.



**Fig. I.3 : Schéma du redresseur à IGBT/diodes antiparallèles de structure tension.**

Ce dispositif tolère facilement toute stratégie de contrôle de courant qu'elle soit à fréquence fixe (M.L.I ou « hystérésis modulée ») ou à fréquence variable (hystérésis classique) et cela aussi bien en fonctionnement redresseur qu'en onduleur.

De plus, l'inductance cyclique de la machine suffit pour filtrer les tensions hachées imposées par le pont à IGBT et pour obtenir ainsi un taux d'ondulation des courants acceptable pour des fréquences de découpage non excessives. La valeur de l'inductance ( $L$  sur la Fig. I.3) ajoutée du côté continu pour supprimer les faibles ondulations de courant est inférieure à 50 mH. Cette inductance de faible valeur a un volume raisonnable et ne constitue pas un inconvénient majeur pour ce dispositif. De plus, la réponse des courants de la machine et donc du courant côté continu, peut être très rapide si nécessaire et pour le condensateur  $C$  il sert à filtré la tension du bus continu.

## I.5. Modèle électrique de la batterie:

Une batterie d'accumulateurs est un générateur électrique qui utilise généralement les propriétés électrochimiques d'un couple oxydant-réducteur. Les accumulateurs se distinguent des piles classiques par leur aptitude à la recharge. Les transformations chimiques, au cours de la charge et de la décharge d'un accumulateur sont presque

## Chapitre 1 : Généralités sur les véhicules hybrides

réversibles. C'est pourquoi celui-ci peut être chargé et déchargé un grand nombre de fois. Malgré la concurrence de nombreux générateurs électrochimiques (générateurs alcalins Lithium-ion, batteries au Ni/Cd, Ni/MH), l'accumulateur au plomb, grâce à son faible prix, amélioré sans cesse dans sa technologie, reste toujours compétitif, que ce soit dans le domaine du démarrage des moteurs thermiques, de la traction électrique ou des réseaux continus. Il est à noter que pour la batterie au plomb, le nombre de Wattheures par kilogramme (Wh/kg) en stockage rapide a doublé en vingt ans [5].

La batterie utilisée dans notre application est du type à accumulateur au plomb. Nous ne détaillerons pas ici le principe de fonctionnement de l'accumulateur au plomb, il en est fait état assez abondamment dans la littérature sur le sujet ; par contre, nous avons besoin de le modéliser. La détermination de l'état de charge de la batterie pose le problème de la connaissance de la capacité maximum réelle disponible en fonction des conditions réelles d'utilisation. On peut retenir en première approximation que les conditions de décharge et la température sont les facteurs principaux qui influent sur la capacité réelle. L'influence des conditions de décharge sur la capacité réelle de la batterie a été mise en oeuvre dès 1897 par W. Peukert pour le cas des batteries au plomb.

La relation qu'il proposa lie un courant constant de décharge au temps de décharge [5]. Cette relation a été reprise par un grand nombre de logiciels et adaptée à d'autres couples électrochimiques, les coefficients étant déterminés à partir de calculs par régression effectués sur des résultats de bancs d'essais [2]. La détermination de la tension de batterie fait intervenir un terme représentant les conditions statiques, liées à la profondeur de décharge et à la température, et un autre pour les conditions dynamiques, lié au courant.

Mayer [2] propose pour des éléments au plomb, une relation qui fait intervenir le potentiel du couple plomb acide, une décroissance de la tension avec la décharge ainsi que l'influence de la résistance interne, soit l'expression suivante :

$$U = E_0 + K_e \ln \left[ 1 - \frac{\int I_b \cdot dt}{C_{I_b}} \right] - R_b \cdot I_b \quad (1.1)$$

# Chapitre 1 : Généralités sur les véhicules hybrides

Avec :  $K_e$ , le coefficient de tension (en V), positif en décharge et négatif en charge.  
 $E_0$ , le potentiel du couple plomb acide (en V). Bumby [2], qui utilise la tension à vide et calcule une résistance de polarisation en fonction de la profondeur de décharge, soit :

$$U = U_0 - R_b \cdot I_b - R_p \cdot I_b \cdot \frac{C_{I_b}}{C_{I_b} - \int I_b \cdot dt} \quad (1.2)$$

avec  $U_0$  la tension à vide, et  $R_p$  la résistance de polarisation et  $R_b$  la résistance interne de la batterie (en  $\Omega$ ).

Le modèle de batterie implanté dans les programmes de simulations numériques s'inspire du modèle des batteries Ford [3].

Soit  $U$  la tension aux bornes de la batterie:

$$U = E_0 - K \cdot \frac{\int I_b dt}{Q_0} - R_b \cdot I_b \quad (1.3)$$

- $E_0$  est la tension à vide de la batterie chargée.
- $K$  est une constante qui dépend de la batterie.
- $R_b$  est la résistance interne de la batterie.
- $I_b$  est le courant de décharge ( $I_b > 0$ ).

$\frac{\int I_b dt}{Q_0}$  indique l'état de décharge de la batterie.

- $Q_0$  est la capacité de la batterie en (Ah).

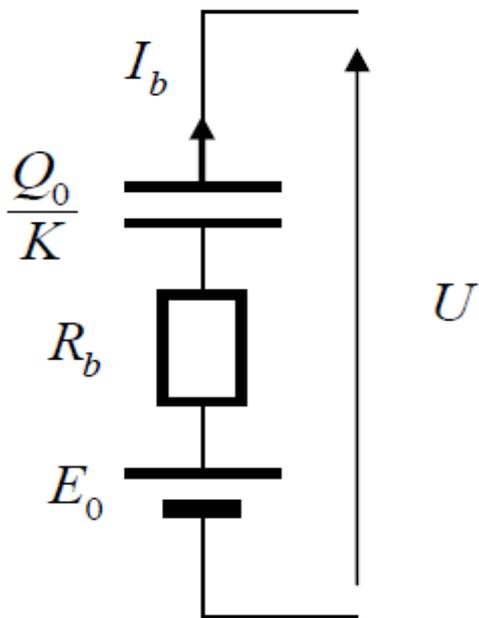


Fig. I.4 : Modèle électrique de la batterie

### 1.6 Choix d'une machine adaptée au fonctionnement moteur :

Pour le fonctionnement moteur on a choisit la MSAP grâce à ces avantages déjà expliqués, de plus, ce type de machine est le plus utilisé dans ces types d'applications ex : le véhicule hybride Toyota Prius Renault Kongo...

Ce type de machine a un comportement semblable au moteur à courant continu si elle est commandée par la méthode vectorielle avec une bonne performance, un rendement proche de 90% et un temps de réponse rapide.

## I.7 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, après avoir présenté le véhicule hybride étudié, nous nous sommes attachés au choix du type de machine et de la structure du convertisseur associé pour l'ensemble alternateur – redresseur commandé, qui constitue le thème de notre travail.

Compacité et fiabilité ainsi que minimisation des pertes sont les critères fondamentaux du choix des composants de l'ensemble alternateur – redresseur commandé.

Compte tenu des critères et des contraintes énumérés, nous avons opté pour le choix d'une machine synchrone à aimants permanents employée en mode alternateur et moteur pour laquelle les pertes Joule sont moindres dans le domaine de vitesses allant de zéro jusqu'à la vitesse nominale.

Nous avons aussi présenté le convertisseur électronique en pont **IGBT** de structure de tension et diodes antiparallèle selon les critères de compacité, fiabilité et minimisation des pertes. et qui n'a pas besoin structurellement d'une inductance supplémentaire pour son fonctionnement redresseur et nous garantit le contrôle de tension et de courant. Et nous garantit aussi le contrôle de vitesse en mode moteur (fonctionnement onduleur).

Nous avons présenté un modèle électrique simple et réaliste pour la batterie qui est celui utilisé par le constructeur Ford. La batterie est ainsi modélisée par la mise en série d'une force électromotrice correspondant à sa tension à vide lorsqu'elle est chargée, sa résistance interne et un condensateur dont la tension aux bornes indique l'état de charge de la batterie.

# **Chapitre 2 : Modélisation de la MSAP**

### 2.1 Introduction :

Pendant plusieurs années, l'industrie a utilisé le moteur à courant continu (CC) offrant le principal avantage d'être facilement commandable grâce au découplage naturel du flux et du couple. Cependant la présence du système balais collecteur a toujours été un grand inconvénient du moteur parmi d'autres qui limitent de plus en plus son utilisation [6] [7]. Cependant, la fragilité du système balai collecteur a toujours été un inconvénient de la M.C.C, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement.

C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des moteurs électriques à courant alternatif afin d'écartier cet inconvénient.

Parmi les moteurs à courant alternatif utilisés dans les entraînements à vitesse variable, le moteur synchrone à aimants permanents reste un bon candidat. Son choix devient attractif et concurrent de celui des moteurs asynchrones grâce à l'évolution des aimants permanents qu'ils soient à base d'alliage ou à terre rare. Cela leur a permis d'être utilisés comme inducteur dans les moteurs synchrones offrant ainsi, par rapport aux autres types de moteur, beaucoup davantage, entre autres, une faible inertie et un couple massique élevé [8][9].

### 2.2 Présentation de la machine MSAP :

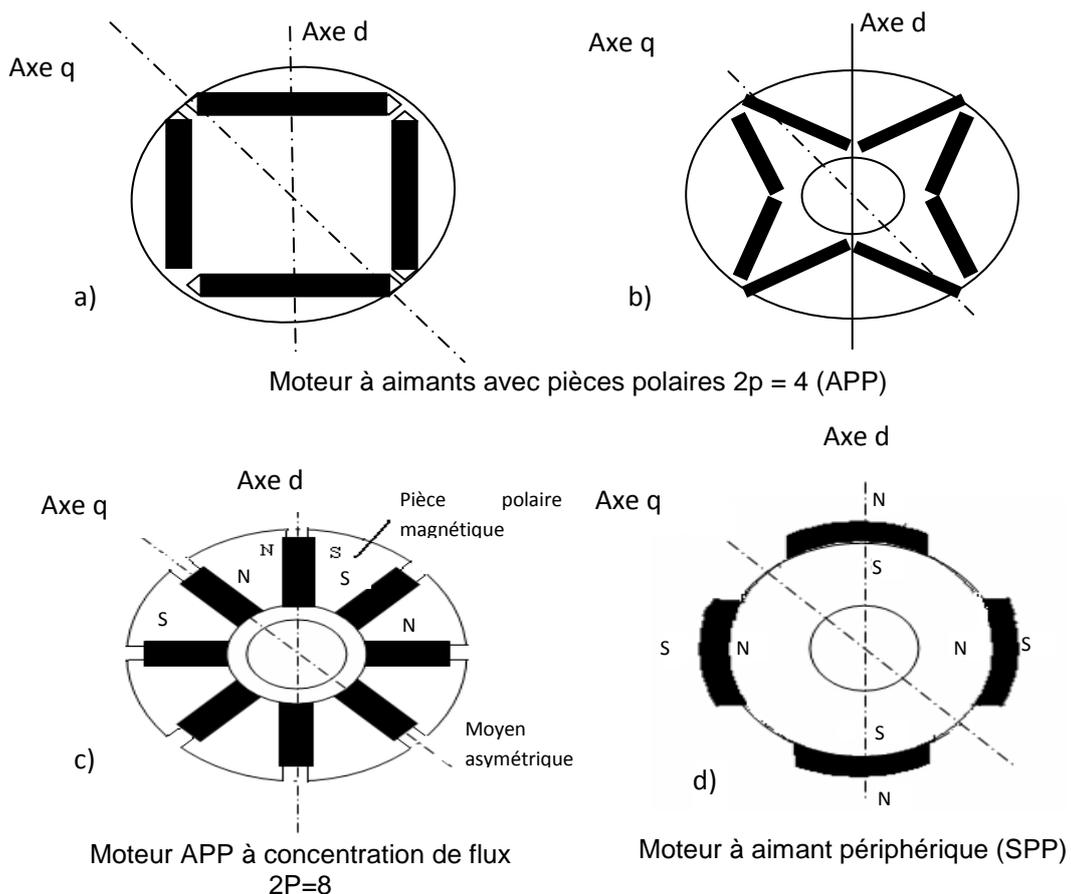
La machine synchrone à aimants permanents comporte, tout comme la machine asynchrone, un stator bobiné dont l'alimentation donne naissance à une force magnétomotrice de composante fondamentale  $F_a$  tournant à la vitesse angulaire  $\omega_s$ . Le rotor ou la roue polaire dont le nombre de pôles est égal à celui du stator, est excité par un bobinage parcouru par un courant continu ou par des aimants pour produire une force magnétomotrice dite d'excitation  $F_0$ . Dans le cas de la machine synchrone à aimants permanents, l'inducteur est remplacé par des aimants, ceci présente d'une part l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques et d'autre part la réduction de l'encombrement en éliminant la source d'excitation. La surface interne du stator est cylindrique, et les enroulements sont placés dans des encoches. Chaque enroulement est réalisé de manière à créer une force magnétomotrice sinusoïdale dans l'entrefer. Les forces

## Chapitre 2 : Modélisation de la MSAP

magnétomotrices créées par chacun des trois enroulements sont déphasées d'un angle électrique. En alimentant ces enroulements triphasés par des courants triphasés, on crée un champ tournant circulaire.

Suivant la disposition des aimants, on distingue :

- La machine à induction lisse, où les aimants utilisés sans pièces polaires (machines de structure dite SPP) sont disposés au niveau de l'entrefer sur un moyeu ferromagnétique (voir figure I.1d). Aux fuites magnétiques près (le coefficient de fuit  $\sigma$  est de l'ordre de 1.03 à 1.05), l'induction  $B_e$  dans l'entrefer est celle de l'aimant  $B_a$ . Les aimants composés des terres rares peuvent créer ainsi une induction dans l'entrefer de 0.60 T à 0.08 T, suivant la nature de l'aimant et du rapport de son épaisseur à celle de l'entrefer (en général il est de 5 à 6 fois).



**Fig II.1 Différentes structures de la roue polaire d'une machine synchrone à aimants permanents**

## Chapitre 2 : Modélisation de la MSAP

---

Les aimants sont immobilisés sur le moyeu soit par une frette de fibres de verre ou de carbone liées par une résine époxy, soit par un tube mince en métal amagnétique et à résistivité élevée emmanché à chaud.

- La machine à pôles saillants, où les aimants sont montés entre des pièces polaires (Machines dites de structure APP). Un exemple de réalisation est montré dans la figure (2.1 a,b) avec des aimants insérés dans un paquet de tôles magnétiques spécialement découpées. Un pont saturé d'une épaisseur de l'ordre de millimètres sépare les pôles. La machine à pôles saillants dite <<à concentration de flux>> est montrée sur la figure (2.1 c) où les aimants sont alors logés entre les pièces polaires et leur aimantation est transversale.

### 2.3 Avantages des machines synchrones à aimants permanents:

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines : [10][11][12][13][14]

- Puissances massiques importantes et élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Pas des pertes résistives au rotor ; ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor.
- Suppression des bagues et des ballait, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement en survitesse.

### 2.4 Domaines d'application :

C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme :

- les équipements domestiques (machine à laver le linge),

- les automobiles,
- les équipements de technologie de l'information (DVD drives),
- les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements,
- les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste),
- les servomoteurs,
- les applications robotiques,
- la production d'électricité,
- la propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous marins
- les machines-outils,
- les applications de l'énergie de l'éolienne.

### 2.5 Modélisation de la MSAP :

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile et qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagé. La modélisation d'un moteur synchrone à aimants permanents est identique à celle d'une machine synchrone classique sauf que l'excitation en courant continu attachée au rotor est remplacée par le flux de l'aimant [15]. Donc, le modèle est issu du modèle de la machine synchrone classique. [16]

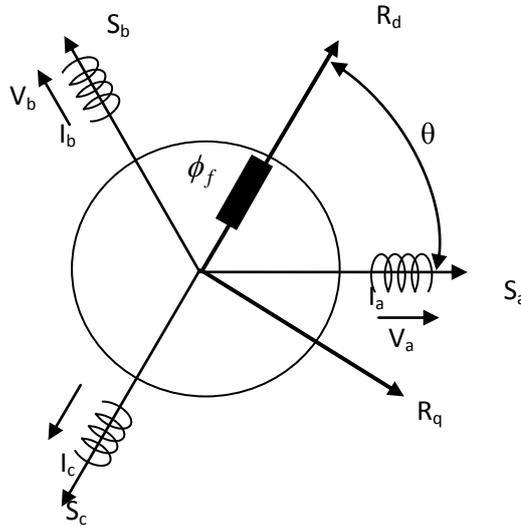
#### 2.5.1 Descriptions :

La machine que nous étudions comporte un inducteur à aimants permanents et un induit muni d'un bobinage triphasé connecté en étoile sans neutre. La machine est symétrique et équilibrée. La somme instantanée des courants de phase est nulle, par conséquent, la composante homopolaire des courants est nulle.

Les aimants de la machine sont disposés sur la surface du rotor, il s'agit d'aimants puissant de type NdFeB, Très adaptés pour les application à haute performance, ils présente un champ rémanent très élevé ( $B_r=1.1-1.5$  T), ainsi les courants induits dans le rotor sont négligeables .

## Chapitre 2 : Modélisation de la MSAP

La machine que nous allons étudier correspond au schéma de principe présenté à la figure (II-2) :



**Fig II.2 Description physique de la MSAP**

### 2.5.2 Les équations électriques :

En adoptant les hypothèses simplificatrices citées ci-dessus , les équations de la machine synchrone triphasée sans amortisseur s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (II-1)$$

Sous forme réduite le système d'équations (I-1) s'écrit :

$$[V_s] = [R] [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (II-2)$$

La relation entre flux et courant s'écrit :

$$[\Phi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [\varphi_f] \quad (II-3)$$

Avec:

$$[\varphi_f] = \phi_f \cdot \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II-4)$$

$\phi_f$  : Flux des aimants permanents.

Le système d'équations flux s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M_s & M_s \\ M_s & L & M_s \\ M_s & M_s & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \phi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II-5)$$

L : inductance cyclique propre d'une phase statorique.

$M_s$  : inductance mutuelle cyclique entre deux phases statoriques

$\phi_f$  : Le flux des aimants.

$\theta$  : Angle électrique

En remplaçant l'équation (II-3) dans (II-2) on aura :

$$[V_s] = ([R] + \frac{d[L_s]}{dt}) [I_s] + [L_s] \frac{d[I_s]}{dt} + \omega \frac{d[\Phi]}{d\theta} \quad (II-6)$$

### 2.5.3 Equation mécanique :

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\omega}{dt} = p(C_{em} - C_r) - F\omega \quad (II-7)$$

Avec :

$C_{em}$  : Couple électromagnétique (couple moteur).

$C_r$  : Couple de charge (couple résistant).

$F$  : Coefficient de frottement.

$J$  : Moment d'inertie.

$p$  : nombre de paires de pôles.

On voit bien que le système d'équations est à coefficient variable en fonction de  $\theta$ . Sa résolution analytique dans ce repère reste très difficile.

### 2.5.4 Mise en équation et modèle de PARK :

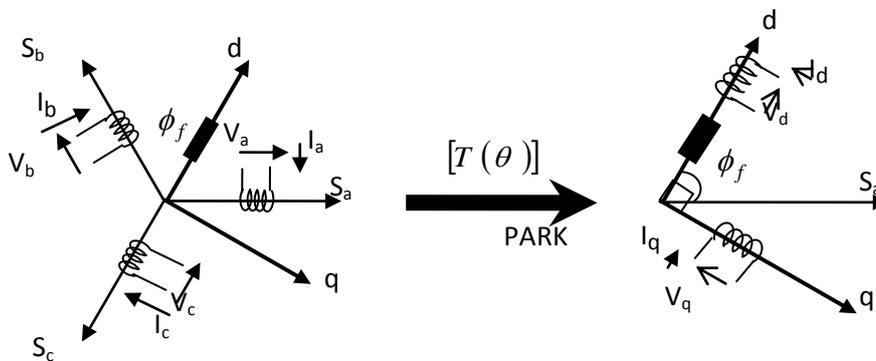
La mise en équation des moteurs synchrones triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables (I-6). L'étude analytique du comportement du système est alors laborieuse vu le grand nombre de variables. On utilise des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Les transformations de *PARK* permettent d'obtenir un système équivalent formé de trois enroulements orthogonaux, deux de ces enroulements sont situés dans le même plan que les enroulements  $a$ ,  $b$  et  $c$ . Le troisième enroulement est situé dans le plan orthogonal au plan formé par les axes des phases  $a$ ,  $b$  et  $c$  et représente la composante homopolaire. La transformation de *PARK* permet de passer d'une présentation dans le repère triphasé ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) à une représentation dans un repère dit de *PARK* à axe orthogonaux ( $d$ ,  $q$ ,  $o$ ).

En se basant sur les hypothèses simplificatrices, et en appliquant la transformation de *PARK* au stator et au rotor, on peut exprimer l'ensemble des relations de la machine dans ce repère. Le repère de *PARK* ( $d$ ,  $q$ ,  $o$ ) est à priori

quelconque, on peut ainsi considérer qu'il tourne à une vitesse arbitraire. Des choix plus ou moins pertinents peuvent être faits en fonction du repère auquel on lie la représentation de *PARK*.

### 2.5.4.1 Mise en équation :

À un système triphasé quelconque ( *a, b, c* ), on associe un système biphasé ( *d, q, o* ) donnant le même champ tournant dans une *MSAP*. Les aimants sont représentés au rotor par une source de flux parfaite, comme le montre la figure suivante :



**Fig II.3 Passage triphasé - biphasé de la MSAP**

- *d, q* : Indice des composantes de PARK.

-  $T(\theta)$ : matrice de passage de PARK.

### 2.5.4.2 Principe de la transformation de Park :

La transformation directe de *Park* est définie par la matrice  $[T(\theta)]$ . Aux vecteurs originaux  $[V_{abc}]$ ,  $[I_{abc}]$ ,  $[\phi_{abc}]$ , la transformation de *PARK* fait correspondre les vecteurs  $[V_{dqo}]$ ,  $[I_{dqo}]$ ,  $[\phi_{dqo}]$ . La transformation de *PARK* est appliquée de manière identique au vecteur de tensions, de courants, et de flux  $[X_{dqo}] = [X_d \ X_q \ X_o]^T$ . Le vecteur  $X_o$  représente la composante homopolaire, normale au plan formé par les vecteurs  $X_a$ ,  $X_b$ , et  $X_c$ . Les vecteurs  $X_d$  et  $X_q$  représentent les vecteurs diphasés qui correspondent aux vecteurs  $X_a$ ,  $X_b$ , et  $X_c$ . La transformation de *PARK* est définie par:

**a) Passage triphasé au biphasé :**

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [T(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_c \\ X_d \end{bmatrix} \quad (II-12)$$

**b) Passage biphasé au triphasé :**

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [T(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (II-13)$$

$T(\theta)$  et  $T(\theta)^{-1}$  Sont les matrices de passage direct et inverse, elles sont données par :

$$[T(\theta)] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (II-14)$$

$$[T(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (II-15)$$

## Chapitre 2 : Modélisation de la MSAP

Dans le cas d'un système équilibré la ligne des 1/2 pour  $[T(\theta)]$  est éliminée de même pour  $[T(\theta)]^{-1}$  la colonne des 1 est éliminée

### 2.5.4.3 Passage du repère dq au repère $\alpha\beta$ :

Le passage des composantes  $\alpha\beta$  aux composantes dq est donné par une matrice de rotation exprimée par :

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

### 2.5.4.4 Modélisation de la MSAP dans le repère de PARK :

La transformation de PARK s'exprime par la relation suivante :

$$[X_{dqo}] = T(\theta) \cdot [X_{abc}] \quad (\text{II-17})$$

L'indice "o" désigne la composante homopolaire.

## 2.6 Equations électriques :

La machine triphasée est équilibrée et symétrique avec neutre isolé alors la composante homopolaire est nulle. Les équations électriques sont les suivantes [1][6] :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q \omega I_q \\ V_q = R \cdot I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases} \quad (\text{II-18})$$

Où:  $L_d$  : Inductance suivant l'axes "d".

$L_q$  : Inductance suivant l'axes "q".

### 2.7 Calcul du couple électromagnétique :

La connaissance du couple électromagnétique de la machine 'C<sub>em</sub>' est essentielle pour la commande de la machine. Nous le développons sur la base de l'équation de la puissance instantanée P (t) qui s'écrit pour le stator dans le repère (d, q) :

$$P (t) = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q \quad (II-19)$$

La puissance électrique absorbée s'exprime par :

$$P (t) = R (I_d + I_q) + \left( I_d \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \frac{d\phi_q}{dt} \right) + (I_q \phi_d - I_d \phi_q) \omega \quad (II-20)$$

- le premier terme représente les pertes joule dans l'induit.
- le deuxième terme représente la variation par unité de temps de l'énergie magnétique emmagasinée.
- Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la machine.

A partir de l'équation (II-16) on déduit l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = p (\phi_d I_q - \phi_q I_d) \quad (II-21)$$

En utilisant la relation entre flux et courants :

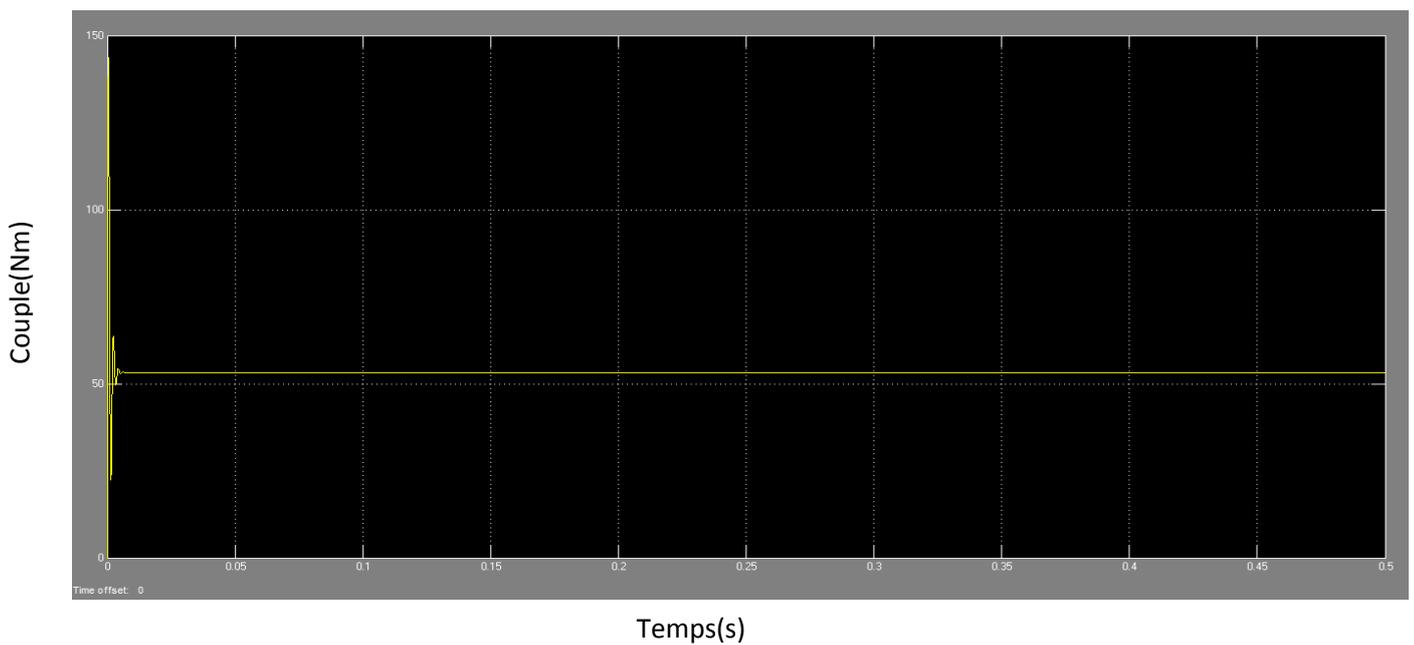
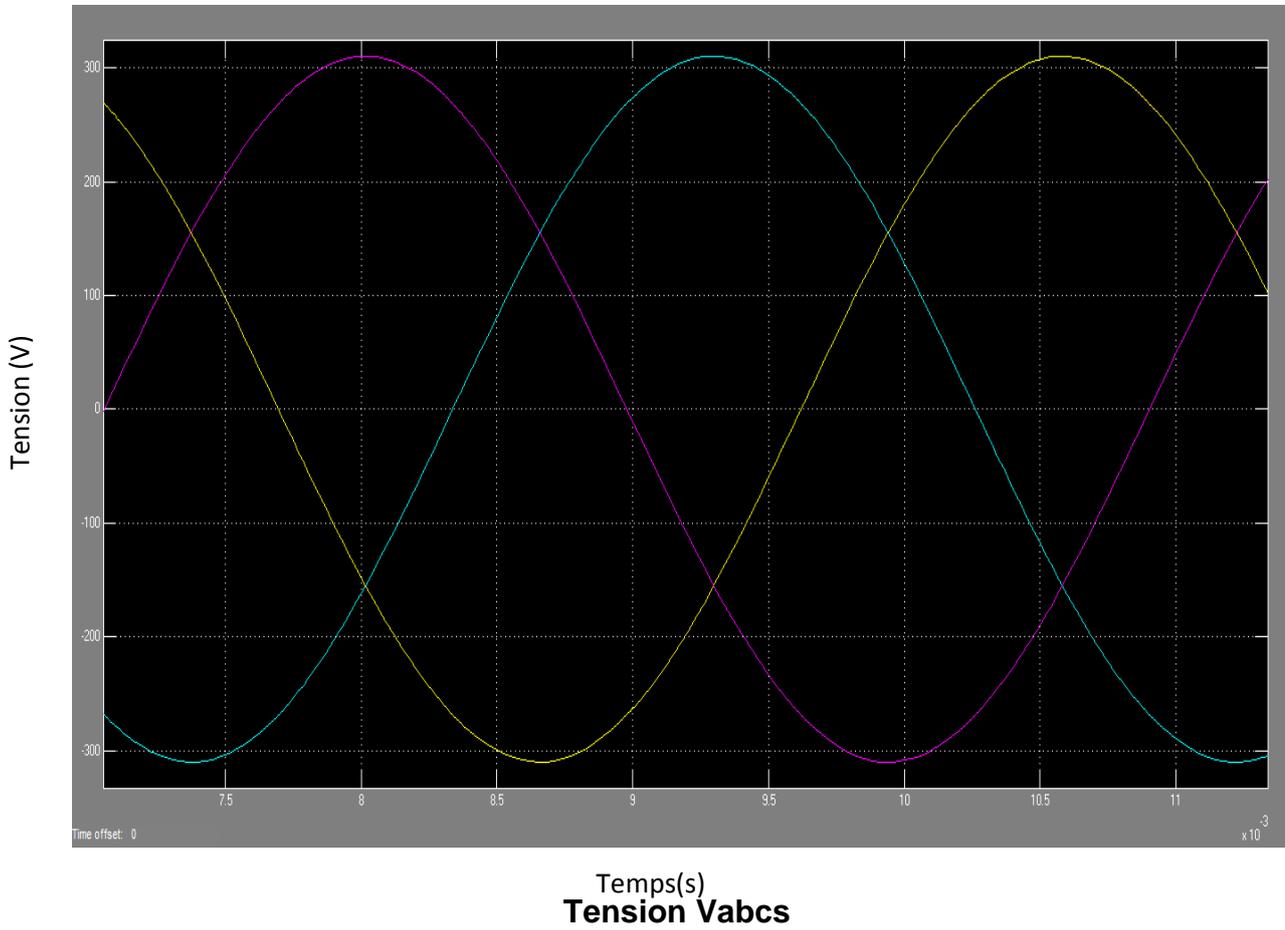
$$\begin{cases} \phi_d = L_d \cdot I_d + \phi_f \\ \phi_q = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad (II-22)$$

Puis en remplaçant (I-17) dans (I-18) on trouve :

$$C_{em} = p ((L_d - L_q) I_d \cdot I_q + \phi_f \cdot I_q) \quad (II-23)$$

## 2.8 Résultats de simulations :

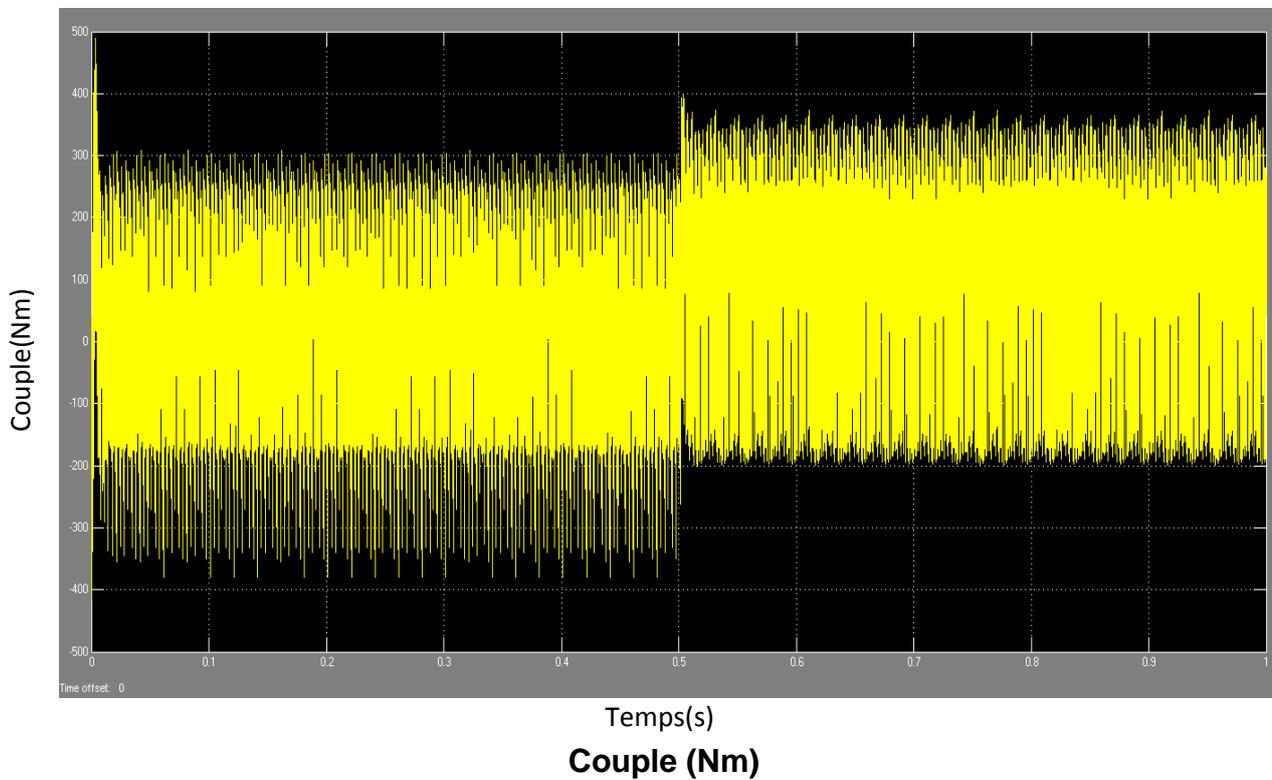
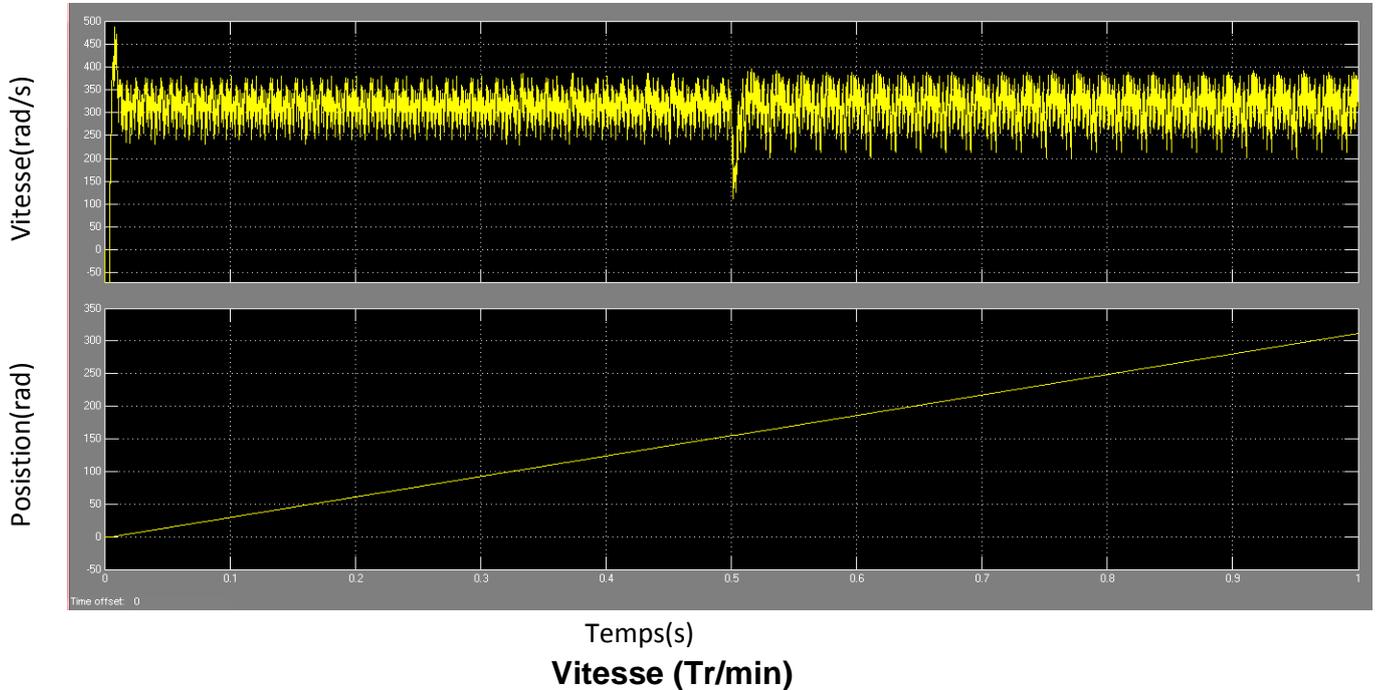
Présentés à l'aide de logiciel MATLAB/ Simulink.

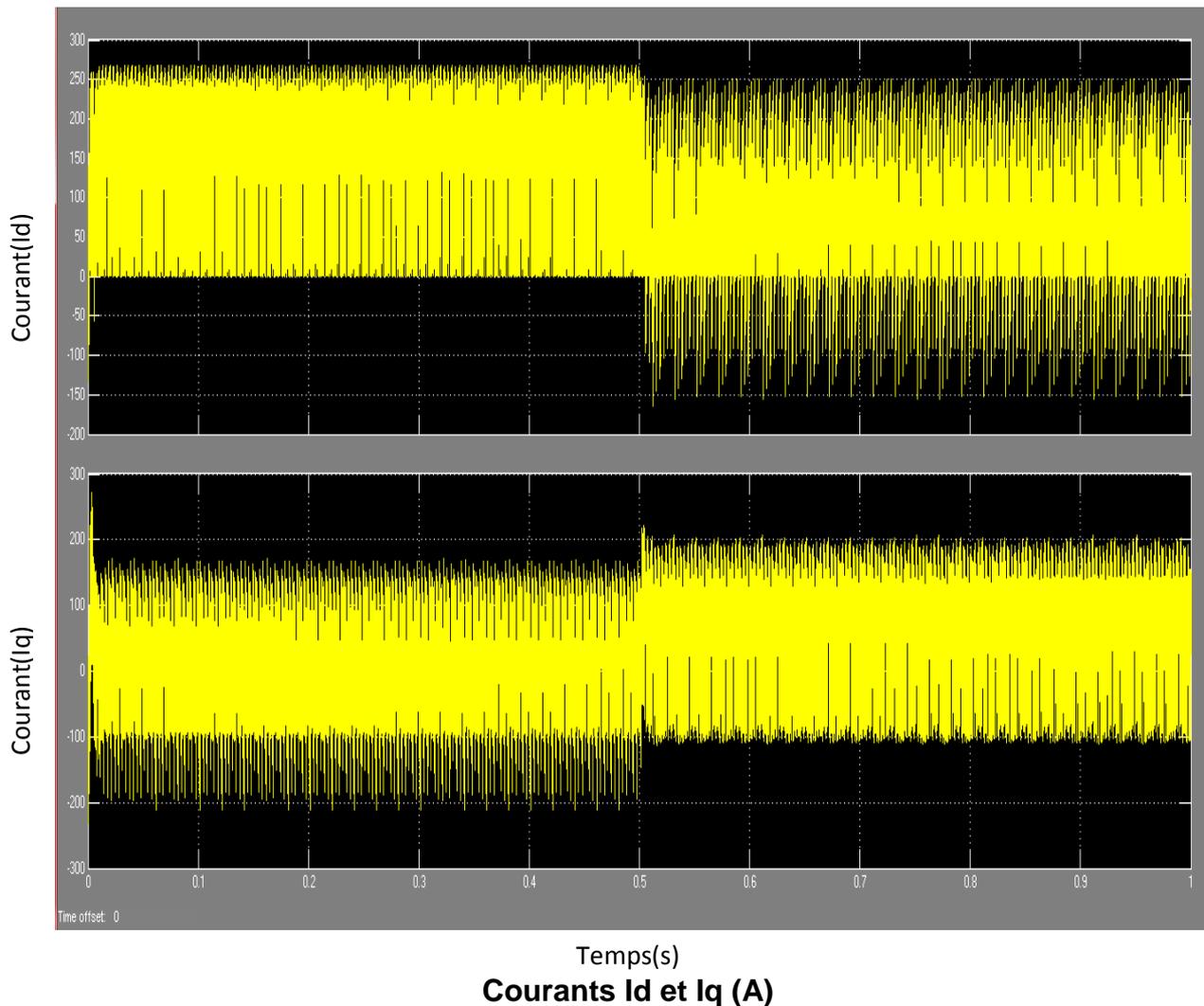


## Chapitre 2 : Modélisation de la MSAP

### Couple alternateur (N.m)

Fig II.4 représente les tensions  $V_{abcs}$  avec  $p=4$   $\omega_d = 3900\text{tr/min}$   $f=240\text{Hz}$   
 $L_d=L_q=2.5\text{mh}$  avec le couple





**Figure II.5 illustre les Résultats de la MSAP alimentée par un réseau triphasé équilibré à vide à fréquence  $f=50$  Hz en boucle ouverte avec application d'un couple de charge  $C_r= 140$  N.m à  $t= [0.5 \ 1]$ .**

### **2.8.1 Interprétation des résultats :**

Figure II.4 présente les courbes des tensions alternatives  $V_{abcs}$  générées par l'alternateur à une vitesse d'entraînement du moteur diesel de 3900 tr/min et  $p=4$  et  $\phi_{pie}=0.38$  Wb ce qui a donné une fréquence de 240 Hz avec une amplitude de 311V ( $220 \cdot \sqrt{2}$ ) on a conclu d'après l'expérience que la fréquence est proportionnelle a la vitesse d'entraînement  $W_d$  et au nombre de paire de pole  $p$ , d'où l'amplitude dépend du flux de l'aimant permanent  $\phi_{pie}$  et la vitesse d'entraînement  $W_d$ . Elle présente aussi le couple qui dépend de  $p$  de  $\phi_{pie}$  et de  $I_{qs}$  On remarque que ce couple varie

## Chapitre 2 : Modélisation de la MSAP

---

en régime transitoire pendant un petite laps de temps et se stabilise vers sa valeur nominale qui est de 53 Nm en régime permanent.

### 2.9 CONCLUSION:

Dans ce chapitre, le modèle mathématique de la MSAP est obtenu dans le repère de *Park* pour nous permettre d'aborder aisément la commande qui est présentée dans le quatrième chapitre.

Les résultats obtenus par simulation de ce deuxième chapitre montrent la validité du modèle de *Park* de la machine synchrone, cette dernière répond bien pour décrire l'évolution d'un démarrage direct sur un réseau standard.

Pour des fins de commande, il est indispensable d'associer un onduleur de tension à l'alimentation de la machine. De ce fait, le dernier chapitre sera consacré à la l'étude et la simulation de l'onduleur de tension ainsi qu'à sa stratégie de commande (MLI sinus-triangulaire).

# **Chapitre 3 : Association Alternateur-Redresseur-Batterie**

### 3.1. INTRODUCTION :

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies. Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance tels les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composants ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme.

### 3.2 REDRESSEUR A COMMANDE MLI :

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

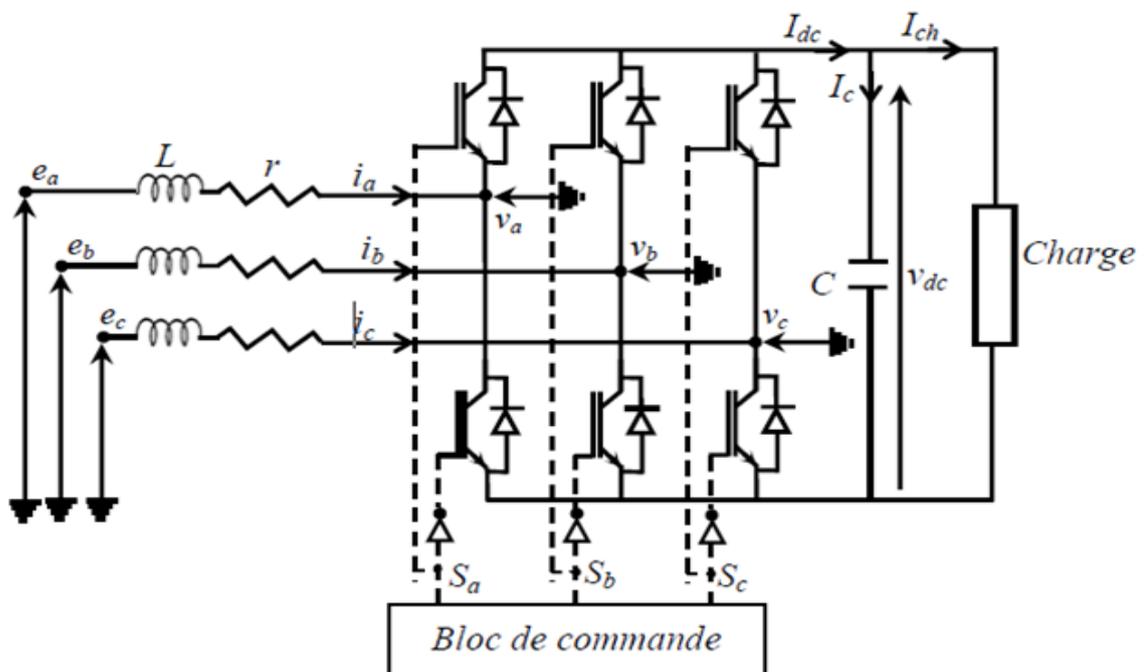


Figure III.1 : Schéma du redresseur MLI triphasé de structure de tension.

### 3.3 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu  $V_{dc}$  est mesurée et comparée avec une référence  $V_{dc-ref}$ , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu  $V_{dc}$  mesurée aux bornes du condensateur  $C$ .

Quand le courant  $i_{ch}$  est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur  $C$  est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande de plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand  $i_{ch}$  devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur  $C$  est surchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative.

### 3.4 Les techniques de commandes du redresseur :

#### 3.4.1 MLI à Bande d'hystérésis (modulé) :

La commande MLI à bande d'hystérésis modulé sert à éliminer les inconvénients de la commande par hystérésis classique, liés à une fréquence de découpage variable, et parfois élevée, pour une faible valeur de l'inductance cyclique de la machine. La méthode de «l'hystérésis modulé» permet d'imposer la fréquence de hachage des transistors du convertisseur, lors du contrôle de tension.

Cette méthode comporte les avantages suivants :

La simplicité et la robustesse de la commande par hystérésis, qui n'exige pas la connaissance exacte des paramètres de la machine. Une fréquence de hachage constante comme pour la commande par Modulation de Largeur des Impulsions (MLI), qui permet de réduire le nombre d'harmoniques sur les ondes de courant et de couple.

Le principe de la méthode de l'hystérésis modulée consiste à superposer à la valeur du courant de référence de la machine  $i^*_{ref}$  un signal triangulaire  $i_{tr}$  ayant la fréquence  $f_{pr}$  que l'on souhaite imposer. On obtient ainsi un courant de référence modulé  $i^*_{mod}$ .

Nous avons la relation suivante :  $i^*_{mod} = i^*_{ref} + i_{tr}$

Ce nouveau signal modulé sera utilisé en tant que nouvelle référence pour la boucle interne de contrôle du courant (figure III.2)

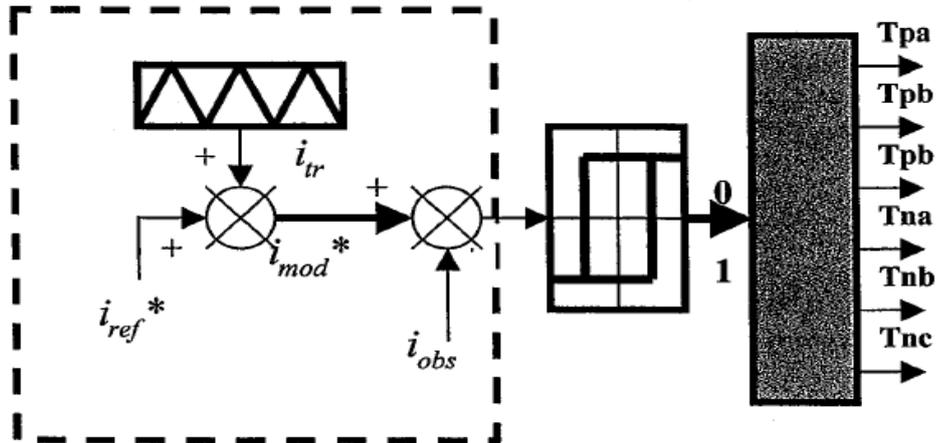


Figure III.2: Hystérésis modulée :

Le principe de commande est ensuite identique à la méthode par hystérésis classique.

### 3.4.2 La méthode de la MLI à porteuse triangulaire :

Elle compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire.

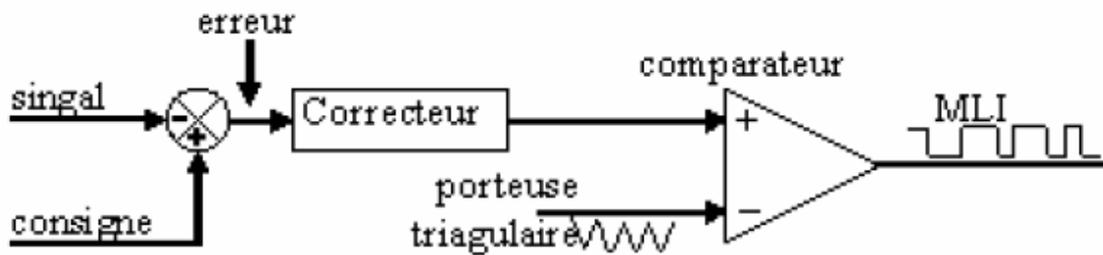


Figure III.3 Modulateur MLI à porteuse triangulaire.

3.4.3 Modélisation du redresseur MLI [20]:

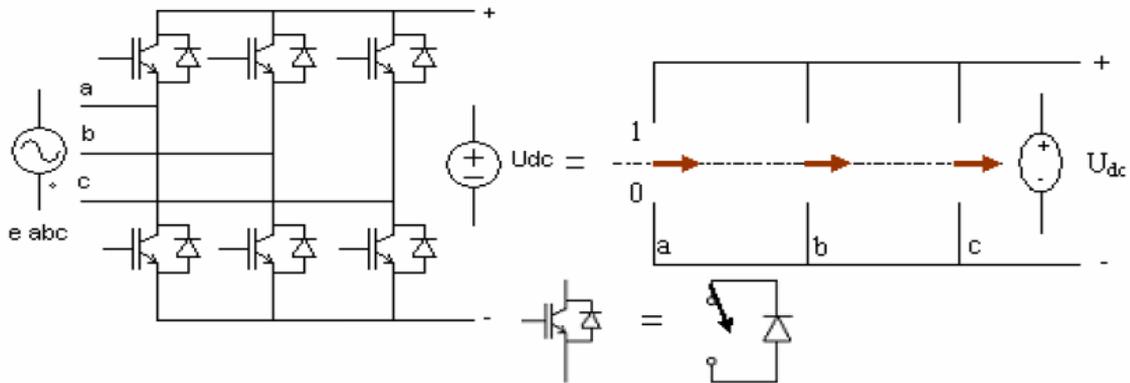


Figure III.4 Pont redresseur :

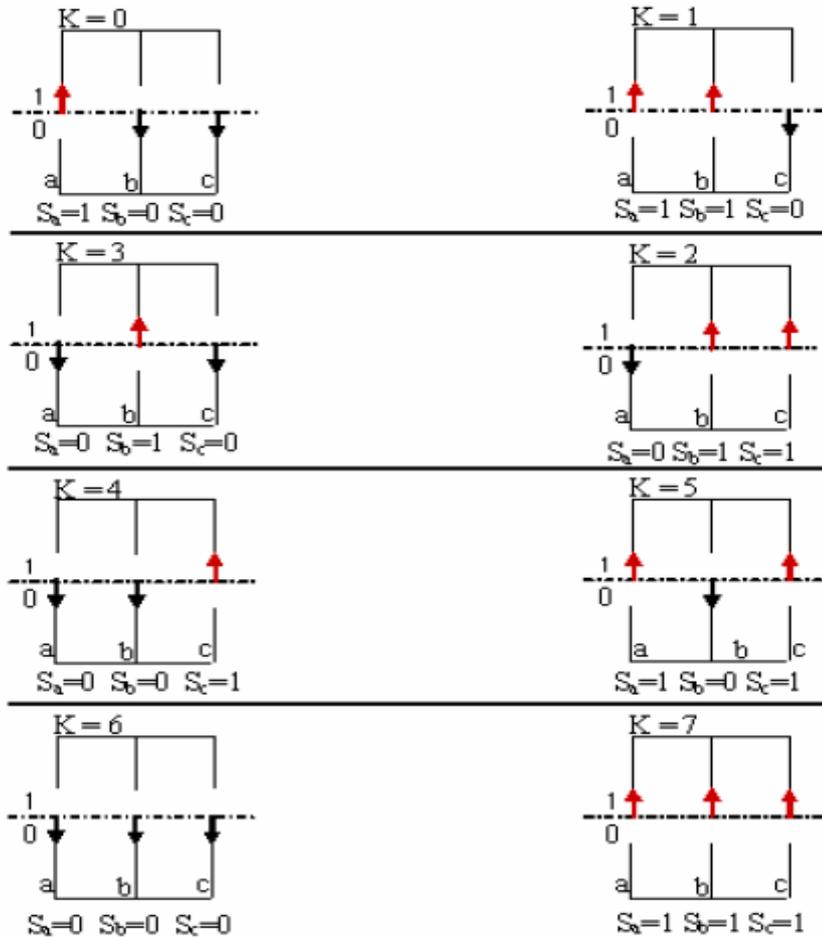


Figure III.5 Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI

## Chapitre3: Association Alternateur-Redresseur-Batterie

L'onduleur utilisé est piloté à partir de grandeurs logiques par l'intermédiaire d'un circuit de commande. On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors ( $T_i$  transistor du haut et  $T_i'$  transistor du bas),  $S_i$  et  $S_i'$  les commandes logiques associées. En négligeant le temps mort entre les interrupteurs du même bras, la commande de ces derniers sera alternée ( $S_i=S_i'$ ) nous constatons deux états complémentaires [17] :

- Si  $S_i = 1$ , alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert ;
- Si  $S_i = 0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant.

Pour simplifier l'étude, supposons que l'alimentation en tension est une source parfaite dans le sens où, quel que soit le courant  $i$  délivré ou absorbé, la tension  $V_{dc}$  à ses bornes reste toujours constante [17].

On a pour un point  $m$  :

$$\begin{pmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{pmatrix} = E^* \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix}$$

Avec:

$$\begin{cases} V_{am} = V_{an} + V_{nm} \\ V_{bm} = V_{bn} + V_{nm} \\ V_{cm} = V_{cn} + V_{nm} \end{cases}$$

D'où:

$$V_{am} + V_{bm} + V_{cm} = (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) + 3V_{nm}$$

Pour une charge équilibrée on a

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

Donc

$$V_{nm} = (V_{am} + V_{bm} + V_{cm})$$

En remplaçant  $V_{nm}$  dans le système ci-dessus:

$$\begin{cases} V_{am} = V_{an} + 1/3(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{bm} = V_{bn} + 1/3(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{cm} = V_{cn} + 1/3(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{an} = 1/3(2V_{am} - V_{bm} - V_{cm}) \\ V_{bn} = 1/3(-V_{am} + 2V_{bm} - V_{cm}) \\ V_{cn} = 1/3(-V_{am} - V_{bm} + 2V_{cm}) \end{cases}$$

D'où nous déduisons que :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = 1/3 \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{pmatrix} = V_{dc}/3 \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix}$$

## Chapitre3: Association Alternateur-Redresseur-Batterie

Alors les 3 tensions simples peuvent prendre ces valeurs comme le montre le tableau suivant:

<b>K</b>	<b>Sa</b>	<b>Sb</b>	<b>Sc</b>	<b>Van</b>	<b>Vbn</b>	<b>Vcn</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2vdc/3</b>	<b>-vdc/3</b>	<b>- vdc/3</b>
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>vdc/3</b>	<b>vdc/3</b>	<b>-2vdc/3</b>
<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>- vdc/3</b>	<b>2vdc/3</b>	<b>-vdc/3</b>
<b>4</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>-2vdc/3</b>	<b>vdc/3</b>	<b>vdc/3</b>
<b>5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>-vdc/3</b>	<b>- vdc/3</b>	<b>2vdc/3</b>
<b>6</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>vdc/3</b>	<b>-2vdc/3</b>	<b>vdc/3</b>
<b>7</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Tableau III.1: Tensions simples en fonction des différents ordres de commande.**

Et on a :

$$\begin{cases} V_{an}=Ri_a+Ldi_a/dt \\ V_{bn}= Ri_b+Ldi_b/dt \\ V_{cn}= Ri_c+Ldi_c/dt \end{cases}$$

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme suit

$$CdV_{dc}/dt=i_c$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire :

$$i_c=i_{dc}-i_{ch}$$

$$i_{dc}=S_a i_a+S_b i_b+S_c i_c \text{ et } CdV_{dc}/dt= S_a i_a+S_b i_b+S_c i_c-i_{ch}$$

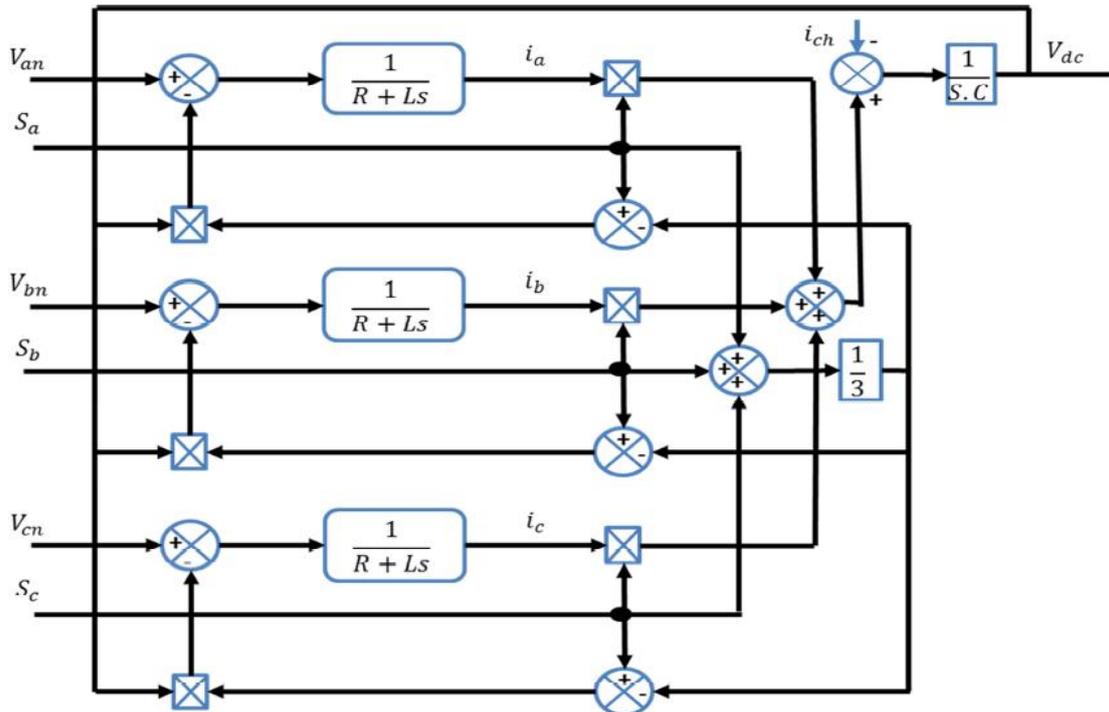


Figure III.6 Schéma fonctionnel du redresseur dans les coordonnées triphasées normales

3.5 Association alternateur-redresseur-batterie :

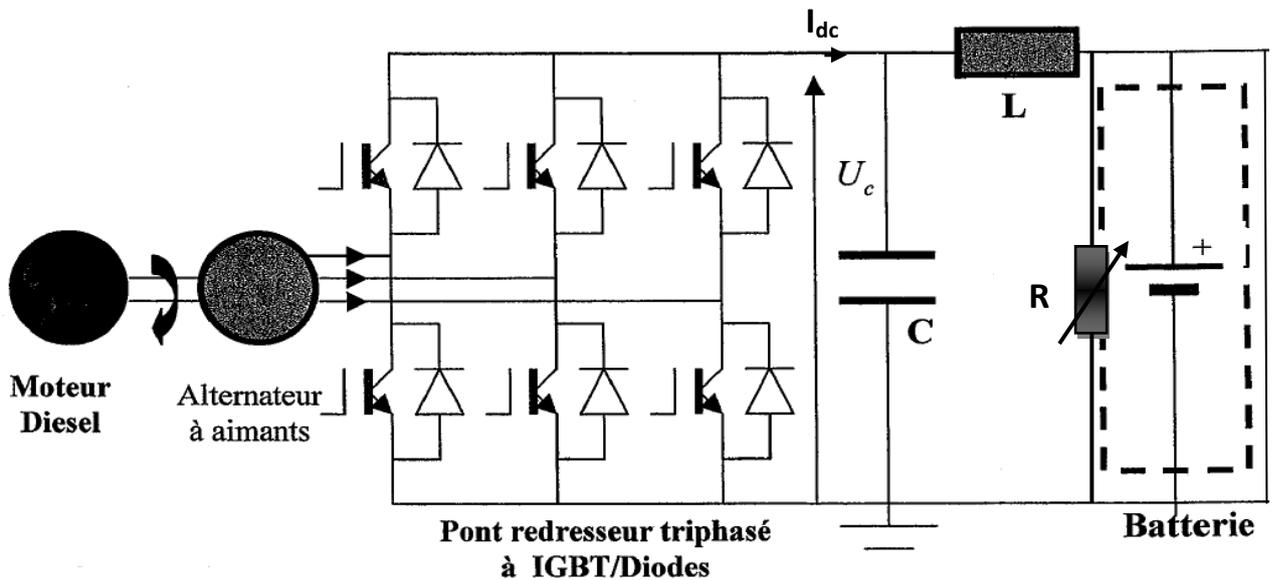
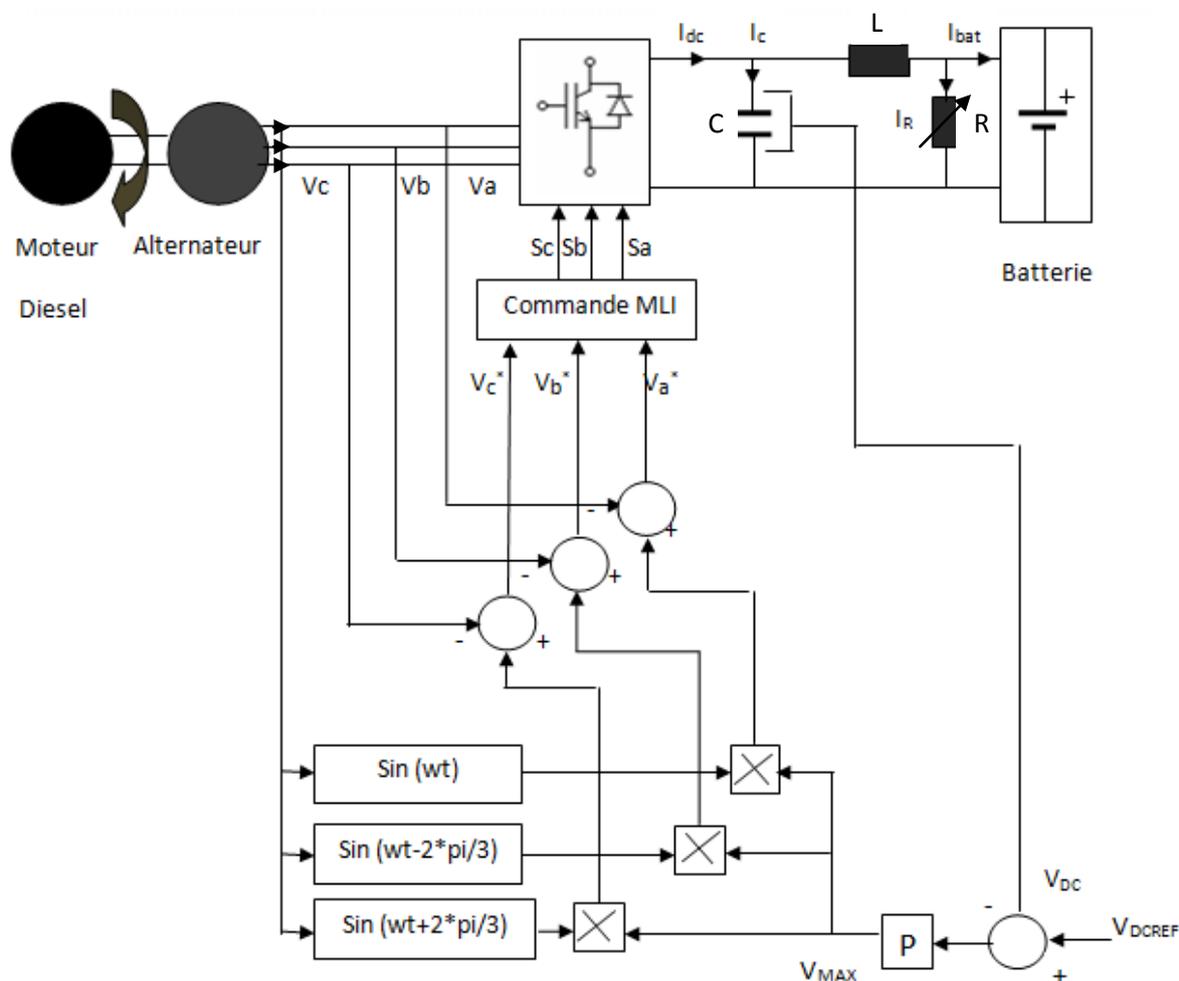


Figure III.7 Schéma synoptique de puissance du redresseur

## Chapitre3: Association Alternateur-Redresseur-Batterie

Dans notre application on cherche à charger une batterie avec un courant  $I_{bat}=105-110A$  avec une tension égale à  $V_{dc}$ . Pour satisfaire ces contraintes nous avons monté le redresseur en boucle fermé comme le montre la figure suivante :



**Figure III.8 Schéma synoptique du redresseur contrôlé en tension :**

La tension du bus continu  $V_{dc}$  est mesurée et comparée avec une référence  $V_{dc-ref}$ . Le résultat de comparaison est corrigé à travers un correcteur de type P, on obtient en sortie la valeur max de tension du bus alternatif  $V_{max}$ , suivant cette relation  $V_{max}=P*(V_{dc-ref}-V_{dc})$  avec  $P=2/3$ . La forme d'onde sinusoïdale de la référence de tension est obtenue en multipliant  $V_{max}$  avec une fonction sinus, de même fréquence de la source, et même angle de déphasage  $\phi$ . De plus, la référence doit être synchronisée avec la source d'alimentation. Une fois que, la référence a été créée, la commande MLI est produite, par le régulateur utilisé, pour commuter les interrupteurs.

### 3.5.1 Réglage du courant de batterie $I_{bat}$ :

Pour but d'obtenir un courant  $I_{bat}=110$  A on a fait passer le courant du bus continue à travers une inductance de filtrage L pour l'ondulation, et une résistance variable R monter en parallèle avec la batterie pour fixé la valeur du courant qui va charger la batterie.

**Calcul de R :**

$$\text{On a} \quad I_{dc} = I_c + I_R + I_{bat} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c$$

Si on néglige  $I_c$  devant  $I_R$  et  $I_{bat}$  on aura

$$I_{dc} = I_R + I_{bat}$$

$$\text{D'où} \quad I_R = I_{dc} - I_{bat} \text{ et } V_{dc}/R = I_{dc} - I_{bat}$$

$$\text{Donc} \quad R = V_{dc} / (I_{dc} - I_{bat})$$

### 3.5.2 Résultats de simulation :

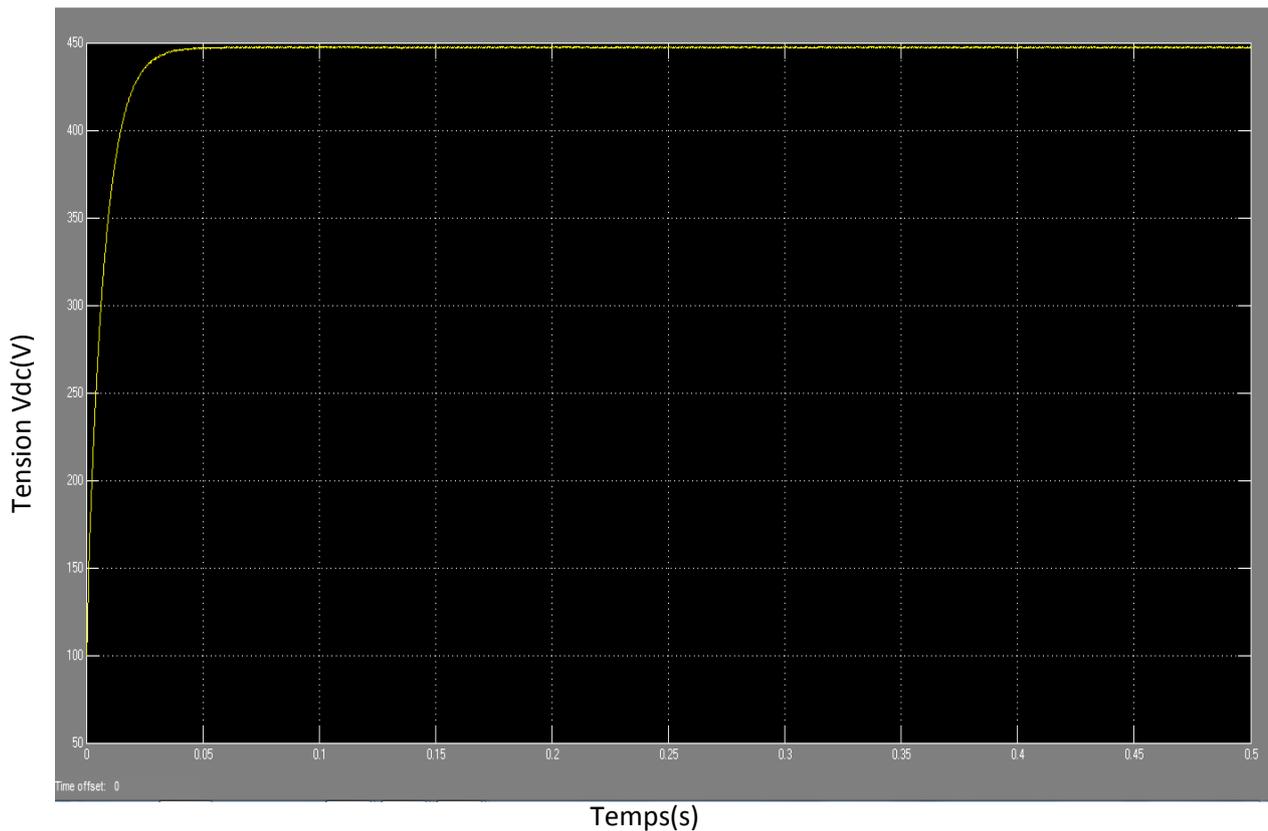
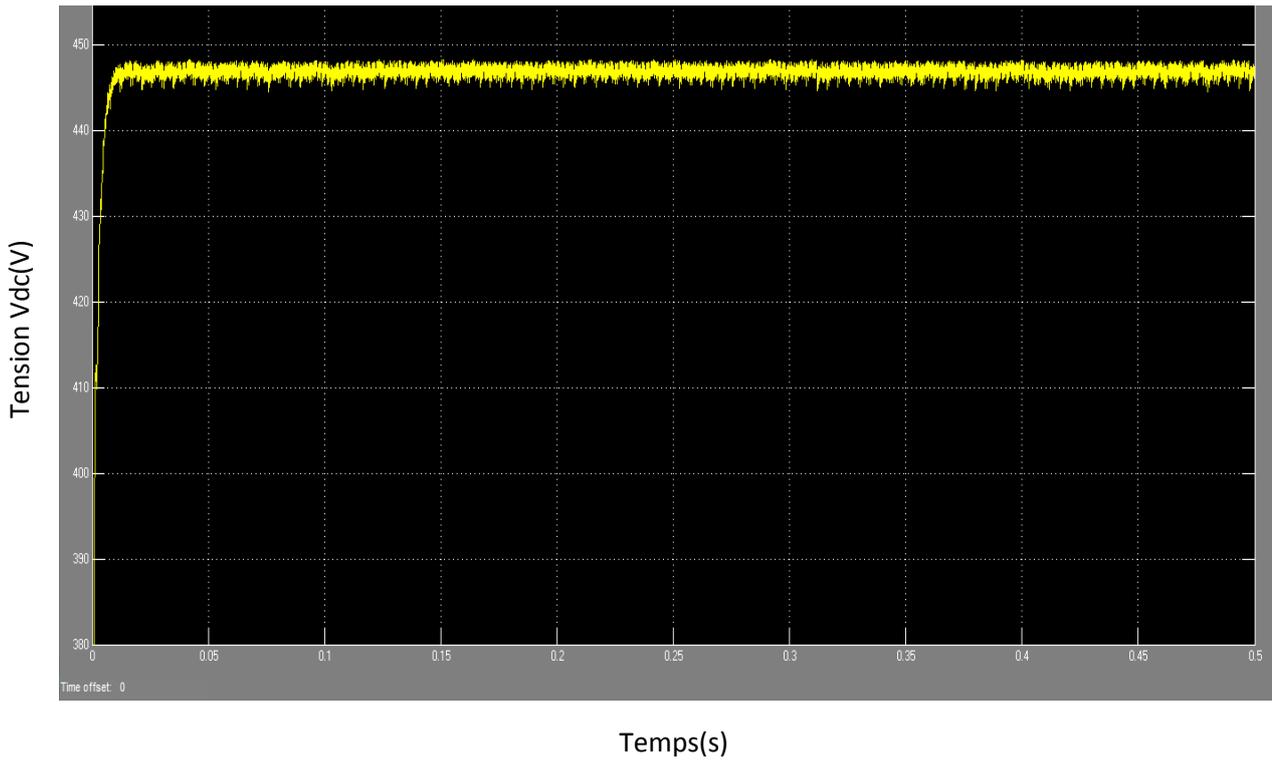
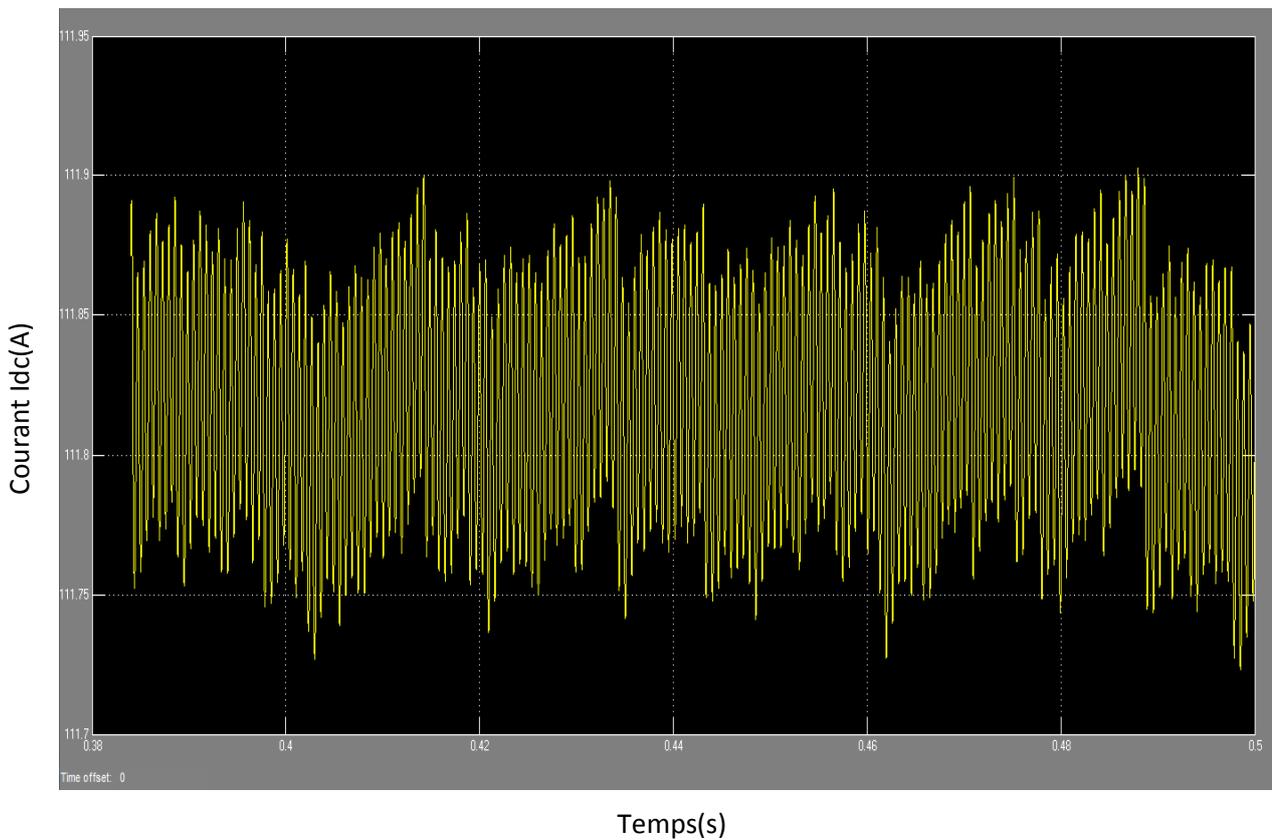


Figure III.9 La Tension Vdc (v) avec C=5mF



**Figure III.9 b Tension Vdc (v) avec  $C=1.5mF$**



**Figure III.10a Courant Idc (A) fournit à la batterie avec  $L=0.0003H$**

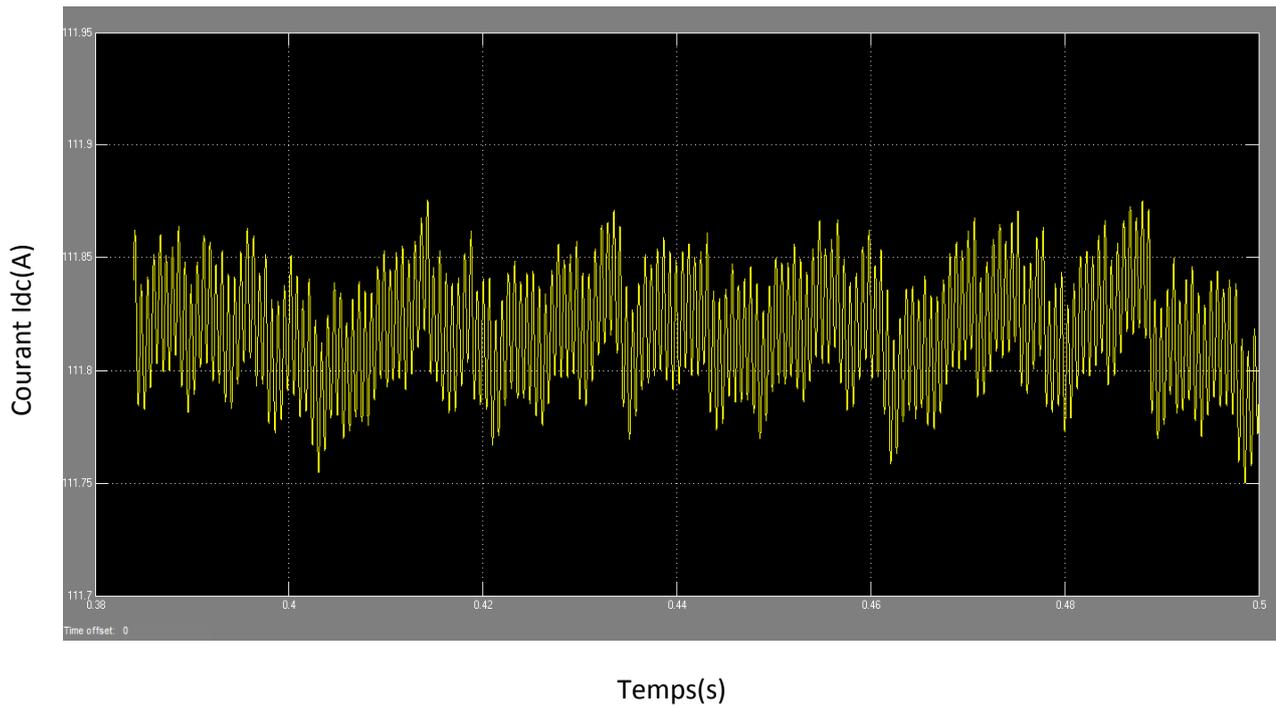


Figure III.10b Courant Idc (A) fournit a la batterie avec  $L=0.0009H$

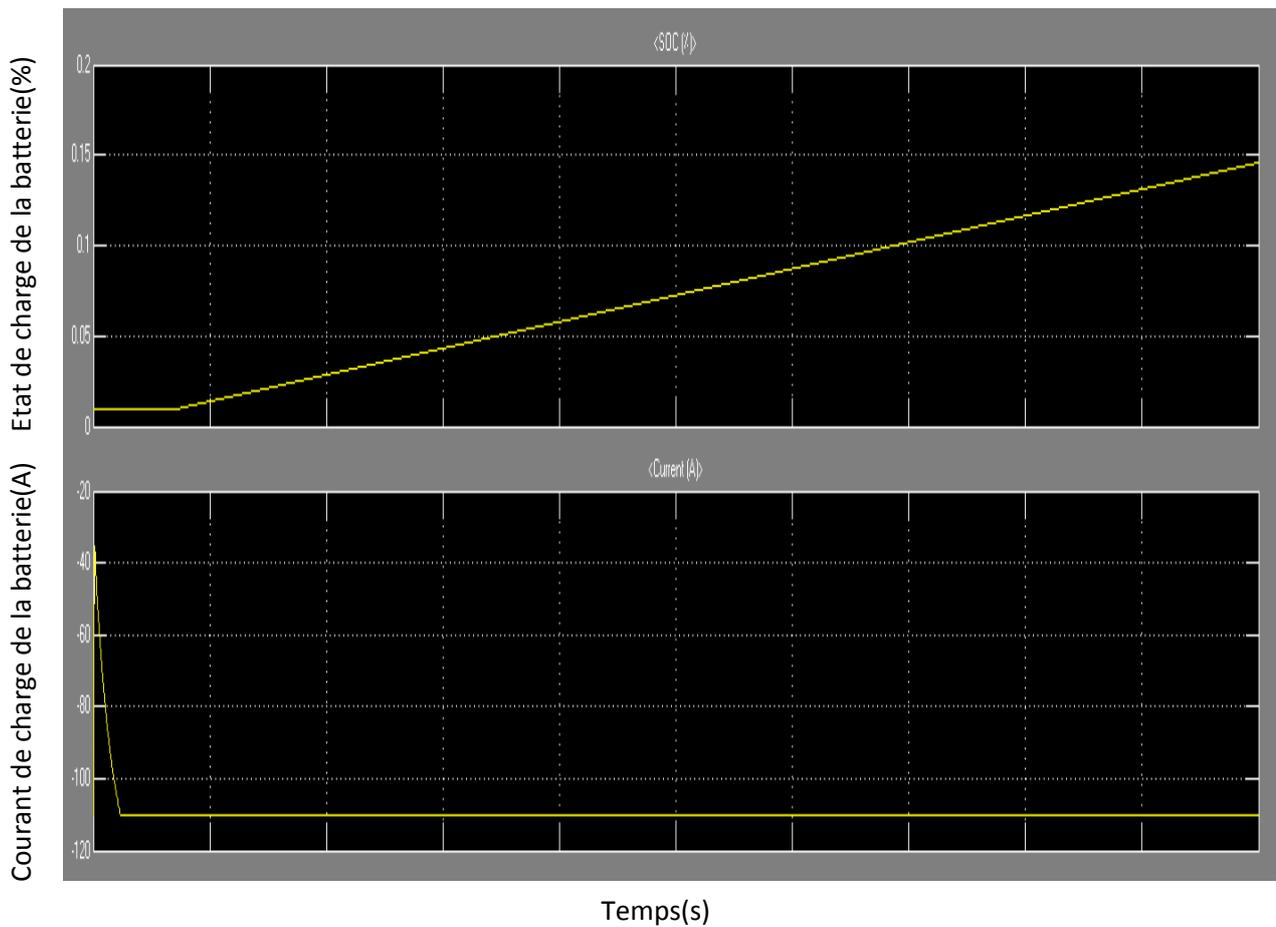


Figure III.11 Courant et l'état de charge de la batterie (A)

### 3.5.2.1 Interprétation des résultats :

La figure III.9 montre l'allure de la tension  $V_{dc}$  après conversion AC-DC à travers le redresseur et filtrage par le condensateur C on remarque bien que la tension augmente de 0 et converge vers la valeur désirée avec la commande utilisée et on voit bien l'effet du condensateur C (Figure III.9 a et b) qui lisse la tension en réduisant l'ondulation ou la capacité est un inversement proportionnel au degré de l'ondulation.

La figure III.10(a et b) montre l'allure du courant continue fournie à la batterie  $I_{bat}$  on observe que sa valeur est égale à 111 A mais il présente une petite ondulation de l'ordre de quelques milliampères dont on peut la diminuer en augmentant la valeur de l'inductance de lissage L qui est aussi inversement proportionnel au degré de l'ondulation du courant

La figure III.11 représente l'allure du courant  $I_{bat}$  négative (entrant à la batterie) (axe de bas) et SOC l'état de charge de la batterie (en pourcentage).

### 3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a commencé par définir les redresseurs MLI et ces différents composants (diode, transistor).

Nous avons choisis les transistors de type IGBT grâce à leurs performances et leur résistance dans le domaine de puissance. On a, ensuite, expliqué leur principe de fonctionnement.

Deux techniques de commandes MLI (triangulaire et hystérésis modulé), ont été présentées ainsi que les étapes de hachages des transistors.

Ensuite nous avons fait l'association du redresseur avec la batterie suivant les contraintes suggérées, enfin les résultats de simulation ont été présentés et interprétés.

Dans le chapitre suivant nous allons entamer la partie motrice du travail qui serait l'application des résultats obtenus dans ce chapitre pour l'alimentation du moteur synchrone à aimant permanent, utilisé pour générer le mouvement dans le véhicule hybride.

# **Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série**

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

---

### 4.1 Introduction :

L'ensemble alternateur-redresseur commandé fait partie de la chaîne de conversion d'énergie et a pour rôle principal de convertir la puissance mécanique fournie par le moteur diesel tournant au voisinage d'une vitesse optimale en puissance électrique sous la tension de batterie pouvant varier dans une plage limitée autour de sa valeur nominale. Le fonctionnement normal du système étudié est conditionné par la variation de certaines grandeurs électriques et mécaniques en fonction des différentes phases de fonctionnement du véhicule. Ces dernières vont particulièrement solliciter la batterie et donc l'ensemble alternateur-redresseur.

### 4.2 Schéma synoptique de l'application :

La figure 4.1 représente le schéma synoptique de l'application de l'ensemble (redresseur-alternateur commandé) à un véhicule hybride série. L'ensemble onduleur-MSAP représente la charge de l'ensemble alternateur-redresseur, étudié précédemment dans le chapitre 3.

Rappelons que le véhicule hybride série est caractérisé par la présence de la batterie, et d'un générateur électrique (ensemble moteur thermique – alternateur redresseur). De plus, on peut envisager soit un seul moteur électrique entraînant le véhicule, sans changer la transmission mécanique, soit deux ou quatre moteurs-roues électriques sans liaisons mécaniques entre eux.

Dans notre application nous avons étudié le cas d'un seul moteur électrique de traction.

Concernant le régime de fonctionnement du véhicule, nous avons choisi le régime de fonctionnement à vitesse constante. Pour cela une commande vectorielle de la vitesse de traction de la MSAP a été proposée.

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

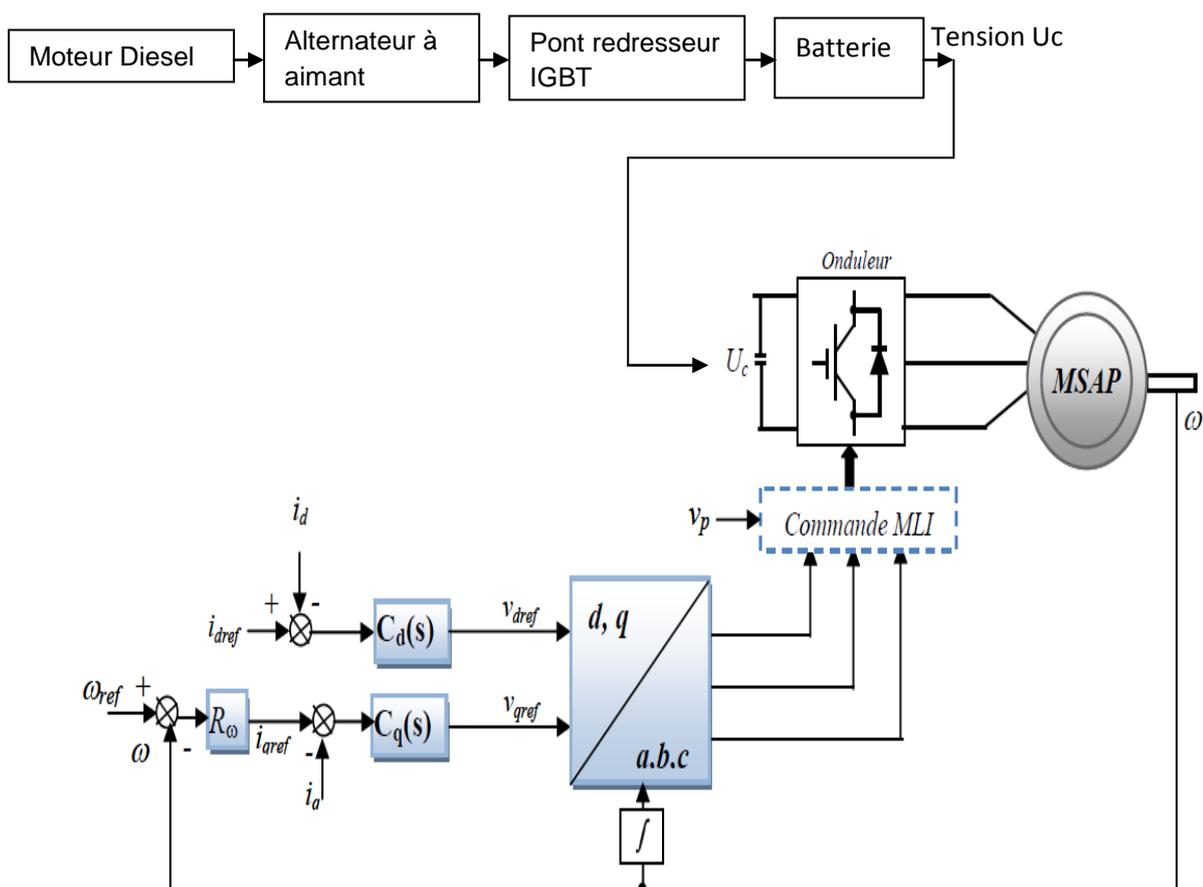
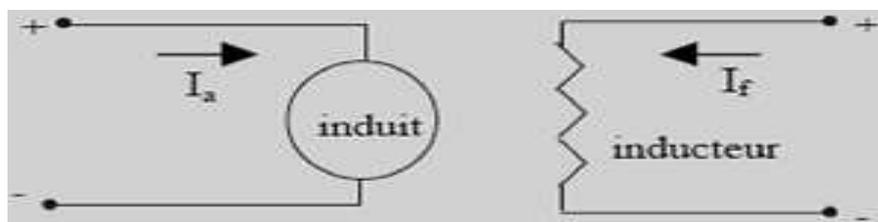


Figure 4.1 schéma synoptique global

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

### 4.3 Principe de la commande vectorielle de la MSAP :

Le principe du découplage permet de modéliser la machine synchrone comme une machine à courant continu. Le contrôle du couple d'une machine alternative nécessite un contrôle en phase et en amplitude des courants d'alimentation d'où le nom de contrôle vectoriel. Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée, il est nécessaire de maintenir le courant  $I_d$  nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant  $I_q$  via la tension  $V_q$ . Physiquement, cette stratégie revient à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation.



**Figure 4.2** Machine à Courant Continu

En utilisant l'équation (4.1) l'expression du couple devient comme suit :

$$C_e = P \phi_f i_q \quad (4.1)$$

La commande vectorielle sert alors à contrôler les deux composantes ( $i_d$ ) et ( $I_q$ ) du courant statorique en imposant les tensions ( $V_d$ ) et ( $V_q$ ) qui conviennent.

Pour imposer ces tensions il suffit d'imposer les tensions de référence ( $V_{qref}$ ) et ( $V_{dref}$ ) à l'entrée de l'onduleur [21].

A l'aide des régulateurs, nous allons obtenir des courants de référence ( $i_{qref}$ ) et ( $i_{dref}$ ) .

#### 4.3.1. Technique de découplage :

Les lois de commande vectorielle des machines alimentée en tensions présente des couplages entre les actions sur les axes (d) et (q) .dans un repère (d) et (q) avec l'axe (d) aligné sur le flux rotorique, on a les équations suivantes [18] :

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

---

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = (L_d \frac{di_d}{dt} + r_s i_d) - w_r l_q i_q \\ V_q = (L_q \frac{di_q}{dt} + r_s i_q) - w_r l_d i_d + w_r \varphi_f \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Pour découpler l'évolution des courants  $i_d$ ,  $i_q$  par rapport aux commandes, on va définir des termes de compensation  $F_{emd}$ ,  $F_{emq}$  telle que :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = V_{dl} - F_{emd} \\ V_q = V_{dl} + F_{emq} \end{array} \right. \quad (4.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dl} = L_d \frac{di_d}{dt} + r_s i_d \\ V_{ql} = L_q \frac{di_q}{dt} + r_s i_q \end{array} \right. \quad (4.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{emd} = w_r L_q i_q \\ F_{emq} = w_r (L_d i_d + \varphi_f) \end{array} \right. \quad (4.5)$$

### 4.3.2 Découplage par compensation :

Les équations (4.2) montrent que  $V_d$  et  $V_q$  dépendent des courants à la fois sur les axes (d) et (q). Nous sommes donc amenés à implanter un découplage qui est basé sur l'introduction des termes de compensation  $F_{emd}$  et  $F_{emq}$ .

Les courants  $i_d$  et  $i_q$  sont découplés. le courant  $i_d$  ne dépend que de  $V_d$  et le courant  $i_q$  ne dépend que de  $V_q$ . Ces expressions s'écrivent comme suit :

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{r_s + sL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{r_s + sL_q} \end{cases} \quad (4.6)$$

Les tensions  $V_d$  et  $V_q$  sont alors reconstitués à partir des tensions  $V_{d1}$  et  $V_{q1}$  comme c'est illustré sur la figure 4.3 :

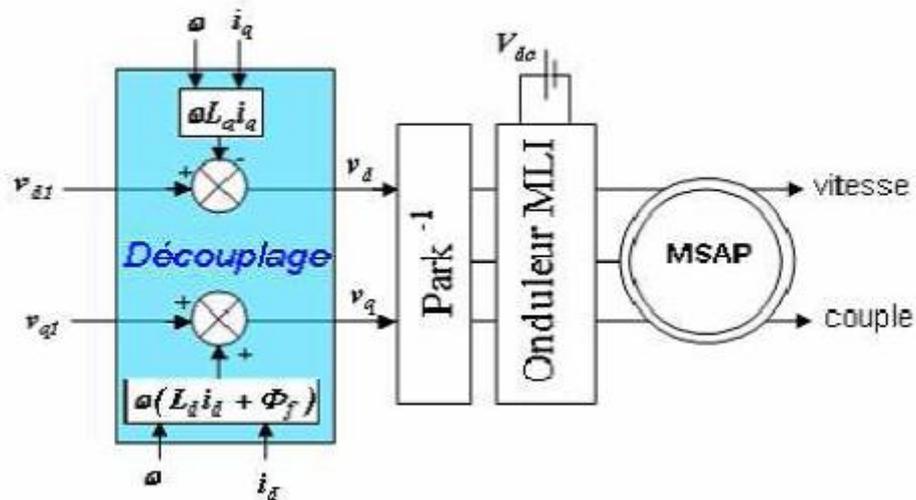


Fig 4.3 Reconstitution des tensions  $v_d$  et  $v_q$

Le principe de correction (régulation) consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques PI. Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure (4.4).

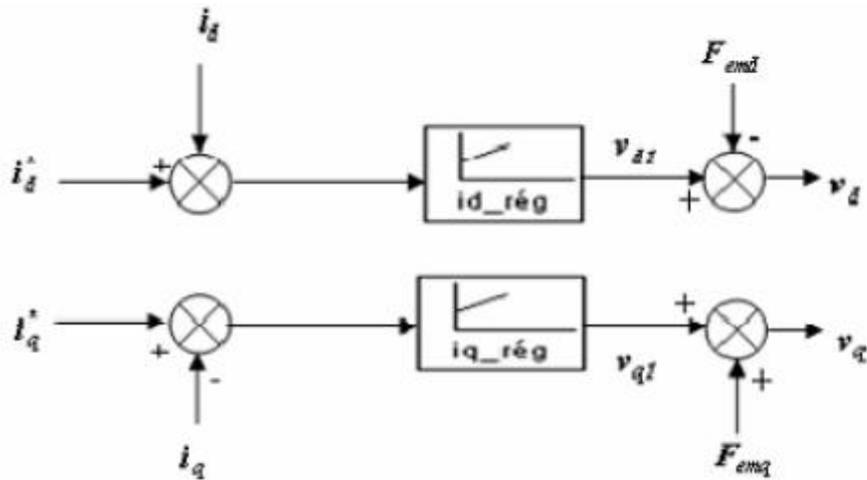


Fig IV. 4 Principe de découplage par compensation

Sur le schéma de principe précédent,  $V_{d1}$  et  $V_{q1}$  représentent les tensions à la sortie des régulateurs des courants  $i_d$  et  $i_q$ .

#### 4.4 Calcul des Régulateurs :

Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus. Les méthodes classiques de l'automatique sont utilisables. Ces méthodes ont l'avantage d'être simples et faciles à mettre en œuvre.

Les éléments fondamentaux pour la réalisation des régulateurs sont les actions P.I.D (proportionnelle, intégrale, dérivée). Les algorithmes, même les plus performants, sont toujours une combinaison de ces actions.

Nous considérons que la machine est orientée vectoriellement et complètement découplée. Ceci nous permet d'écrire les équations de la machine d'une manière simple et de calculer les coefficients des régulateurs.

Nous nous contentons de régulateurs classiques de type PI dans une structure par boucle imbriquée. Dans ce cas, nous pouvons distinguer deux modes:

- Le mode électrique (mode rapide : boucle interne).
- Le mode mécanique (mode lent : boucle externe).

Pour chacune des boucles de courant, nous proposons de commander la machine par des régulateurs classiques Proportionnel Intégrateur (PI) pour compenser la

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

perturbation du couple résistant au niveau de la réponse de la vitesse de rotation, c'est-à-dire ; ils comportent une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité La relation entre la sortie  $U_r(t)$  et le signal d'erreur  $\epsilon(t)$  est donnée par la relation suivante :

$$U_r(t) = \epsilon(t) + k_i \int_0^t \epsilon(t) dt \quad (4.7)$$

C'est-à-dire :

$$U_r(s) / \epsilon(s) = k_p + k_i / s \quad (4.8)$$

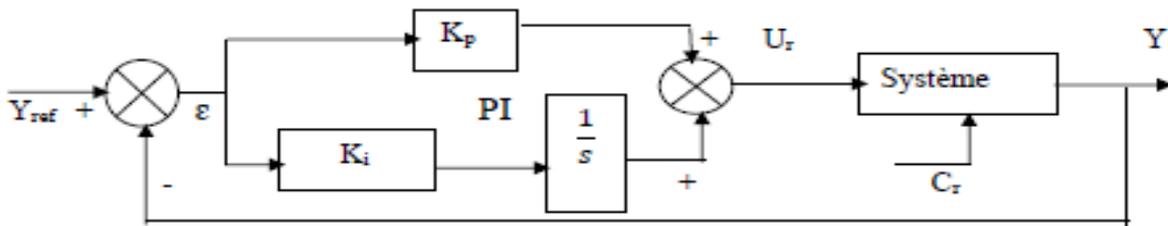
avec :

$k_p$  : Gain proportionnel

$k_i$  : Gain intégral

$T_i$  : Constante de temps d'intégration; telques :  $T_i = 1/k_i$

Le régulateur (PI) est donné par la figure suivante :



**Fig 4. 5: Régulateur PI**

La fonction de transfert sera :

$$U_r/\epsilon = (k_p + k_i/s) \quad (4.9)$$

On peut aussi écrire le régulateur sur la forme suivante :

$$P. I \rightarrow U_r/\epsilon = 1 + sT_1 / sT_2 \quad (4.10)$$

Avec :

$$\begin{cases} k_p = T_1 / T_2 & (a) \\ k_i = 1 / T_2 & (b) \end{cases} \quad (4.11)$$

### 4.4.1 Dimensionnement des régulateurs :

La machine étant découplée selon deux axes (d,q), la régulation sur l'axe "d" est faite par une seule boucle, tandis que la régulation sur l'axe "q" est faite par deux boucles

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

---

en cascades l'une interne pour réguler le courant et l'autre externe pour réguler la vitesse.

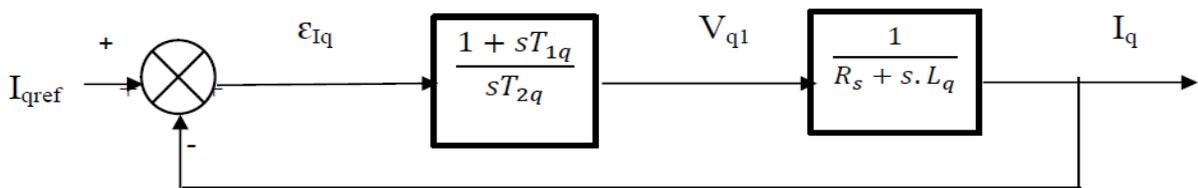
### 4.4.1.1 Régulateur du courant $I_q$ :

La commande de la MSAP s'effectue en contrôlant les courants  $I_d$  et  $I_q$ , le système est composé d'une boucle de régulation de vitesse, qui impose la référence  $I_{qref}$ , le courant  $I_d$  est maintenu nul, la commande est effectuée par les régulateurs (PI) pour avoir l'erreur statique nulle

Sachant que :

$$I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \quad (4.12)$$

Et que la forme générale du régulateur (PI) est :  $\frac{1+sT_1}{sT_2}$  alors on aboutit au schéma de la figure (Fig 4. 6)



**Fig. IV.6 : boucle de régulation de courant  $I_q$**

La fonction de Transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure (IV.6) est :

$$FTBO = \frac{1+sT_{1q}}{sT_{2q}(R_s+sL_q)} \quad (4.13)$$

$$FTBO = \frac{1+sT_{1q}}{sT_{2q}R_s(1+s\frac{L_q}{R_s})} \quad (4.14)$$

Par l'utilisation de la méthode de compensation des pôles, on aura :

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

---

$1 + sT_{1q} = 1 + sL_q/R_s$  ce qui se traduit par la condition :

$$L_q/R_s = T_{1q} = \tau_q \quad (4.15)$$

Avec :

$L_q/R_s$  : Constante de temps électrique

Si on remplace la constante par sa valeur

$$FTBO = 1 / sR_sT_{2q} \quad (4.16)$$

Pour la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) :

$$FTBF = FTBO / (1 + FTBO) \quad (4.17)$$

$FTBF = 1 / (1 + sR_sT_{2q})$  de la forme :

$$(1 / (1 + s\tau_q)) \quad (4.18)$$

Par identification on trouve :

$$\tau_q = R_sT_{2q} \Rightarrow T_{2q} = \tau_q / R_s \quad (4.19)$$

En imposant le temps de référence :

$$T_r = 3\tau_q \text{ (Critère de } \pm 5\%) \quad (4.20)$$

On a :

$$T_{2q} = T_r / 3R_s \quad (4.21)$$

$T_r$ : Temps de réponse imposé

$\tau_q = L_q/R_s$  : Constante de temps électrique de l'axe q de la machine.

On remplace l'équation (IV.19) dans (IV.11b), on obtient

$$K_i = R_s / \tau_q \quad (4.22)$$

Si on remplace l'équation (IV.20) dans (IV.22) et on obtient finalement :

$$\begin{cases} K_{pq}=3L_q / T_r \\ K_{iq}=3R_s / T_r \end{cases} \quad (4.23)$$

#### 4.4.1.2 Régulateur du courant $I_d$ :

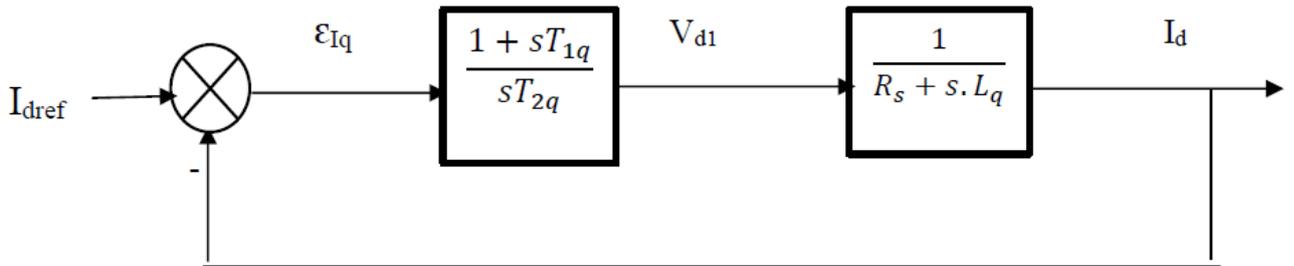


Figure IV.7 : Boucle de régulation du courant  $I_d$

Pour la régulation du courant  $I_d$ , on suit la même procédure utilisée pour la régulation du courant  $I_q$

$$FTBO = \frac{1+sT_{1d}}{sT_{2d}R_s(1+s\frac{L_d}{R_s})} \quad (4.24)$$

$$FTBF = 1 / (1+sR_sT_{2d}) \quad (4.25)$$

$$L_dR_s=T_{1d}=\tau_d \quad (4.26)$$

On impose:

$$T_r=3\tau_d \quad (4.27)$$

$$\tau_d=R_sT_{2d}\Rightarrow T_{2d}=\tau_d / R_s \quad (4.28)$$

On remplace l'équation (IV.27) dans (IV.28) on obtient :

$$T_{2d}=T_r / 3R_s \quad (4.29)$$

$\tau_d=L_d / R_s$  : Constante de temps électrique de l'axe d de la machine.

# Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

## VI.1.2 Régulation de la vitesse :

Le processus à commander est décomposé en deux sous système :

- Sous système du réglage de courant  $I_q$  donc du couple aussi.
- Sous système de la partie mécanique.

La boucle de régulation de la vitesse est représentée par la figure ci-dessous :

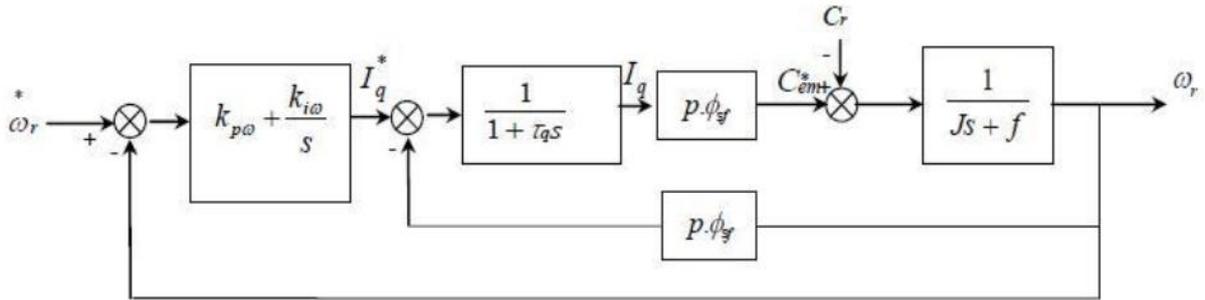


Figure IV.8: Boucle de régulation de vitesse

Le schéma de la figure (IV.8) peut être simplifié par la figure (IV.9)

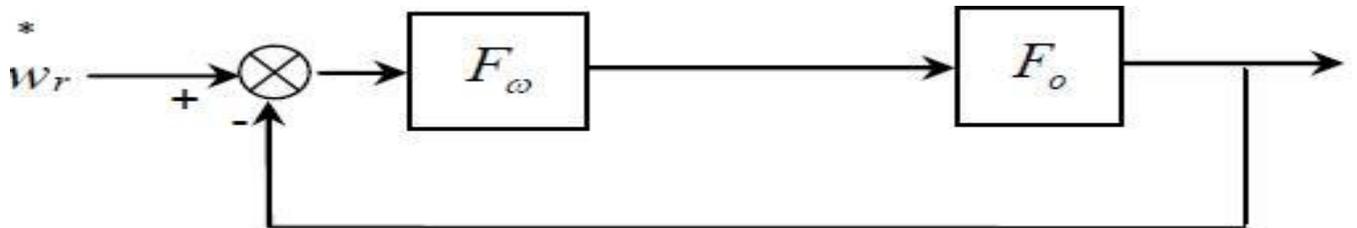


Figure IV.9 Boucle de régulation de vitesse

$F_\omega(s)$  : La fonction de transfert du régulateur de vitesse

$$(s) = K_{p\omega} + K_{i\omega} / s = 1 + sT_{1\omega} / sT_{2\omega} \quad (4.30)$$

Ou :

$$\begin{cases} K_{p\omega} = T_{1\omega} / T_{2\omega} \\ K_{i\omega} = 1 / T_{2\omega} \end{cases} \quad (4.31)$$

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

---

$F_o(s)$  : La fonction de transfert en boucle ouverte

$$F_0(S) = \frac{P\phi_{sf}}{f(1+s\tau_q)+(1+s\tau_m)} \quad (4.32)$$

$\tau_m=T/f$  : Constante mécanique de la machine.

La FTBF est donnée par :

$$FTBF(S) = \frac{F_w(s)F_0(S)}{1+F_w(s)F_w(S)} \quad (4.33)$$

Après les calculs on trouve :

$$FTBF(S) = \frac{P\phi_{sf}(K_{p\omega}S+K_{i\omega})}{J\tau_{qs}^3+(J+f\tau_q)s^2+(P\phi_{sf}K_{p\omega}+f)s+P\phi_{sf}K_{i\omega}} \quad (4.34)$$

Si on néglige  $(J.\tau_q)$ ,  $(f.\tau_q)$  devant  $J$ , le polynôme caractéristique de cette fonction devient :

$$(s)=Js^2+(f+P\phi_{sf}K_{p\omega})s+P\phi_{sf}K_{i\omega} \quad (4.35)$$

En imposant au polynôme caractéristique en boucle fermée deux pôles complexes conjugués :

$S_{1,2} = \rho. (1 \pm j)$  il devient alors :

$$(s)=s^2+2Ps+2 \quad (4.36)$$

Par identification terme à terme entre l'équation (IV.35) et (IV.36) on trouve :

$$\begin{cases} K_{p\omega}=2J-f / P\phi_{sf} \\ K_{i\omega}=2\rho^2 j / P\phi_{sd} \end{cases} \quad (4.37)$$

Où :  $\rho = \xi\omega_n$

$\omega_n$  : Pulsation propre du système

$\xi$  : Facteur d'amortissement

### 4.1.3 Limitation des courants:

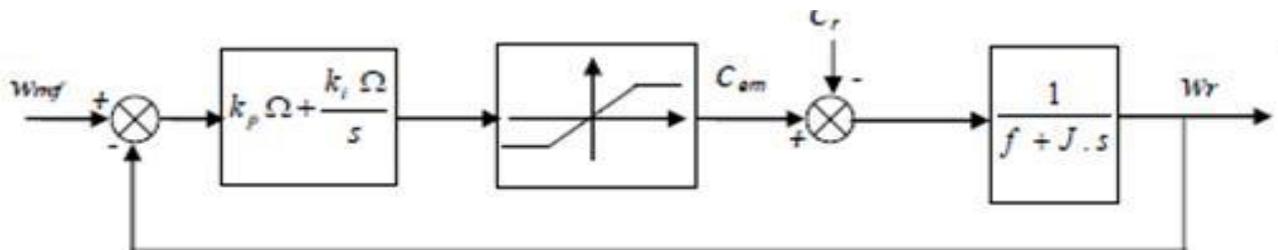
Les organes de commande introduisent des limitations sur la grandeur de commande. Ces limitations peuvent causer des problèmes lors de grands

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

phénomènes transitoires sous formes d'un dépassement élevé de la grandeur à régler, voire même d'un comportement instable du réglage.

La caractéristique non linéaire de la limitation ne permet plus l'application de la théorie linéaire afin d'analyser précisément le comportement dynamique dès que la sortie du régulateur est saturée.

La saturation perturbe également le fonctionnement des régulateurs comportant une action intégrale. En effet, la composante intégrale continue à croître, bien que la sortie du régulateur soit limitée.



**Figure IV.10:** Boucle de régulation de vitesse avec limitation du courant

### IV.5 Résultats de simulations :

Après réalisation du découplage et la synthèse des régulateurs, et afin de tester les performances de la commande vectorielle appliqué à une MSAP du véhicule, nous avons simulé le fonctionnement de l'ensemble onduleur-machine à l'aide de logiciel MATLAB/ Simulink.

L'onduleur de tension est commandé par MLI. La structure de la commande adoptée est celle de la figure (4.1) Les paramètres des régulateurs de vitesse et de courants sont choisis de manière à avoir des réponses rapides, sans dépassement toute en assurant la stabilité du système.

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

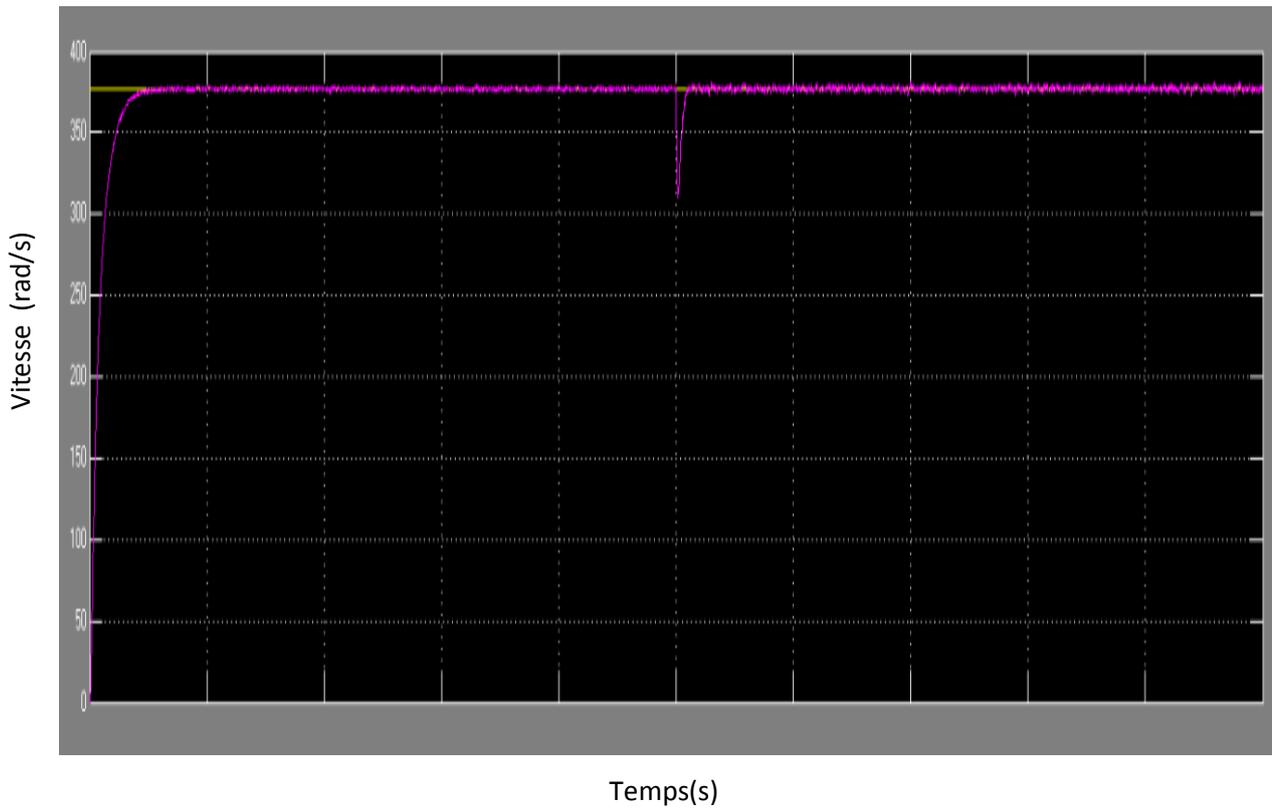


Figure 4.11 Vitesse  $\omega$  (rad/s)

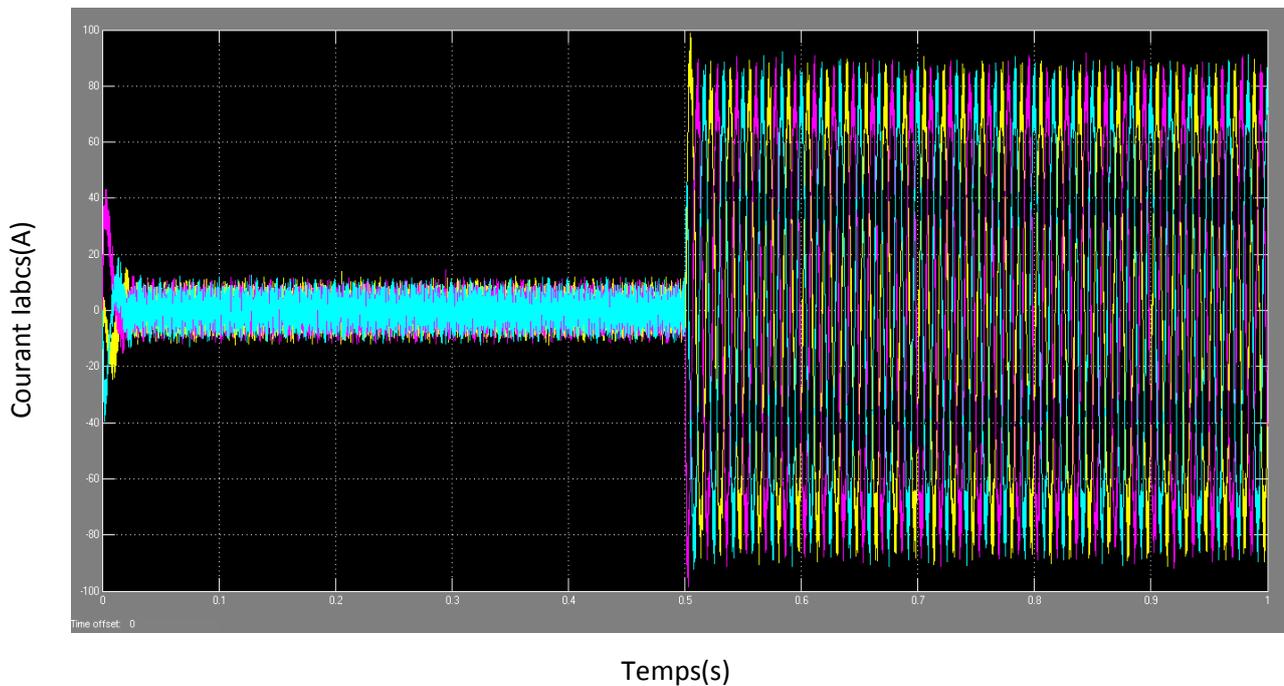
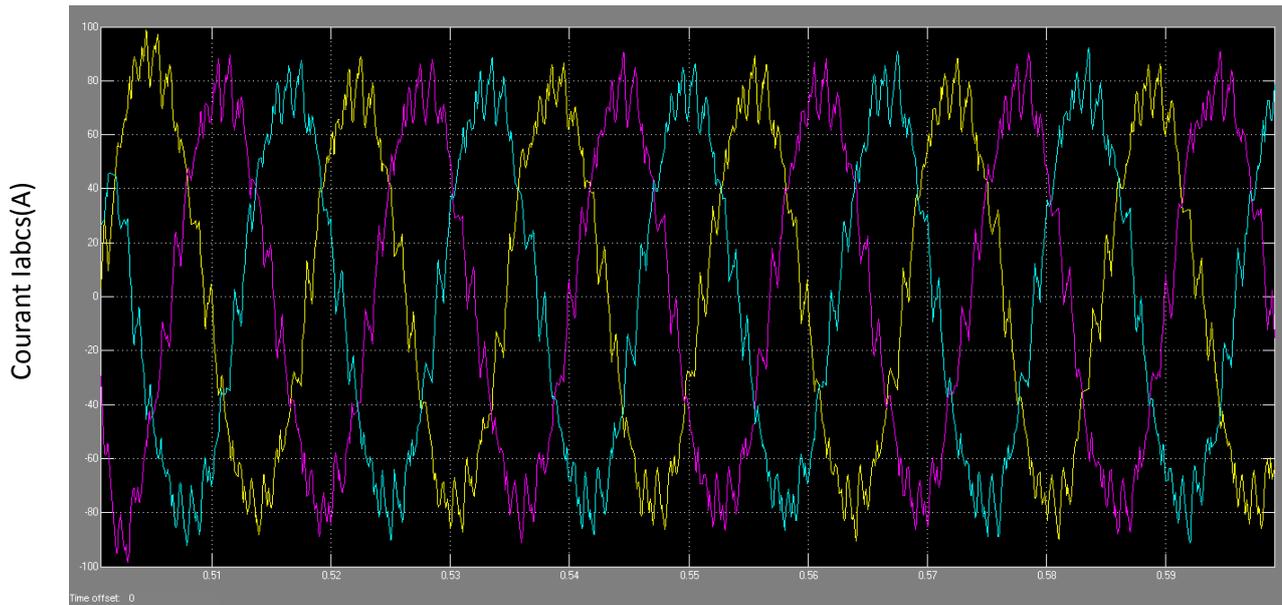
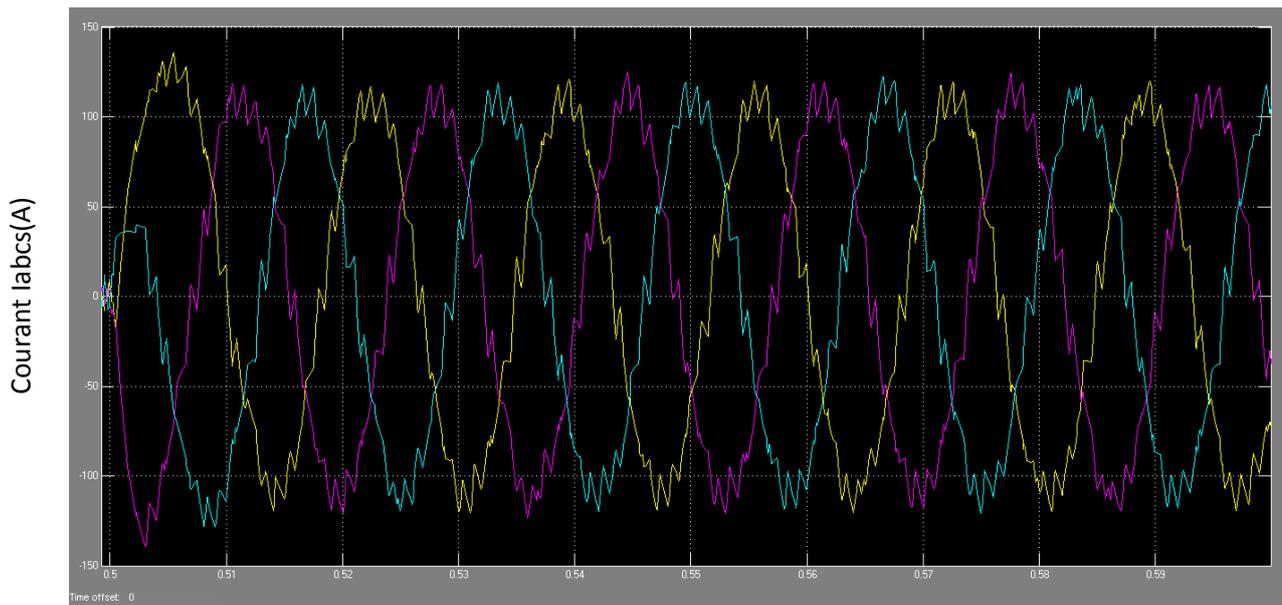


Figure 4.12 Courants statoriques labcs

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série



Temps(s)  
**Avec Cr=140 Nm**



Temps(s)  
**Avec Cr=140 Nm**

**Figure 4.13 Zoom sur les courants statoriques labcs**

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

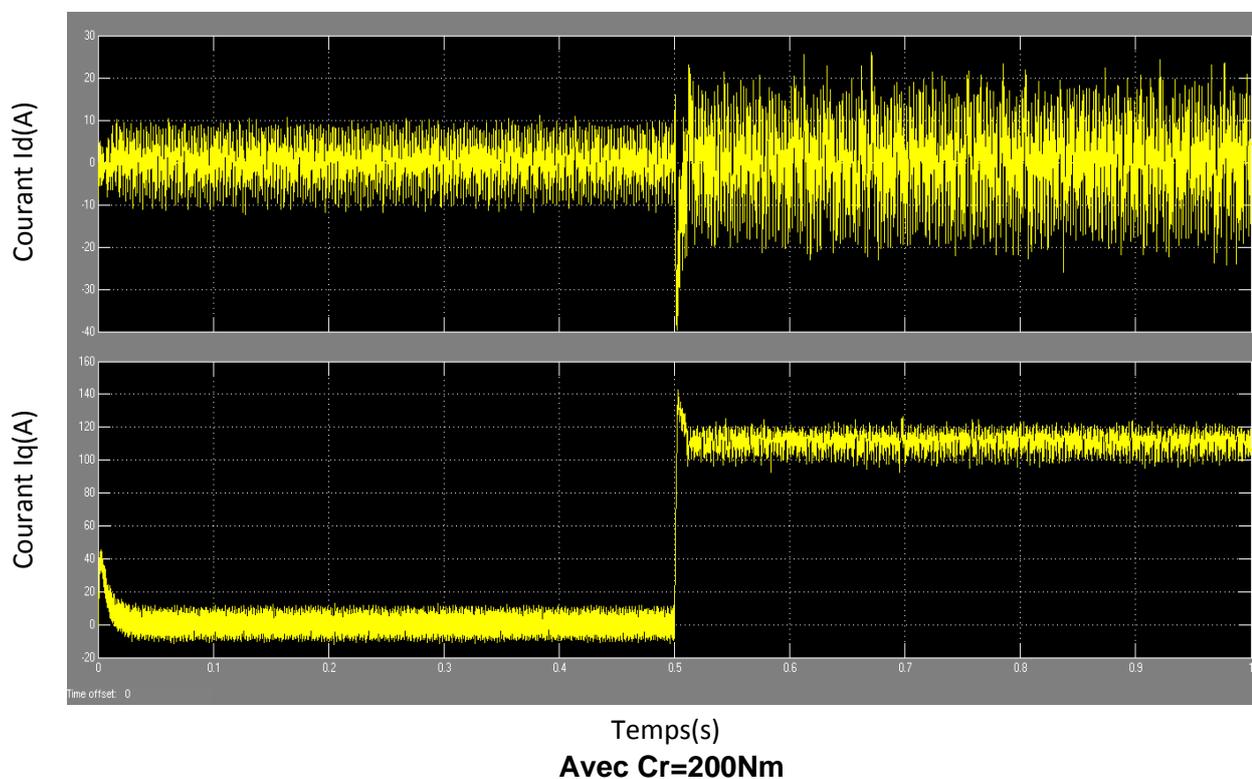
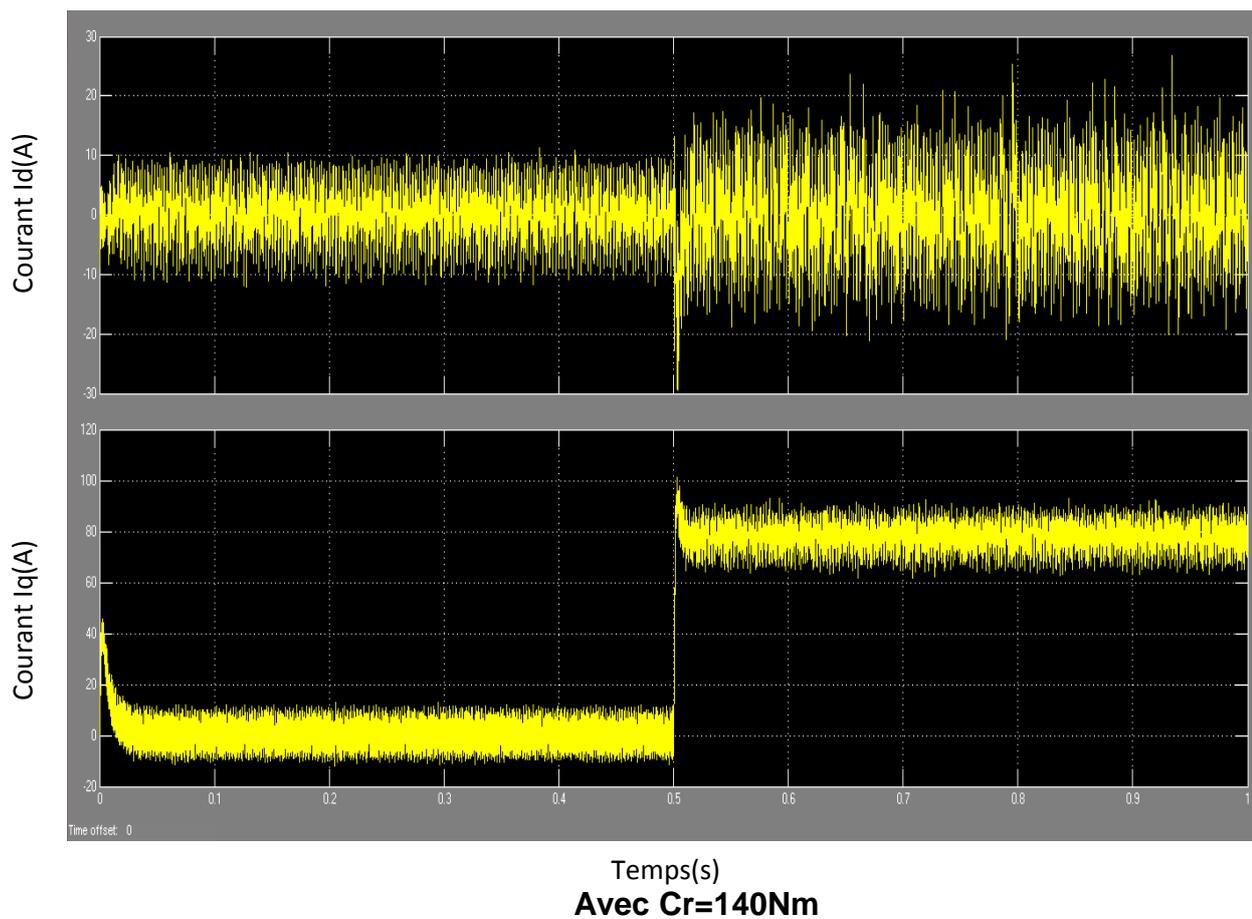
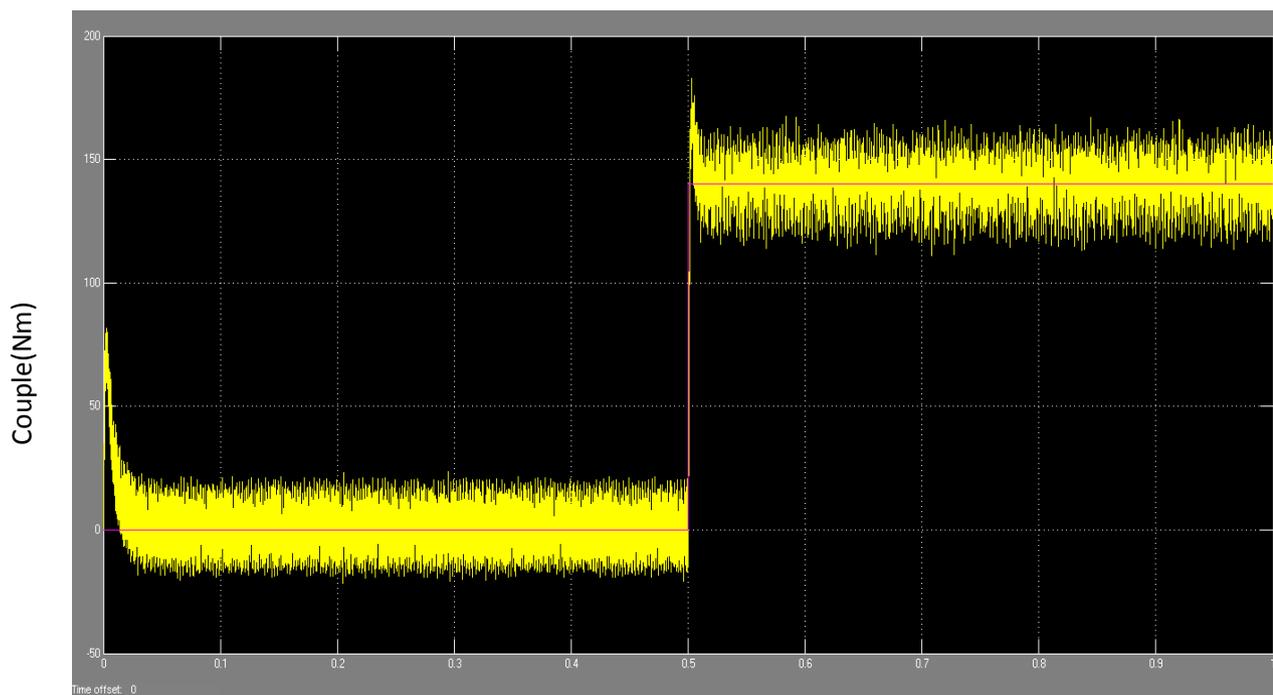
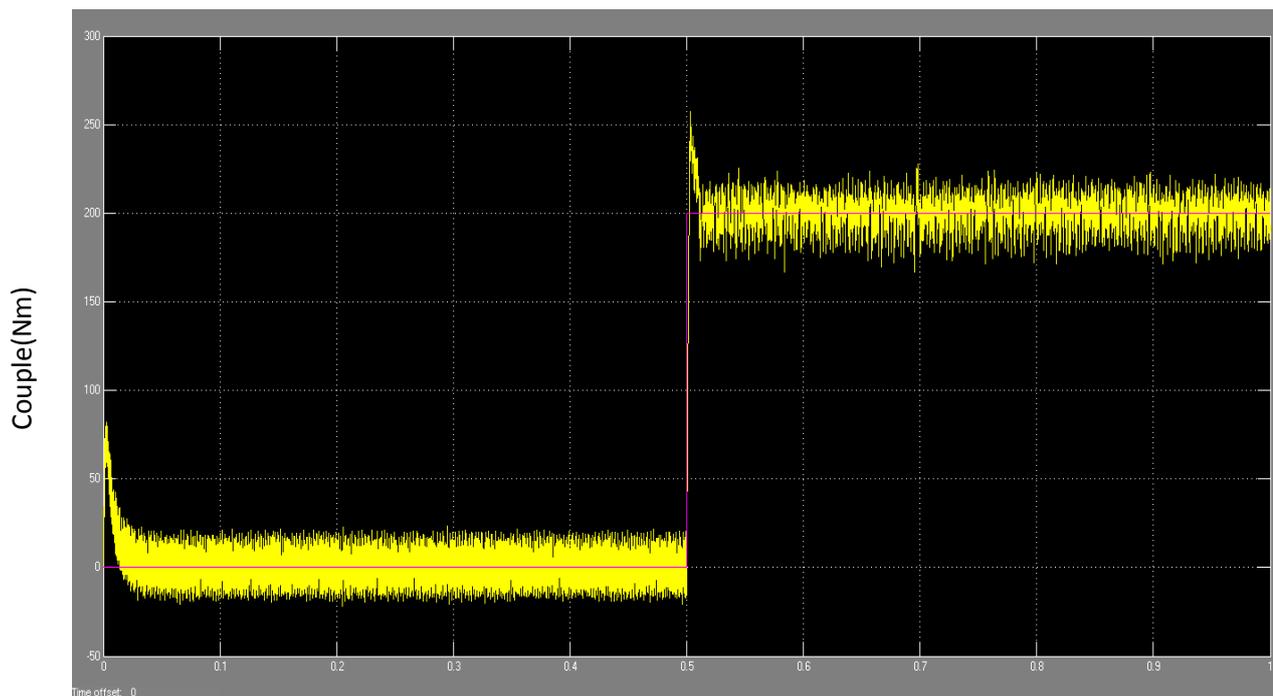


Figure IV.14 Les courants  $I_d$ s (haut)  $I_q$ s (bas)

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série



Temps(s)  
**Cr=140 Nm**



Temps(s)  
**Cr=200 Nm**

Figure IV.15 le couple electromagnetique du moteur

## Chapitre 4 : Application de l'ensemble alternateur-redresseur commandé à un véhicule hybride série

---

### 4.5.1 Interprétation de résultats:

Nous avons illustré les résultats de simulation lors d'un démarrage à vide suivi d'une perturbation du couple de charge à  $t=0.5s$  de 140 Nm en première manche et de 200 Nm en deuxième manche pour une consigne de vitesse de 376 rad/s. La Figure 4.11 Représente la vitesse, on constate que l'allure croit rapidement de 0 à la valeur de référence sans ondulation et qu'elle chute un petit peu au moment de la mise de charge ensuite elle reprend rapidement sa valeur.

La Figure IV.12 et Figure IV.13 Représentent Les courants  $i_{abc}$ . Ils prennent une faible valeur à vide et une grande valeur en charge même avec l'appelle du moteur pour générer le couple nécessaire.

La Figure IV.14 Représente les courants de PARK  $I_d$  et  $I_q$  : La réponse des deux composantes du courant statorique montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la machine ( $I_d=0$ ) avec le couple électromagnétique qui dépend seulement de la composant  $I_q$ .

La Figure IV.15 Représente la courbe du couple électromagnétique mis à 0.5 s du temps de simulation, le couple électromagnétique débute par une valeur de 0 à 180N.m et se stabilise à la valeur du couple résistant (140 N.m) pour le premier cas de simulation et de 0 à 260 Nm pour le deuxième cas de simulation, le courant statorique  $I_q$  est l'image du couple électromagnétique et le courant statorique  $I_d$  est nul ce qui indique que la commande vectorielle est effective.

### 4.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle appliquée à la MSAP, cette stratégie permet le découplage entre le couple et le flux de la machine afin d'assurer une commande souple de sa vitesse.

D'après les résultats obtenus on constate que la commande vectorielle dans le plan de Park de la MSAP alimentée en tension donne des performances et des robustesses remarquables, caractérisées par des faibles temps de réponse, un rejet de perturbation rapide, une erreur statique nulle en régime permanent et un petit dépassement ou oscillations transitoires.

# Introduction Générale

Depuis plusieurs années, les fluctuations du prix du pétrole, sa possible raréfaction et les méfaits des gaz néfastes à l'environnement ont déclenché une partie des récentes études sur notre système de transport. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules.

L'amélioration du rendement du moteur thermique, la réduction des émissions par post-traitement, l'optimisation des stratégies de commande désormais numériques, ont permis d'importants progrès, mais atteignent aujourd'hui leurs limites. Pour répondre au défi d'une réduction encore accrue des consommations et émissions, l'industrie automobile s'est tout d'abord tournée vers les véhicules électriques qui éliminent la combustion à leur bord et ainsi ne produisent plus d'émissions polluantes. Par contre, leur principal handicap réside dans la batterie encore très lourde et très coûteuse. C'est pourquoi, de nouvelles technologies sont à l'étude, en particulier les véhicules électriques hybrides.

Un véhicule hybride est un véhicule disposant de deux sources d'énergie, il combine un système électrique (un ensemble alternateur-redresseur et batterie) avec un moteur à combustion interne ainsi la batterie peut être rechargée à bord du véhicule, ce qui évite l'installation coûteuse de nouvelles infrastructures de rechargement. L'autonomie du véhicule ne dépend alors plus que de la capacité de son réservoir comme dans un véhicule conventionnel.

Notre travail portera sur l'étude de l'ensemble alternateur- redresseur. Cet ensemble doit fournir un courant nécessaire à la charge sous la tension de batterie. L'alternateur est entraîné par le moteur diesel. Le système global aura la structure d'un véhicule hybride série.

Cependant, dans le premier chapitre sera présenté des généralités sur les véhicules hybrides, Ensuite au deuxième chapitre nous allons faire l'étude de la MSAP. Cette machine sera utilisée en mode alternateur dans la chaîne de conversion d'énergie et en mode moteur pour la traction du véhicule.

Dans le troisième chapitre nous allons associer la GSAP au redresseur et batterie et enfin dans le dernier chapitre, une charge, constituée d'un onduleur et d'un moteur à aimant permanent, sera associée à l'ensemble alternateur redresseur et batterie. Ce moteur assure la traction du véhicule à une vitesse appropriée, de ce fait une commande en vitesse du moteur sera aussi étudiée.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale :

Ce travail a concerné l'étude de l'ensemble alternateur redresseur commandé destiné à l'alimentation électrique d'un véhicule hybride série.

Cet ensemble est susceptible à fournir un courant continu, sous la tension de batterie aux différentes charges connectées sur le bus continu et principalement au convertisseur qui alimente le moteur de traction

En ce qui concerne la machine utilisée que ce soit en mode alternateur ou en mode moteur, notre choix s'est porté sur une machine synchrone à aimants permanents. Ce choix résulte d'une part du constat qu'à l'heure actuelle, la supériorité des machines à aimants est prouvée dans les domaines des systèmes embarqués par rapport à d'autres types de machines.

Pour le redresseur, cette structure permet d'imposer toutes les formes de courants dans la machine, elle ne possède pas d'éléments capacitifs et inductifs volumineux et s'adapte à tous les types de commandes.

Pour la batterie nous avons choisi la batterie a plomb a cause de sa marge qui est importante en tension d'entrée (plus ou moins 15%)

Pour la commande vectorielle elle a été choisie afin de contrôler le couple et la vitesse.

## Listes des figures :

1.1	Le véhicule hybride parallèle.....	4
1.2	Le véhicule hybride série.....	6
1.3	Schéma du redresseur à IGBT/diodes antiparallèles ..... de structure tension.	9
1.4	Modèle électrique de la batterie.....	12
2.1	Différentes structures de la roue polaire d'une machine synchrone à ... aimants permanents	16
2.2	Description physique de la MSAP.....	19
2.3	Passage triphasé - biphasé de la MSAP.....	22
2.4	Représente $V_{abc}$ avec $p=4$ $W_d = 3900 \text{tr/min}$ $f=240 \text{Hz}$ $L_d=L_q=2.5 \text{Mh}$ ....	26
2.5	Résultats de la MSAP alimenté par un réseau triphasé équilibré à vide... puis application d'un couple de charge $C_r = 140 \text{ N.m}$ à $t = [0.5 \ 1] \text{ s}$ .	28
3.1	Schéma du redresseur MLI triphasé de structure de tension.....	31
3.2	Hystérésis modulée.....	33
3.3	Modulateur MLI à porteuse triangulaire.....	33
3.4	Pont redresseur.....	34
3.5	Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI...	34
3.6	Schéma fonctionnel du redresseur dans les coordonnées..... triphases normales	37
3.7	Schéma synoptique de puissance du redresseur.....	37
3.8	Schéma synoptique du redresseur contrôlé en tension.....	38
3.9	Tension $V_{dc}$ (v) avec $C=1.5 \text{mF}$ .....	40
3.10	Courant $I_{dc}$ (A) fournit a la batterie avec $L=0.0009 \text{H}$ .....	41
3.11	Courant et l'état de charge de la batterie (A).....	41

4.1	Machine à Courant Continu.....	44
4.2	Schéma global de la commande vectorielle directe.....	45
4.3	Reconstitution des tensions $v_d$ et $v_q$ .....	47
4.4	Principe de découplage par compensation.....	48
4.5	Régulateur PI.....	49
4.6	Boucle de régulation de courant $I_q$ .....	51
4.7	Boucle de régulation du courant $I_d$ .....	52
4.8	Boucle de régulation de vitesse.....	53
4.9	Boucle de régulation de vitesse.....	53
4.10	Boucle de régulation de vitesse avec limitation du courant .....	55
4.11	Vitesses $W$ rad/s.....	56
4.12	Courants statoriques $i_{abcs}$ .....	56
4.13	Zoom sur les courants statoriques $i_{abcs}$ .....	57
4.14	Les courants $I_{ds}$ et $I_{qs}$ .....	58
4.15	Couple électromagnétique du moteur.....	59

## **Liste des tableaux :**

III.1: Tensions simples en fonction des différents ordres de commande.

## **Abréviation et Notation:**

VH : Véhicule hybride

VE : Véhicule électrique

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

GTO : Gate Turn-Off Thyristor

SOC : State of charge

CON : Convertisseur

MSAP : Machine synchrone à aimant permanent

GSAP : Génératrice synchrone à aimant permanent

MCC : Machine à courant continu

CC : Courant continu

DC : Direct Current

AC : Alternative Current

FOC : Field oriented control

MLI : Modulation par largeur d'impulsion

MLIST : Modulation par largeur d'impulsion sinus-triangulaire

STPWM: Sinus Triangular Pulse Width Modulation

P : Correcteur Proportionnel

PI : Correcteur Proportionnel intégrale

P.I.D : Action Proportionnel intégrale dérivée

f.é.m : Force électromotrice

FTBO : Fonction de transfert en boucle ouverte

FTBF : Fonction de transfert en boucle fermée

Rad : radian

S : Seconde

Nm : Newton mètre

A: Ampere

V: Volte

W: Watt

F: Farad

H: Henri

**Annexe :**

<b>Paramètres d'alternateur</b>	<b>Description</b>
$\omega_d=408 \text{ rad/s}$	Vitesse du moteur diesel
$L_{da}=0.0025 \text{ H}$	L'inductance direct
$L_{qa}=0.0025 \text{ H}$	L'inductance en quadrature
$R_a=1.4 \Omega$	Resistance
$\phi_{iea}=0.38 \text{ Wb}$	Flux de l'aimant de la GSAP
$p_a=4$	Nombre de paires de pole de l'alternateur

<b>Paramètres du redresseur</b>	<b>Description</b>
$V_{dref}=450 \text{ V}$	Tension de référence
$c=0.005 \text{ F}$	Condensateur
$L=0.0003 \text{ H}$	L'inductance
$R_v=3.4 \Omega$	Resistance variable

<b>Paramètres de la batterie</b>	<b>Description</b>
Un=450 V	Tension nominal
Rbat=0.46 $\Omega$	Resistance
Q0=100 F	Capacité
E0=455 V	Tension a vide

Paramètres de la MSAP avec commande vectorielle	Description
j=0.00176	Moment d'inertie
p=3	Nombre de paire de pole
wref=377 tr/min	Vitesse de référence
Cr=140 N.m	Couple résistant
Ld=0.0025 H	Inductance direct
Lq=0.0025 H	Inductance en quadrature
R=1.4 $\Omega$	Resistance
f=0.00038818 Hz	Fréquence
P <sub>n</sub> =60kw	La puissance nominale
$\eta$ =0.96	Rendement

## Référence bibliographique :

[1] M. NERI «Les batteries de puissance et leurs applications» 4<sup>ème</sup> Conférence C-VELEC'99. 3-4 nov. 1999 Grenoble France, pp 42-49.

[2] F. BADIN «Contribution à la modélisation des transmissions hybrides thermiques électriques séries. Réalisation d'un bilan énergie-pollution en usage réel». Mémoire de thèse de Doctorat de l'Université de Savoie. Année 1997.

[3] J. BONNAL, G. SEGUIER «Entraînements électriques à vitesse variable », VOL2, Editions Lavoisier TEC &DOC, 1998, Paris.

[4] G. SEGUIER «Les convertisseurs de l'électronique de puissance », VOL 4, Conversion Continu-alternatif, Editions Lavoisier TEC &DOC, Paris.

[5] Piles et accumulateurs, Encyclopédie UNIVERSALIS, VOL 14, pp. 723-725.

[6] : K.Benmansour "Réalisation d'un banc d'essai pour la commande et l'observation des convertisseurs multicellulaires", Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, France, 2009.

[7] : D.Lahouel "Commande non linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents", Mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, 2009.

[8] : A.Benbrahim "Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents", Mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, 2009.

[9] : A.Titaouine, F.Benchabane, K.Yahia "Commande d'une machine synchrone à aimants permanents et estimation de ses paramètres en utilisant le filtre de Kalman étendu", Courrier du Savoir N°07, pp.37-43, Décembre 2006.

[10] : K.Azeddine "Etude d'une commande non- linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents", Ph, Québec, Canada, 2000.

[11] : M.Sebaa "Etude et comparative entre les différentes méthodes de commande d'une machine synchrone à aimants permanents ", Mémoire de magister, ENSET-Oran, 2003.

[12] : A.Ameur "Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants", Mémoire de magister, Batna, 2005.

[13] : L.Ghaouti "Commande robuste d'un moteur synchrone à aimants permanents sans capteur de vitesse", Mémoire de magister, USTO, 2007.

[14] : A.Maasoum "Commande à la commande singulièrement perturbé d'une machine synchrone à aimants permanents (Commande à structure variable CSV) Euro-Floue", Thèse de doctorat Es-science, Sidi Bel-Abbas, Algérie, 2007.

[15] : F.Benchabane "Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering", Mémoire de magister, Université mohamed khider de Biskra, 2005.Algérie,

[16]: J.Chiasson "Modeling and High-Performance Control of Electrical Machines", Wiley-Interscience a John Wiley and Sons, INC Publication, 2005.

[17] : GASSAB Samir «Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne» mémoire de magister de l'Université Ferhat Abbas – Sétif, décembre 2011.

[18] A. MASSOUM "Contribution à la Commande Singulièrement Perturbée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents" ; Thèse de Doctorat, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2007.

[19] A. FONSECA, A-L. BUI-VAN, C. CHILLET, J-P. YONNET, P. LANGRY  
«Comparaison de deux machines à aimants permanents pour la traction électrique ». 4<sup>ème</sup> Conférence C-VELEC'99. 3-4 nov. 1999 Grenoble France, pp 72-79.

[20] M. Malinowski, "Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers". *Phd Thesis*, Faculty of Electrical Engineering Institute of Control and Industrial Electronics, 2001.

[21]M. SEBBA, A. CHAKER, Y. MESLEM, S. HASSAINE "Commande en Vitesse du Moteur Synchrone à Aimants Permanents Doté d'un Observateur de Luenberger"; 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing, CIP'2007, Tiaret, 03-04 Nov. 2007.