



[WWW](http://www.fst.univ-mst.dz)

وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2021

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Filière : *Electronique*

Spécialité : *Electronique des Systèmes Embarqués*

Par :

MECHEHOUD Nouredine

DELMI Ibrahim

Etude et simulation du système de commande d'un moteur asynchrone triphasé pour voiture électrique avec alimentation hybride batterie /photovoltaïque

Soutenu le : / / 2021 devant le jury composé de :

Président :	DAOUD Mohamed	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	DJELTI Benbella	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	FATAH Abdelkader	MCAss	Université de Mostaganem
	HADRI Baghdad	Prof	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

En premier lieu nous tenons à remercier dieu le tout puissant qui nous a guidé dans le chemin de la science et du savoir et qui a donné lieu à la réalisation de ce modeste travail. Louange à lui qui nous a donné la force, la santé, la volonté et la patience pour faire face à toutes les difficultés rencontrées.

Nous tenons à remercier notre promoteur Monsieur Abdelkader FATAH pour avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période de recherche et pour sa constante disponibilité à notre égard et pour sa précieuse aide dans le domaine de la modélisation et de la simulation, ce qui nous a permis de mener à bien ce travail. Sans toutefois oublier Monsieur Baghdad HADRI qui en sa qualité de co-encadreur nous a prodigué de précieux conseils.

Nos vifs remerciements au président du jury et aux membres examinateurs qui nous feront l'honneur de participer à la séance de soutenance de ce projet de fin d'études.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des enseignants du département de génie électrique et les collègues de notre promotion qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :
La mémoire de mes chers parents,
Ma femme et mes enfants,
Mes sœurs et mes frères,
Toute ma famille,
Tous mes amis,
Tous les enseignants qui nous ont aidés de
près ou de loin.*

Noureddine MECHEHOUD

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :
Mes chers parents,
Mes sœurs et mes frères,
Toute ma famille,
Tous mes amis,
Tous les enseignants qui nous ont aidés de
près ou de loin.

Ibrahim DELMI

Résumé

Le véhicule électrique est l'une des solutions préconisées par les constructeurs automobiles et les organismes de recherche pour remplacer peu à peu les véhicules classiques. Le devenir de l'automobile moins polluant dans les prochaines années est donc un sujet de recherche d'actualité. Dans cette perspective, nous présentons dans ce mémoire une étude de modélisation et de simulation du système de commande d'une machine asynchrone triphasée utilisée dans la traction d'un véhicule électrique. Les différentes méthodes appliquées à la MAS telles que la commande à MLI et la commande vectorielle utilisant des régulateurs PI présentent certains inconvénients tels que la sensibilité aux variations de la charge mécanique et l'utilisation de capteurs mécaniques (vitesse et position du rotor). Pour améliorer les performances du système de commande, nous avons appliqué une technique de réglage robuste qui est la méthode de commande directe du couple (DTC). Cette dernière est caractérisée par une précision dans le cas d'une poursuite d'un profil de la vitesse à l'aide d'une estimation du flux statorique et du couple électromagnétique. Les estimations sont faites à partir de mesures sur les tensions et les courants statoriques et par conséquent les capteurs mécaniques au niveau du rotor sont totalement éliminés. Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité et les performances de la commande proposée. Pour donner une plus grande autonomie à la batterie de traction, nous proposons de compenser une partie de l'énergie consommée à l'aide d'un système photovoltaïque intégré au véhicule.

Mots clé : Véhicule électrique ; Machine asynchrone ; Commande DTC ; Estimation flux et couple ; Système photovoltaïque.

Abstract

The electric vehicle is one of the solutions recommended by car manufacturers and research organizations to gradually replace conventional vehicles. The future of the less polluting automobile in the coming years is therefore a topical research subject. In this perspective, we present in this thesis a modeling and simulation study of the control system of a three-phase asynchronous machine used in the traction of an electric vehicle. The different methods applied to MAS such as PWM control and vector control using PI regulators have certain drawbacks such as sensitivity to variations in mechanical load and the use of mechanical sensors (rotor speed and position).

To improve the performance of the control system, we have applied a robust tuning technique which is the Direct Torque Control (DTC) method. The latter is characterized by accuracy in the case of tracking a speed profile using stator flux and electromagnetic torque estimation. Estimates are made from measurements on stator voltages and currents and therefore mechanical sensors at the rotor are completely eliminated. The simulation results obtained showed the efficiency and performance of the proposed control. To give the traction battery greater autonomy, we propose to offset part of the energy consumed using a photovoltaic system integrated into the vehicle.

Keywords: Electric vehicle; Asynchronous machine; DTC command; Flux and torque estimation; Photovoltaic system.

ملخص

السيارة الكهربائية هي أحد الحلول التي أوصى بها مصنعو السيارات والمؤسسات البحثية لاستبدال المركبات التقليدية تدريجياً. وبالتالي فإن مستقبل السيارات الأقل تلويثاً في السنوات القادمة هو موضوع بحث موضوعي. من هذا المنظور نقدم في هذه الأطروحة دراسة نمذجة ومحاكاة لنظام التحكم لآلة غير متزامنة ثلاثية الطور تستخدم في تحريك المركبة الكهربائية. الأساليب المختلفة المطبقة على الآلة الغير متزامنة ثلاثية الطور مثل التحكم بواسطة PWM والتحكم الشعاعي باستخدام منظمات PI لها عيوب معينة مثل الحساسية للتغيرات في الحمل الميكانيكي واستخدام الملتقطات الميكانيكية (سرعة الدوار وموقعه). لتحسين أداء نظام التحكم ، قمنا بتطبيق تقنية ضبط قوية وهي طريقة التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC). تتميز هذه الأخيرة بالدقة في حالة تتبع منحى تغيرات السرعة باستخدام تقديرات للتدفق الناتج عن الجزء الثابت و للعزم الكهرومغناطيسي. يتم إجراء التقديرات عن طريق قياسات لتوترات والتيارات تغذية الجزء الثابت للآلة ، وبالتالي يتم التخلص تماماً من الملتقطات الميكانيكية في الجزء المتحرك. أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها نجاعة و فعالية طريقة التحكم المقترحة. لمنح بطارية التحريك قدرًا أكبر من الاستقلالية ، نقترح تعويض جزء من الطاقة المستهلكة باستخدام نظام كهروضوئي مدمج في السيارة.

الكلمات الرئيسية: سيارة كهربائية؛ آلة غير متزامنة ؛ تحكم DTC ؛ تقدير التدفق والعزم ؛ نظام كهروضوئي.

Sommaire

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des symboles et abréviations.....	III
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur la voiture électrique

I.1. Introduction	3
I.2. Le véhicule électrique	3
I.3. Actualités des Véhicules Electriques	3
I.4. Classifications des véhicules électriques	4
I.4.1. Véhicule tout électrique	4
I.4.2. Véhicule électrique à batteries rechargeables par prise de courant.....	4
I.4.3. Véhicule électrique à alimentation par pile à combustible.....	4
I.4.4. Véhicules hybrides	5
I.4.4.1. Véhicules hybrides série	5
I.4.4.2. Véhicule hybride parallèle	6
I.4.4.3. Véhicule hybride combiné	6
I.5. Architecture d'un véhicule électrique	7
I.5.1. Stockage de l'énergie (Batterie de traction).....	7
I.6. Les convertisseurs de puissance	8
I.6.1. Convertisseur DC/DC (hacheur).....	8
I.6.2. Onduleur triphasé.....	9
I.6.3. Recharge de la batterie.	9
I.6.3.1. Courant alternatif (maison et petits chargeurs)	9
I.6.3.2. Courant continu : super-chargeurs haute capacité	10
I.7. Moteur d'entraînement	10
I.8. Les systèmes embarqués dans l'automobile	10
I.8.1. Composition d'un système embarqué	11

<i>1.8.1.1. Le Calculateur</i>	11
<i>1.8.1.2. Les actionneurs</i>	12
<i>1.8.1.3. Les Capteurs</i>	12

Chapitre II : Etude de la chaine de traction du VE

<i>II.1. Introduction</i>	13
<i>II.2. Description de la chaine de traction</i>	13
<i>II.3. Moteur électrique d'entraînement</i>	14
<i>II.3.1. Types de moteur pour véhicule électrique</i>	14
<i>II.3.1.1. Moteur à Courant Continu</i>	14
<i>II.3.1.1.1. MCC à excitation séparé</i>	16
<i>II.3.1.1.2. MCC à Aimant Permanent</i>	16
<i>II.3.1.2. Moteur asynchrone</i>	17
<i>II.3.1.3. Moteur Synchrone</i>	17
<i>II.3.1.3.1. Moteur Synchrone à Aimant Permanent</i>	17
<i>II.3.1.3.2. Moteur Synchrone à rotor bobiné</i>	17
<i>II.3.1.4. Moteur à réluctance variable</i>	17
<i>II.4. Comparaison entre les différents types de moteurs</i>	18
<i>II.4.1. Moteur Asynchrone triphasé</i>	19
<i>II.4.1.1. Introduction</i>	19
<i>II.4.2. Constitution de la machine asynchrone</i>	20
<i>II.4.3. Principe de fonctionnement du MAS triphasé</i>	21
<i>II.5. Sources d'énergie dans les voitures électriques</i>	22
<i>II.5.1. Batterie de traction</i>	22
<i>II.5.1.1. Types de batteries</i>	23
<i>II.5.2. Batterie de servitude</i>	24
<i>II.5.3. Alimentation Photovoltaïque</i>	25
<i>II.5.4. Recharge de la batterie</i>	26

Chapitre III : Etude et modélisation de la chaîne de puissance du VE

<i>III.1. Introduction</i>	<i>28</i>
<i>III.2. Système de puissance du VE</i>	<i>28</i>
<i>III.3. Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs)</i>	<i>28</i>
<i>III.3.1. La technique de découpage</i>	<i>29</i>
<i>III.3.2. Rapport cyclique des impulsions de commande</i>	<i>29</i>
<i>III.3.3. Types de convertisseurs DC-DC</i>	<i>30</i>
<i>III.3.3.1. Hacheur dévolteur (Buck)</i>	<i>30</i>
<i>III.3.3.2. Hacheur survolteur (Boost)</i>	<i>32</i>
<i>III.3.3.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)</i>	<i>33</i>
<i>III.4. Onduleur triphasé</i>	<i>34</i>
<i>III.4.2. Structure et éléments de base des onduleurs</i>	<i>34</i>
<i>III.4.3. Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tensions et de sa commande MLI</i>	<i>36</i>
<i>III.4.3.1. Modélisation de la commande MLI</i>	<i>37</i>
<i>III.4.3.2. Commande MLI sinus – triangle (MLIST)</i>	<i>38</i>
<i>III.6. Commande de la machine asynchrone</i>	<i>40</i>
<i>III.6.1. Commande scalaire</i>	<i>41</i>
<i>III.6.2. Commande vectorielle à flux orienté (FOC)</i>	<i>42</i>
<i>III.6.3. Commande directe du couple (DTC)</i>	<i>43</i>
<i>III.6.2. Principe de la commande direct du couple DTC</i>	<i>43</i>
<i>III.6.3. Contrôle de flux et de couple</i>	<i>44</i>
<i>III.6.4. Stratégie de commande directe du couple (DTC)</i>	<i>46</i>
<i>III.5. Etude et modélisation du système PV</i>	<i>47</i>
<i>III.5.1. Définition de la cellule PV</i>	<i>47</i>
<i>III.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque</i>	<i>47</i>
<i>III.5.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque:</i>	<i>48</i>
<i>III.5.4. La commande MPPT</i>	<i>49</i>
<i>III.5.5. Méthode de perturbation et observation (P&O)</i>	<i>49</i>

<i>III.5. 6. Modélisation des cellules PV</i>	<i>50</i>
<i>III.6. Conclusion</i>	<i>52</i>

Chapitre IV : Résultats et interprétations

<i>IV.1. introduction.....</i>	<i>53</i>
<i>IV.2 Simulations du convertisseur DC/DC</i>	<i>53</i>
<i>IV.2.1.Résultats de la simulation.....</i>	<i>55</i>
<i>IV.2.1.1.Hacheur en régime dévolteur (Buck)</i>	<i>55</i>
<i>IV.2.1.1 Interprétation des résultats de simulation</i>	<i>55</i>
<i>IV.2.1.2. Hacheur en régime survolteur (Boost)</i>	<i>56</i>
<i>IV.2.1.2.1Interprétation des résultats de simulation</i>	<i>56</i>
<i>IV.3. Simulation de l'onduleur triphasé.....</i>	<i>57</i>
<i>IV.3.1.Simulation de l'onduleur triphasé avec commande sinus-triangle.....</i>	<i>57</i>
<i>IV.3.1.1. Résultat de la simulation</i>	<i>59</i>
<i>IV.3.1.2. Interprétation des résultats de simulation.....</i>	<i>60</i>
<i>IV.4 Simulation de la technique DTC du MAS triphasé</i>	<i>61</i>
<i>IV.4.1. schéma de simulation</i>	<i>62</i>
<i>IV.4 .2. Résultats de simulation</i>	<i>62</i>
<i>IV.4 .2.1. Couple constant</i>	<i>63</i>
<i>IV.4.2 .1.1 Interprétation des résultats</i>	<i>63</i>
<i>IV.4 .2.2. Couple variable</i>	<i>65</i>
<i>IV.4.2 .2.1 Interprétation des résultats.....</i>	<i>66</i>
<i>IV.5 Simulation du système PV comme alimentation auxiliaire</i>	<i>67</i>
<i>IV.5.1. Schéma de simulation.....</i>	<i>67</i>
<i>IV.5.2. Caractéristiques du panneau solaire utilisé</i>	<i>68</i>
<i>IV.5.3. Caractéristiques de la batterie</i>	<i>69</i>
<i>IV.5.4. Résultats de simulation du système photovoltaïque</i>	<i>70</i>
<i>IV.5.5. Interprétations des résultats</i>	<i>72</i>
<i>Conclusion générale</i>	<i>75</i>

Liste des figures

<i>Figure (I.1) : voiture électrique à PAC</i>	5
<i>Figure (I-2) : Véhicule hybride série</i>	6
<i>Figure (I-3) : Véhicule hybride parallèle</i>	6
<i>Figure(I-4) : Véhicule hybride combiné</i>	7
<i>Figure (I-5) : Architecture et composants de la voiture électrique</i>	7
<i>Figure (I-6) : différentes fonctions de la voiture moderne</i>	11
<i>Figure (I-7) : Illustration d'un calculateur moteur</i>	12
<i>Figure (II-1) : Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un VE</i>	13
<i>Figure (II-2) : moteur électrique d'une VE</i>	14
<i>Figure (II-3) : moteur à courant continu</i>	15
<i>Figure (II-4) :moteur à courant continu à inducteur bobiné</i>	15
<i>Figure(II-5) : type de moteur à courant continu</i>	16
<i>Figure (II-6) : Moteur à courant continu à aimant permanent</i>	16
<i>Figure (II.7) : Moteur asynchrone triphasé à rotor en court circuit</i>	19
<i>Figure (II.8) : vue éclatée d'une MAS</i>	20
<i>Figure (II.9) : le Stator d'un MAS</i>	20
<i>Figure (II.10) : le Rotor du MAS (a- Rotor en CC b- Rotor bobiné)</i>	21
<i>Figure (II.11) : champ tournant</i>	22
<i>Figure (II.12) : Batterie de servitude 12V</i>	24
<i>Figure (II.13) : champ PV installé sur le toit de la VE</i>	25
<i>Figure (III.1) : Système de puissance d'un VE</i>	28
<i>Figure(III.2) Schéma de principe d'une alimentation à découpage</i>	29
<i>Figure (III.3) Symbole de transistor MOSFET</i>	29
<i>Figure (III.4) : temps de passage et de blocage d'un commutateur</i>	30
<i>Figure (III.5) schéma de principe d'un hacheur dévolteur</i>	30
<i>Figure (III.6) : schéma équivalent d'un hacheur buck</i>	31
<i>Figure (III.7) : Schéma de principe d'un hacheur Boost</i>	32
<i>Figure (III.8) : schémas équivalents du hacheur survolteur</i>	32
<i>Figure(III.9) : Schéma de principe d'un hacheur Buck-Boost</i>	33
<i>Figure (III.10) : Schéma équivalent du hacheur Buck-Boost</i>	34
<i>Figure (III.11) : Schéma d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux</i>	35
<i>Figure (III.12) : période de commutation d'un interrupteur</i>	35
<i>Figure (III.13) : Principe de la commande MLIST</i>	38

<i>Figure (III.14) : Technique de commande de l'onduleur MLIST.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure (III.15) :Commande en vitesse du VE</i>	<i>40</i>
<i>Figure (III.16) : Schéma structurel DTC appliquée à une MAS</i>	<i>44</i>
<i>Figure (III.17) : Evolution du vecteur flux dans le plan $\alpha\beta$.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure (III.18) : Schéma synoptique de la commande DTC.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure (III.19) : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure (III.20) :Schéma équivalent de la cellule solaire</i>	<i>50</i>
<i>Figure (IV.1) : Schéma de simulation d'un hacheur Buck-Boost avec boucle de régulation PI.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure (IV.2) : les tensions d'entrée et de sortie en régime abaisseur.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure (IV.3) : les tensions d'entrée et de sortie en régime élévateur.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure (IV.4) Schéma de simulation de l'onduleur triphasé</i>	<i>58</i>
<i>Figure(IV.5) : Graphe des tensions composées $U_{abc}(t)$ avant filtrage.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure (IV.6) Graphe des tensions simples $V_{abc}(t)$ avant filtrage.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure(IV.7) : Graphe des tensions composées $U_{abc}(t)$ après filtrage.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure (IV.8) : Graphe des tensions simples $V_{abc}(t)$ après filtrage.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure (IV.9) : Graphe des courants triphasés $I_{abc}(t)$ après filtrage.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure (IV.10) : Résultats de simulation de la DTC pour un couple de référence constant</i>	<i>63</i>
<i>Figure (IV.11) : Profil du couple de commande variable.</i>	<i>64</i>
<i>Figure (IV.12) : Résultats de simulation de la DTC pour un couple de référence Variable</i>	<i>66</i>
<i>Figure(IV.13) : Caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque</i>	<i>69</i>
<i>Figure(IV.14) : Caractéristiques de décharge de la batterie</i>	<i>70</i>
<i>Figure(IV.15) :Résultats de simulation du système PV en régime de charge sur la batterie de servitude.....</i>	<i>72</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau (I.1): tableau comparatif des différents modèles de VEs</i>	<i>03</i>
<i>Tableau (II.1): Avantages et Inconvénients des différents moteurs électriques de motorisation d'un VE</i>	<i>18</i>
<i>Tableau(II.2) : vitesse de synchronisme en fonction de nombre de paires de Pôles</i>	<i>21</i>
<i>Tableau(II.3) : comparaison de différents types de batterie</i>	<i>24</i>
<i>Tableau(II.4): durée et puissance de recharge de VE</i>	<i>27</i>
<i>Tableau(IV.1): Paramètres du convertisseur DC/DC.....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau (IV.2) : paramètres des composants de l'onduleur ST</i>	<i>58</i>
<i>Tableau (IV.3) : paramètres du MAS simulé</i>	<i>61</i>
<i>Tableau (IV.4) : Caractéristiques du panneau solaire.....</i>	<i>68</i>
<i>Tableau IV.5 : Caractéristiques de la batterie de servitude.....</i>	<i>69</i>

Liste des abréviations

VE : Véhicule électrique ou Voiture électrique .
PAC : Pile à combustible.
VH : Véhicule Hybride .
VHS : Véhicule Hybride Série .
VHP : Véhicule Hybride Parallèle .
VHSP : Véhicule Hybride Mixte .
DC : courant continu .
AC : courant alternatif .
MCC : Moteur à courant continu
MI : Moteur à induction .
MAS : Machine ou Moteur Asynchrone .
MSAP : Moteur synchrone à aimant permanent .
MSRB : Moteur synchrone à rotor bobiné .
MRV : Moteur à réluctance variable
ECU : Unité de contrôle électronique .
MOSFET : Métal-oxyde-semiconducteur field effect transistor.
MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion .
MLIST : Modulation à Largeur d'Impulsion Sinus-Triangle.
r : Grandeur rotor ou de repère rotor (R).
s : Grandeur stator ou de repère stator (S).
 α : Axe α du repère stator (S)=(α, β) .
 β : Axe β du repère stator (S)=(α, β) .
d : Axe d du repère tournant (d, q).
q : Axe q du repère tournant (d, q).
a, b, c : Indices correspondant aux trois phases statoriques.
A, B, C : Indices correspondant aux trois phases rotoriques.
V: Tension. **I** : Courant. **Φ** : Flux. **Φ_r** : Flux rotorique . **Φ_s** : Flux statorique.
 $I_{s\alpha}$: Courant statorique instantanée dans l'axe α .
 $I_{s\beta}$: Courant statorique instantanée dans l'axe β .
 $V_{s\alpha}$: Tension statorique instantanée dans l'axe α .
 $V_{s\beta}$: Tension statorique instantanée dans l'axe β .
 θ_a : Angle d'observation de la matrice de PARK.
 θ_r : Angle électrique rotorique. **θ_s** : Angle électrique statorique.
 C_{em} : Couple électromagnétique. **C_r** : Couple résistant.
 Ω : Vitesse mécanique. **ω_{ref}** : Vitesse de référence.
(α, β) Axes correspondant au référentiel lié au stator.
(d, q) Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant.
[L_{ss}] Matrice des inductances statorique.
[L_{rr}] Matrice des inductances rotorique
[M_{sr}] Matrice des inductances mutuelles du couplage stator rotor.

Introduction générale et problématique :

La première voiture électrique (VE) a été construite par Thomas Parker, un inventeur britannique, en 1884. Selon Graham Parker, Le petit-fils de Thomas, la fumée et la pollution à Londres ont inspiré son grand-père sur la conduite écologique des voitures.

Jusqu'à présent, l'obstacle essentiel au développement du VE est la batterie dont la capacité est insuffisante, d'où une faible autonomie pour ce type de véhicule comparée à celle des véhicules thermiques.

Les performances sont alors médiocres, surtout à cause de la masse du véhicule qui implique une réserve d'énergie trop importante au regard de ce que l'on peut stocker actuellement dans les batteries. Pourtant, il existe de nombreuses solutions originales permettant de créer des véhicules totalement innovants, autour de concepts adaptés à l'énergie électrique. Soit le véhicule est léger et il est destiné à des déplacements courts : dans ce cas les accumulateurs actuels sont suffisants, soit le véhicule est massif et il nécessite une forte puissance : dans ce cas, l'énergie électrique doit être produite par une source supplémentaire autre que la batterie et il peut s'agir alors de l'énergie solaire photovoltaïque.

Concernant la source d'énergie qui est la batterie, elle n'a pas connue de véritable essor du fait de sa faible autonomie et de son important temps de recharge et de son coût élevé. Une des solutions possibles est la production d'énergie propre en quantité suffisante pour alimenter le VE et cela peut être réalisé par hybridation entre batterie et énergie solaire.

Quant à la commande du VE, de nombreuses stratégies de commandes ont été adaptées aux machines asynchrones telle que la commande scalaire, vectorielle et la commande direct du couple connu sous le nom DTC (direct torque control).

Notre étude se focalise essentiellement sur la technique la plus répandue qui est la commande directe par couple (DTC).

L'objectif du présent travail est d'étudier le système de commande d'un moteur asynchrone triphasé utilisé pour la traction du véhicule électrique (VE) avec alimentation hybride batterie/ énergie photovoltaïque.

Nous avons réparti notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre est réservé aux généralités sur les VEs, il commence par une introduction et un historique du VE, suivis par une présentation des différents composants technologiques essentiels, tels que les systèmes électriques embarqués, les types de VE, avec une description générale de leur fonctionnement.

Dans le second chapitre nous avons étudié la chaîne de traction, les différents types de moteurs utilisés dans les VE(s) et en particulier le moteur asynchrone triphasé (théorie, principe de fonctionnement, équations, et modélisation).

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude et à la modélisation de la chaîne de puissance qui comporte les différents convertisseurs utilisés. Suivies de la modélisation du système PV comme source hybride d'alimentation, ensuite nous avons présenté les différentes techniques de commande de la MAS et principalement la technique DTC.

Le quatrième chapitre a été réservé aux résultats de simulation des différents étages et à leurs interprétations.

Une conclusion générale sur l'ensemble des résultats obtenus, ainsi que les perspectives des travaux futurs qui pourront améliorer ce projet de recherche termineront notre étude. L'outil logiciel employé pour réaliser toutes les simulations présentées dans notre travail est Matlab-Simulink, dont l'utilisation est très largement répandue dans les nombreux travaux de recherches.

CHAPITRE I

Généralités sur la voiture électrique

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter l'état de l'art de la voiture électrique actuelle, son architecture, ses éléments constitutifs ainsi que les différentes technologies de VE proposées par les constructeurs.

I.2. Le véhicule électrique :

Un véhicule tout électrique est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue.

I.3. Actualités des véhicules électriques :

Durant ces dernières années, le monde des VE(s) a connu un progrès remarquable avec l'avancée de l'industrie des batteries. L'ensemble des VE(s) proposés actuellement par les constructeurs disposent d'une autonomie qui peut aller jusqu'à 700 km. A titre d'exemple certains modèles sont donnés par le tableau suivant:

Nouveautés électriques 2021 - Le tableau comparatif

MODÈLE	AUTONOMIE	BATTERIE	PUISSANCE	PRIX
Audi Q4 e-tron	≈ 450 km	≈ 80 kWh	≥ 300 chevaux	n.c.
Audi e-tron GT	De 429 à 488 km	86 kWh net / 93 kWh brut	476 à 646 ch	À partir de 101'500 €
BMW iX	≥ 600 km	≥ 100 kWh	500 ch	n.c.
BMW iX3	460 km	74 kWh	286 ch	72'950 €
Citroën ë-C4	350 km	50 kWh	136 ch	34'800 €
Cupra el-Born	500 km	77 kWh	≥ 300 chevaux	n.c.
Dacia Spring	225 km	26,8 kWh	44 ch	≈ 20'000 €
Ford	340-480 km	75,7-98,8	258-465 ch	48'990 €
Mercedes EQA	426 km WLTP	66,5 kWh	272 ch	≤ 50'000 €
Mercedes EQS	≈ 700 km	n.c.	n.c.	n.c.
Nissan Ariya	340-500 km	63-87 kWh	218-395 ch	n.c.
Range Rover EV	n.c.	90,2 kWh	n.c.	n.c.
Skoda Enyaq	340-510 km	52-77 kWh	150-300 ch	34'500 €
Tesla Model Y	480-505 km	75 kWh	351-512 ch	63'000 €
Volkswagen ID.4	490 km	77 kWh	204 ch	47'950 €
Volvo XC40 Recharge	400 km	78 kWh	408 ch	59'940 €

Tableau : I.1 : Tableau comparatif des différents modèles de VE(s).

I.4. Classifications des véhicules électriques:[4]

Actuellement, on peut trouver deux types de véhicules dans la catégorie électrique :

- Les véhicules à motorisation purement électrique : véhicules tout électrique.
- Les véhicules à motorisation mixte électrique et thermique : véhicules hybrides.

I.4.1. Véhicule tout électrique :

Le développement de VE est fortement lié au développement de son alimentation en énergie : les batteries, dont l'énergie massique est relativement faible sont de plus très lourdes et très coûteuses. Selon la source d'énergie utilisée pour alimenter ces véhicules, on distingue essentiellement deux types de VE(s) : VE à batteries rechargeables par prise de courant à partir du réseau électrique et VE à alimentation par pile à combustible (PAC)[4].

I.4.2. VE à batteries rechargeables par prise de courant :

Les VE(s) fonctionnant avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des VE(s). Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adapté pour l'alimentation des VE(s) et le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement.

I.4.3.VE à alimentation par pile à combustible (PAC):

Les VE(s) à pile à combustible sont semblables aux autres véhicules électriques sauf qu'ils produisent leur propre électricité à bord. La source de cette électricité est la pile à combustible, un dispositif électrochimique semblable à une batterie à plusieurs égards (fig.I.1). Plutôt que de stocker et relâcher l'énergie électrique comme une batterie, une pile à combustible produit toutefois de l'électricité par réaction chimique aussi longtemps qu'elle reste alimentée en carburant. Il y a divers types de piles à combustible qui fonctionnent avec différents carburants mais la pile à membrane échangeuse de protons est considérée comme la plus prometteuse pour les véhicules

automobiles, elle utilise de l'hydrogène (H_2) et l'oxygène (O_2) de l'air ambiant comme carburants [6].

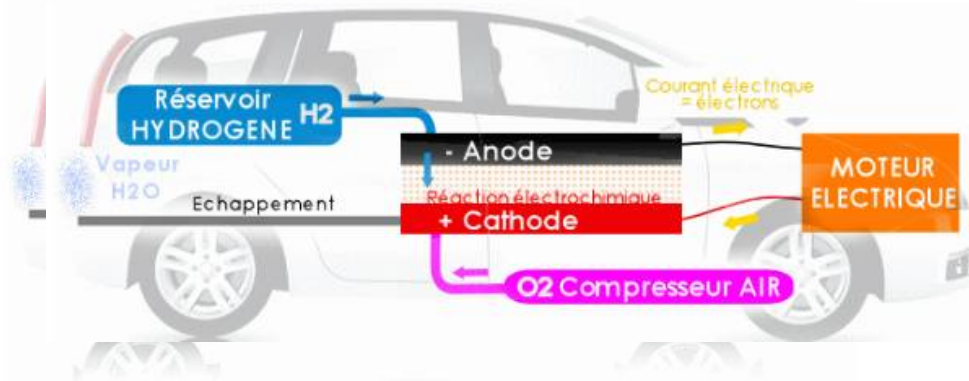


Fig. I.1 : voiture électrique à PAC [6].

I.4.4. Véhicules hybrides (VH):

Le véhicule hybride utilise au moins deux types de production et de stockage d'énergie, habituellement un moteur thermique classique (essence ou diesel), en plus d'au moins un moteur électrique et le stockage d'électricité par batterie. Ces systèmes peuvent fonctionner simultanément ou indépendamment les uns des autres. Les VH(s) sont munis d'un moteur classique et d'un moteur électrique qui fonctionnent en combinaison selon la vitesse et l'accélération du véhicule. Le moteur électrique permet d'améliorer les performances du moteur thermique ainsi que l'autonomie du véhicule [4].

On distingue deux principaux types de systèmes d'entraînement hybrides, le premier pour une mise en parallèle et le deuxième pour une mise en série. Ces systèmes diffèrent par leurs façons d'intégrer le fonctionnement des deux unités de production d'énergie.

I.4.4.1. Véhicules hybrides série (VHS) :

Dans ce cas, le principe repose sur le fait que l'énergie électrique utilisée par le moteur électrique peut être produite par un alternateur entraîné par un moteur thermique fonctionnant à vitesse de rotation constante. Les deux moteurs sont donc en série (fig.I.2), d'où l'appellation. On peut alors choisir la vitesse de rotation du moteur thermique de manière à obtenir un rendement maximal et par

conséquent augmenter la quantité de carburant brûlée dans un cycle moteur, ce qui implique une diminution des rejets gazeux. Par ailleurs, la qualité acoustique du moteur thermique peut être améliorée pour la vitesse de rotation fixe choisie.

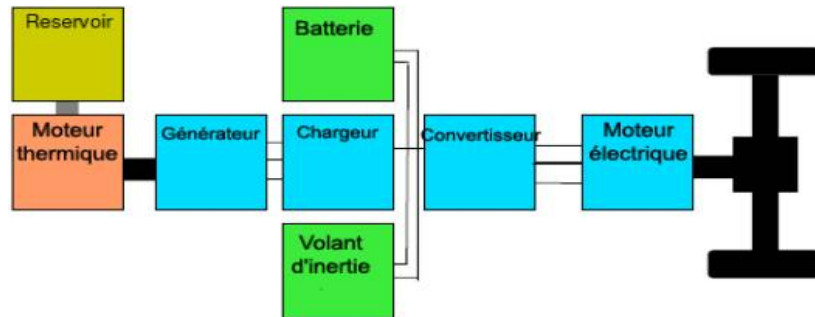


Fig. I.2 : schéma de principe d'un véhicule hybride série [6].

I.4.4.2. Véhicule hybride parallèle (VHP) :

L'idée principale est de faire deux véhicules en un, en bénéficiant des avantages de chacun. Le VHP possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle, un électrique et un thermique (fig.I.3). Les deux moteurs sont utilisés séparément et on résout alors le problème écologique du moteur thermique en ville, en fonctionnant en mode électrique et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour les grands déplacements hors des agglomérations en fonctionnant en mode thermique [4].

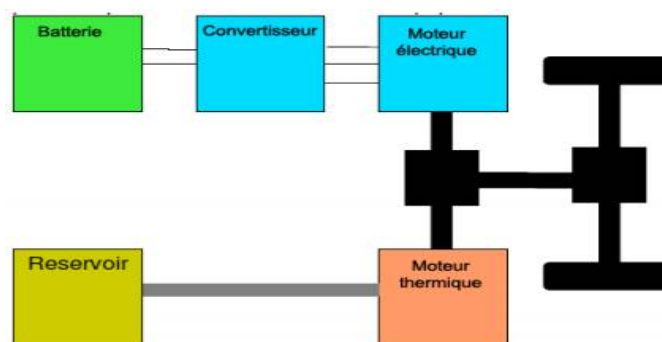


Fig. I.3 : Schéma de principe d'un véhicule hybride parallèle[6].

I.4.4.3. Véhicule hybride combiné (VHSP):

La catégorie des architectures combinées correspond aux véhicules hybrides série/parallèle, appelée aussi hybride parallèle à dérivation de puissance. Cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un

moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie. La figure I.4 schématise le principe de fonctionnement d'un hybride combiné [3].

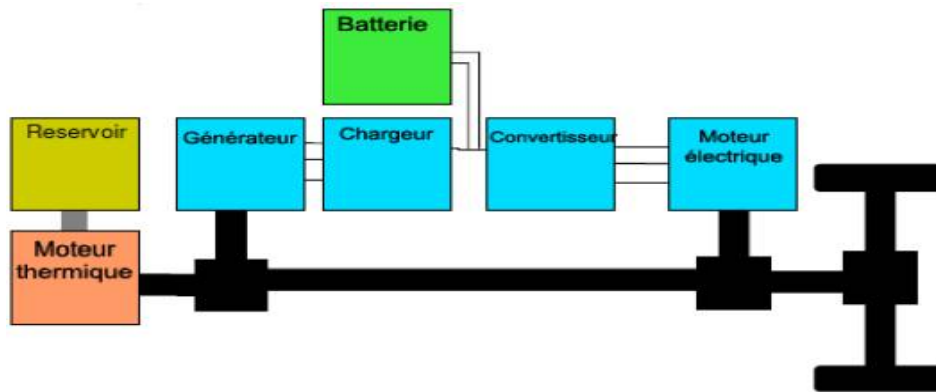


Fig.1.4 : Schéma de principe d'un véhicule hybride combiné [6].

Remarque : la suite de notre étude s'intéressera seulement au VE à batteries rechargeables par prise de courant.

I.5. Architecture d'un Véhicule Electrique [11] :

Le schéma de la figure (I.5) regroupe les grands éléments constituant la chaîne de traction du VE.

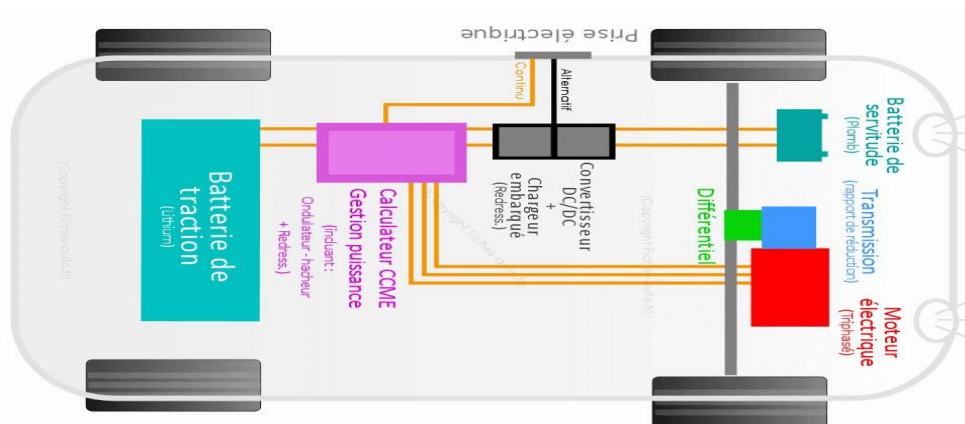


Fig.I.5 : Architecture et composants de la VE [12].

I.5.1. Stockage de l'énergie (batterie de traction) :

La batterie de la voiture électrique est bien évidemment différente de celle utilisée pour les voitures thermiques. Dans le cadre de leurs recherches, les

constructeurs automobiles ont essayé plusieurs types de batteries pour accroître le potentiel énergétique de la voiture électrique. Parmi ces batteries on peut citer :

- Batterie au plomb, inventée en 1859, elle trouve encore sa place dans de nombreux véhicules, thermiques comme électriques.

- Batterie Nickel-Cadmium.

- Batterie Nickel-Métal Hydrures.

- Batterie lithium-ion.

- Batterie tout solide.

C'est la batterie lithium-ion qui a été choisie, par la plupart des constructeurs de VE, pour sa forte énergie volumique et massique, rendant une autonomie assez prolongée du véhicule. Il convient de rappeler que cette technologie a déjà été développée, puis commercialisée pour la première fois par Sony en 1991. Si elle a remporté un franc succès auprès de l'électronique portable, elle trouve une place considérable au sein de plusieurs domaines comme l'aéronautique et bien sûr la mobilité.

La batterie lithium-ion est composée de plusieurs cellules. La taille des cellules, leur nombre et la façon dont elles seront assemblées sont des paramètres importants pour obtenir les tensions et les courants nécessaires à la marche du VE. Les cellules sont reliées les unes aux autres pour être ensuite supervisées par un circuit électrique de contrôle. Plusieurs facteurs vont donc déterminer la tension délivrée ainsi que la quantité d'énergie pouvant être stockée par la batterie.

1.6. Les convertisseurs de puissance :

1.6.1. Convertisseur DC/DC (hacheur) :

Il sert à convertir la haute tension continue (200V ou 300V) de la batterie Lithium-ion en basse tension continue (12 à 14V) pour recharger la batterie de servitude au plomb.

Dans notre travail on étudiera un autre hacheur qui convertira la tension du panneau solaire installé sur le toit de la voiture en basse tension nécessaire pour recharger la batterie de servitude (12 V) et pour suppléer la batterie de traction ce qui permettra d'augmenter l'autonomie de la voiture.

I.6.2. Onduleur triphasé:

C'est un convertisseur DC/AC qui à partir de la haute tension continue fournie par la batterie de traction permettra d'obtenir le système de tensions alternatives triphasées pour alimenter le moteur de propulsion. Cet onduleur est commandé par un microcontrôleur (UCE), c'est l'élément essentiel de la commande de vitesse de la voiture.

I.6.3. Recharge de la batterie de traction :

La recharge d'un VE en énergie électrique représente un domaine de recherche parmi les plus actifs dont l'objectif est de faire progresser la technologie des VE(s). Elle peut être effectuée soit à la maison soit au niveau d'une station de recharge publique. La durée de recharge complète pour une voiture électrique peut être courte (environ 30 minutes) ou beaucoup plus longue (jusqu'à 10 heures) selon le modèle de batterie et selon la technologie du chargeur utilisé. Sachant que les VE(s) peuvent être rechargées par un courant continu ou par un courant alternatif.

I.6.3.1. Courant alternatif (maison et petits chargeurs) :

A la maison on aura à faire à un courant alternatif monophasé qui devra passer par un redresseur interne à l'automobile (chargeur embarqué) : il transforme le courant alternatif en provenance de la prise vers un courant continu destiné à la batterie de puissance, c'est un convertisseur AC/DC.

Cela limite la capacité de recharge car ce redresseur ne peut pas avoir une grosse capacité (coût et encombrement). On sera alors limité à un peu plus de 20 kW pour les voitures les mieux dotées, et en général on sera vers les 10 kW

de limite si on a une bonne installation électrique qui permet de monter jusqu'à ce niveau.

I.6.3.2. Courant continu (super-chargeurs haute capacité) :

Les super-chargeurs sont en revanche à courant continu et ne nécessitent pas de passer par un convertisseur interne à la voiture, la capacité de recharge peut alors être énorme, jusqu'à plus de 250 kW.

I.7. Moteur d'entraînement:

Les constructeurs de VE(s) emploient habituellement différents types de moteurs d'entraînements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de traction. Ces moteurs peuvent être très variés tels que: le Moteur à Courant Continu (MCC), le Moteur à Induction ou asynchrone (MI), le Moteur Synchrone à Aimant Permanent (MSAP), le Moteur à Reluctance Variable (MRV)...etc. En plus des caractéristiques de fonctionnement, d'autres facteurs importants de conception sont à prendre en considération à savoir le coût acceptable et l'encombrement.

I.8. Les systèmes embarqués dans l'automobile :

Pour l'automobile, les trois grands axes d'avenir sont: la voiture électrique, la voiture connectée et la voiture automatisée. L'électronique embarquée est transversale à tout cela. Un véhicule contient une grande quantité d'électronique et d'informatique : on retrouve plus de 100 capteurs, 30 à 50 calculateurs selon le type de véhicule et parfois près d'un million de lignes de codes pour les véhicules de dernière génération avec 80 calculateurs.

Les différentes fonctions sont gérées par des ECU(s) (Electronic Control Units) qui représentent les calculateurs présents dans les véhicules. Ce sont de petits boîtiers noirs ayant chacun leurs spécificités et leurs rôles liés à des capteurs et des actionneurs.

Toutes ces fonctions se catégorisent selon leur domaine d'action :

prise de décision en fonction des paramètres d'entrées via des capteurs. Dans le cas d'un calculateur moteur (fig.I.7), son but précis sera d'assurer les fonctions de pilotage d'un moteur en ajustant en temps réel les besoins du moteur. En recevant des signaux électriques de la part des capteurs (sonde de température, capteur de pression...), le calculateur peut traiter ces informations pour les transformer en actions par l'intermédiaire d'actionneurs.

*Fig. I.7 : Illustration
d'un calculateur moteur*



I.8.1.2. Les actionneurs :

Lorsque le traitement est réalisé par le calculateur, un signal électrique est transmis aux actionneurs permettant une action physique sur le véhicule. Ces actionneurs (ou actuateurs) transforment le signal électrique reçu en énergie mécanique. Cette transformation d'énergie peut être réalisée par moteur, de façon magnétique, hydraulique ou optique.

I.8.1.3. Les Capteurs :

Les capteurs sont des éléments essentiels au fonctionnement des calculateurs puisque ce sont ces composants qui sont en charge de transmettre l'information afin d'être traitée de manière optimale, leurs tâches consistent à pouvoir transformer une grandeur physique (température, pression...) en un signal électrique afin de le transmettre au calculateur. En effet, des interrupteurs peuvent être considérés comme des capteurs puisque les informations qui résultent de l'action émise par l'utilisateur sont directement transmises au calculateur.

CHAPITRE II

*Etude de la
chaîne de traction
du véhicule électrique*

II.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à une étude générale de la chaîne de traction du véhicule électrique et des différents éléments qui la constituent. Le moteur électrique qui est l'élément essentiel de la chaîne de traction sera décrit en détail avec énumération des variétés de moteurs utilisés par les constructeurs automobiles avec précision de leurs constituants technologiques, leurs avantages et leurs inconvénients. Une place assez importante sera donnée à la batterie d'alimentation du VE et aux méthodes de recharge.

II.2. Description de la chaîne de traction :

Une chaîne de motorisation classique d'un véhicule tout électrique est composée des éléments suivants (fig. II.1) : [1]

- alimentation par batterie de traction.
- convertisseur DC/AC et convertisseur AC/DC
- moteur électrique.
- liaison mécanique (réducteur, différentiel et roues).

On ne s'intéresse ici qu'à la chaîne de traction proprement dite, mais il va de soi que la totalité des équipements électriques doit être optimisée pour maximiser l'autonomie du véhicule [8].

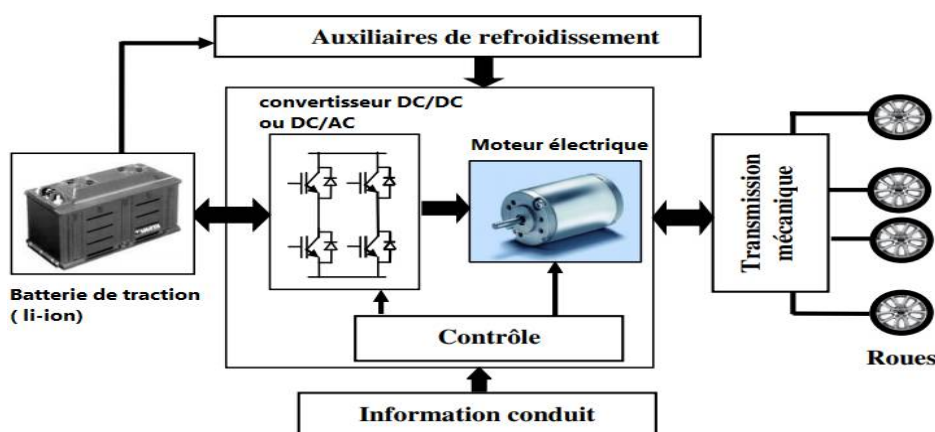


Fig.II.1 : Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un VE.

II.3 .Moteur électrique d'entraînement :

Le moteur électrique, élément clé de la chaîne énergétique d'un véhicule n'a cessé d'évoluer depuis la célèbre voiture « la jamais contente » de 1899 jusqu'à nos jours. Les premiers véhicules électriques étaient pourvus de moteurs à courant continu à excitation séparée réglable. Ils ont été remplacés depuis la fin des années 1990 par des moteurs à courant alternatif, ceci grâce aux progrès réalisés en électronique de puissance et de commande. Par rapport à leurs prédécesseurs, ces moteurs sont beaucoup plus robustes, ont une puissance massique et volumique plus élevée, et un meilleur rendement [5]. La figure (II.2) montre un exemple de moteur triphasé pour VE.

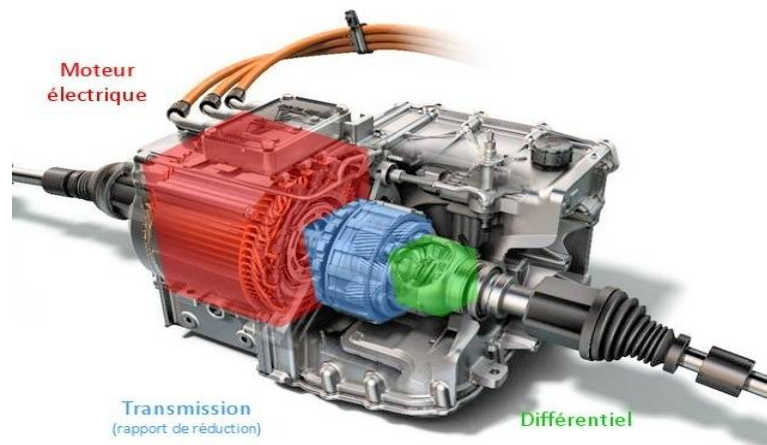


Fig.II.2 : Moteur électrique d'une VE.

II.3.1. Types de moteur pour véhicule électrique :

Le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes [1] :

- Assurer un démarrage en côte du VE (couple élevé).
- Obtenir une vitesse maximale.
- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (rendement élevé en étant employé à différentes vitesses).

II.3.1. Moteur à Courant Continu (MCC):

Le moteur à courant continu est composé de :

- Un inducteur (appelé aussi stator) composé, soit d'aimants permanents, soit d'enroulements bobinés (fig.II.3 et 4) autour d'éléments fixes du stator (les pôles), il crée le champ magnétique dit statorique.
- Un induit appelé aussi rotor (fig.II.4) : cylindre composé de tôles isolées entre elles et munies d'encoches dans lesquelles sont répartis des conducteurs parcourus par un courant électrique continu. Ces conducteurs, étant placés dans le champ magnétique du stator, sont soumis à des forces électromagnétiques (force de Laplace) qui font tourner le moteur.

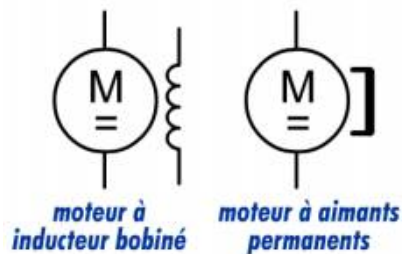
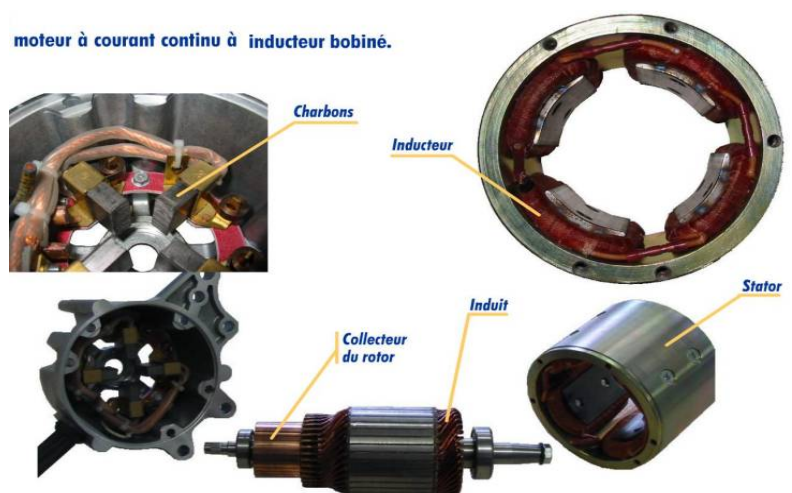


Fig.II.3 : Moteur à courant continu (schéma électrique)

- Un collecteur fixé au bout de l'induit (fig.II.4), il est en contact avec les charbons.
- Des charbons appelés aussi balais, ils alimentent l'induit par le collecteur sur lequel ils frottent.

Fig. II.4 :
Moteur à courant continu
à inducteur bobiné



Selon le mode d'alimentation des enroulements dans le moteur à inducteur bobiné, on distingue quatre types d'excitations (fig.II.5).

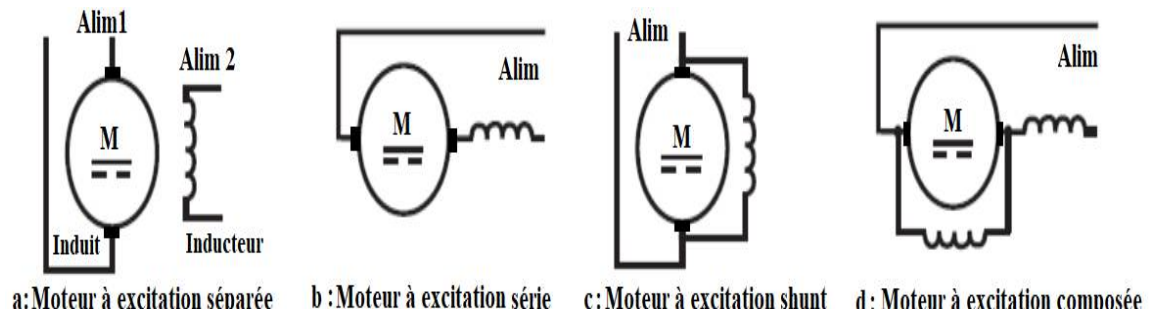


Fig. II.5 : Les 4 types de moteurs à courant continu

II.3.1.1.1. Moteur à courant continu à excitation séparée :

Les moteurs à courant continu à excitation séparée, sont commandés par un hacheur de puissance agissant sur l'induit du moteur et un hacheur de plus faible puissance commandant l'excitation (inducteur). Dans la traction électrique automobile, c'est le système le plus employé. En effet, le moteur de Leroy Sommer [7] qui entraîne la plupart des VE(s) en circulation est un moteur à courant continu conçu à partir des modèles destinés à la traction industrielle.

II.3.1.1.2. Moteurs à courant continu à aimant permanent :

Les moteurs à courant continu à aimant permanent (fig.II.6) sont actuellement en pleine expansion dans l'industrie. Cette technologie permet d'obtenir des moteurs encore plus légers avec un meilleur rendement que les précédents. Malheureusement, ces aimants font appel pour leur composition, à des terres rares, dont le coût est très élevé. Ils sont également très sensibles aux montées en température.

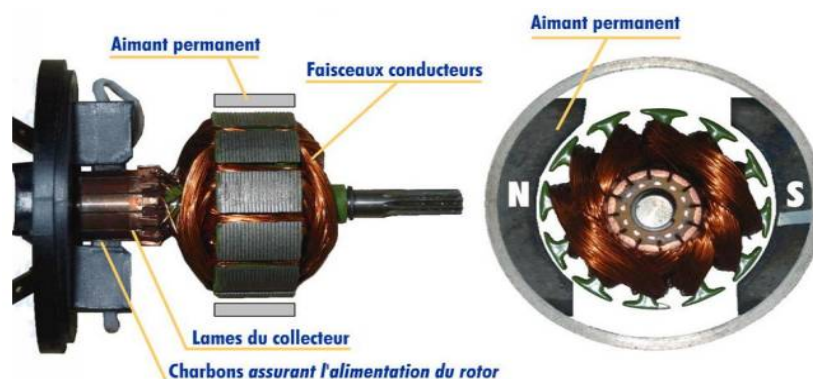


Fig. II.6 : Moteur à courant continu à aimant permanent.

II.3.2. Moteurs asynchrones :

On distingue deux types de machine asynchrone:

La machine asynchrone à rotor à bagues et la machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette dernière est la plus répandue. Son niveau de robustesse et de fiabilité allié à un faible coût ont fait d'elle une machine de référence [10, 11].

II.3.3. Moteurs synchrones :

II.3.3.1. Moteurs synchrones à aimants permanents :

Les moteurs synchrones à aimants permanents ont une puissance massique et un rendement élevés. Leurs coûts élevés restent le plus gros handicap. Des ferrites peuvent être utilisées mais leurs performances ne sont pas excellentes. Par contre, les aimants à terres rares (Samarium-Cobalt ou Fer-Néodyme-Bore) sont plus intéressants. Un des inconvénients de cette machine est l'impossibilité du réglage de l'excitation. Le champ de l'aimant varie avec le temps et la température mais de manière non significative. Pour atteindre des vitesses élevées, il sera nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes joules statoriques.

II.3.3.2. Moteur synchrone à rotor bobiné :

Ce moteur peut présenter une alternative très intéressante. En comparaison avec le moteur synchrone à aimants permanents. Il dispose d'un degré de liberté supplémentaire : le réglage du flux d'excitation. En effet, cela ouvre une large palette d'algorithmes de commande : compensateur synchrone, facteur de puissance unitaire, couple maximal, minimisation des pertes.

II.3.4. Moteur à réluctance variable :

Ce moteur présente un faible coût. Néanmoins, sa principale difficulté reste la commande. En effet, ce moteur produit un couple très pulsatoire à haute vitesse engendrant des problèmes de vibrations mécaniques et générant un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents. Ceci est une des conséquences de

son principe de fonctionnement. D'autres technologies comme les moteurs-roues encore en phase de mise au point, pourraient présenter des avantages spécifiques indéniables qui devraient jouer un rôle décisif dans le développement du véhicule électrique [11].

II .4.Comparaison entre les différents types de moteurs :

La comparaison entre les différents moteurs est résumée dans le tableau suivant :

Type	Avantages	Inconvénients
M. à courant continu à excitation série	- Commande par un seul hacheur. - Défluxage automatique.	- Freinage dynamique difficile à mettre en place - Prix du moteur élevé. - Le procédé de fabrication est difficile à automatiser - Puissance massique relativement faible.
M. à courant continu à excitation séparée	- Commande par un seul hacheur de puissance sur l'induit et un hacheur de faible puissance pour la commande du courant d'excitation - Défluxage facile.	- Prix du moteur élevé. - Le procédé de fabrication est difficile à automatiser - Puissance massique relativement faible.
M. à courant continu à aimants permanents	- Commande avec un seul hacheur - freinage relativement simple à mettre en œuvre - excellent rendement (surtout avec aimants terres rares).	- Défluxage difficile - prix élevé (voire prohibitif avec des terres rares)
M. asynchrones	- Facilement industrialisables, donc de faible prix de revient - puissance massique élevée -rendement acceptable -moteur robuste -défluxage automatique	- Electronique relativement chère. - tension d'alimentation élevée pour faciliter la fabrication du moteur.
M. synchrones à rotor bobine	- Défluxage facile. - alimentation simple et moins chère	- Technologie peu courante - fragilité du système bagues balai
M.synchrones à aimants permanents	- Puissance massique élevée (avec aimants terres rares) - rendement élevé (avec aimants terres rares) - freinage dynamique relativement facile.	- Prix élevé (surtout avec aimants terre rares) - défluxage difficile - électronique de prix élevé

<p style="text-align: center;">Moteur à réluctance variable</p>	<p>- Couple massique élevé (en théorie).</p>	<p>- Mauvais rendement dû aux fréquences élevées et au mauvais facteur de puissance - Prix élevé de l'électronique de puissance - Les moteurs très performants en puissance massique ont un entrefer faible et sont relativement fragiles.</p>
--	--	--

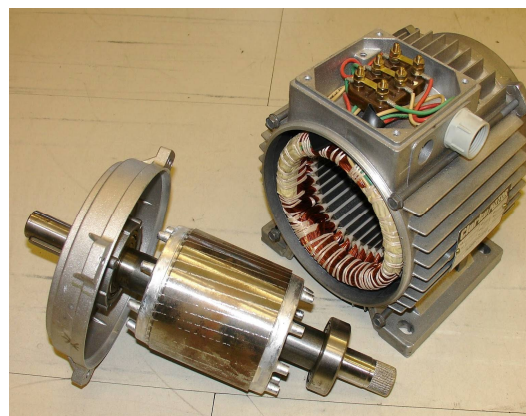
Tableau II.1: Avantages et Inconvénients des différents moteurs d'un VE [11].

D'après les données du tableau précédent, le moteur asynchrone triphasé reste le meilleur choix pour la traction d'un VE.

II.4.1. Moteur Asynchrone triphasé [5]:

II.4.1.1. Introduction :

La machine asynchrone (fig.II.7) a été inventée par Nikola Tesla en 1887. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée dans tous les domaines de l'industrie. Elle peut fonctionner comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts et comme génératrice à vitesse variable dans les éoliennes, les hydroliennes et les systèmes de génération d'électricité.



*Fig. II.7 : Moteur asynchrone
Triphasé à rotor en court circuit
(cage d'écureuil)*

II.4.2. Constitution de la machine asynchrone :

Les différentes parties de la machine asynchrone sont représentées sur la figure II.8.

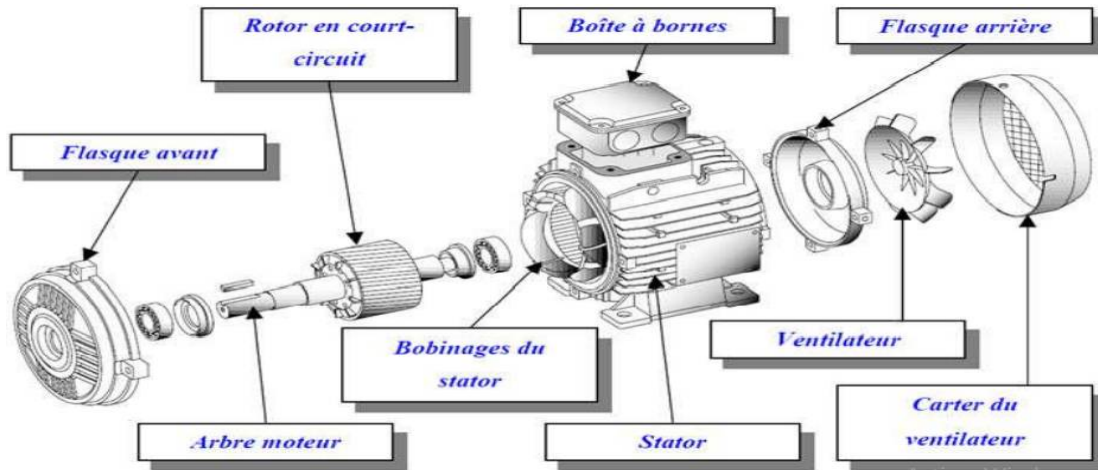


Fig. II.8 : Vue éclatée d'un MAS

Le moteur asynchrone triphasé est constitué de deux parties essentielles :

- **Le stator** : c'est la partie fixe, il est constitué de trois enroulements (fig.II.9) décalés entre eux de $2\pi/3$ rd et couplés en étoile ou en triangle dans la boîte à bornes, et qui sont alimentés par un système de tensions triphasé équilibré.

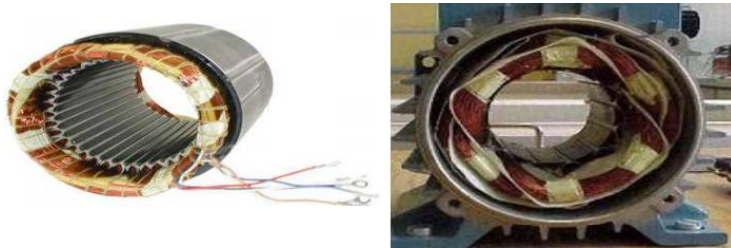


Fig. II.9 : le Stator d'un MAS

Lorsque les 3 enroulements du stator sont parcourus par les courants triphasés, ils produisent un champ magnétique tournant figure (II.11) à la vitesse de synchronisme n_s . Cette vitesse est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation f (50 Hz en Algérie) et du nombre de paires de pôles du moteur p . La fréquence f du réseau étant fixe, la vitesse de rotation du champ tournant ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles p . Le tableau (II.2)

donne les vitesses de synchronisme en fonction de p . La vitesse de synchronisme est donnée par l'expression suivante :

$$n_s = \frac{60 f}{p} \text{ (tr/min)} \quad (\text{II.8})$$

Nbre de paires de poles (p)	1	2	3	4	6
Vitesse n_s (tr/mn)	3000	1500	1000	750	500

Tableau II.2 : vitesse de synchronisme en fonction de nombre de paires de pôles.

- **Le rotor :** C'est l'élément mobile du moteur, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. On distingue deux types de rotor (fig. II.10) :

Le rotor en court circuit (moteur à cage d'écureuil), et le rotor bobiné (moteur à bagues), ce qui permet de classer les moteurs asynchrone en deux catégories.



a



b

Fig. II .10: Le rotor du MAS (a- rotor en CC , b- rotor bobiné).

II.4.3. Principe de fonctionnement du MAS triphasé :

Les enroulements statoriques alimentés en énergie électrique à partir du réseau de courants triphasé dont la pulsation est ω_s , créent un champ triphasé tournant à la vitesse angulaire de synchronisme $\Omega_s = \omega_s/p$. Ce champ, en balayant les barres rotoriques y induit des F.E.M qui créent à leur tour des courants triphasés induits. Ces courants induits produiront un champ triphasé tournant qui sera de sens opposé au champ statorique et qui tourne dans le même sens que ce dernier mais avec une vitesse moindre ($\omega < \omega_s$). Ce décalage

angulaire va produire un couple moteur qui entrainera la mise en mouvement du rotor dans le sens du champ tournant statorique.

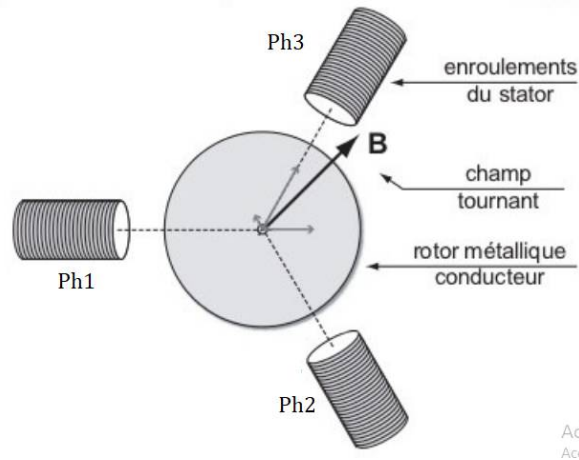


Fig. II.11: Principe du champ tournant triphasé.

II.5. Sources d'énergie dans les VE(s) :

Le stockage de l'énergie électrique est le problème majeur du VE. Deux voies technologiques sont possibles : les batteries et les piles à combustible. Ces éléments permettant de stocker de l'énergie doivent remplir les conditions suivantes :

- Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) permettant de bonnes accélérations.
- Une bonne énergie massique (en Wh/kg) étant synonyme d'une bonne autonomie.
- Une tension stable engendrant des performances régulières.
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles chargement/déchargement, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur.
- Nécessitant un faible entretien et constitués d'éléments facilement recyclables [7].

II .5.1. Batterie de traction : [10]

Le développement du VE passe presque exclusivement par l'évolution de la batterie. Les principaux facteurs à connaître sur les batteries sont leurs

caractéristiques (capacité et rendement), leurs avantages, leurs inconvénients et les possibilités d'amélioration.

II .5.1.1. Types de batteries :

Une batterie typique consiste en deux ou plusieurs cellules électrochimiques réunies. La batterie convertit l'énergie chimique stockée en énergie électrique. Une cellule de batterie unique est faite de deux électrodes dont l'une est négative et l'autre positive et connectées par un électrolyte. La réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte génère de l'électricité. Cette batterie est rechargeable. On trouve plusieurs types de batterie :

- Plomb / acide,
- Nickel-cadmium (Ni-Cd),
- Nickel-hydrure métallique (Ni-MH),
- Lithium,

Le marché actuel offre trois sortes d'accumulateurs au lithium :

- L'accumulateur **lithium métal**, où l'électrode négative est composée de lithium métallique (matériau qui pose des problèmes de sécurité).
- les accumulateurs **lithium-ion** : c'est les plus utilisés dans les VE(s). Le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive (dioxyde de cobalt, manganèse, phosphate de fer).
- Les accumulateurs **lithium-polymère** sont une variante et une alternative aux accumulateurs lithium-ion. Ils délivrent un peu moins d'énergie, mais sont beaucoup plus sûrs. Contrairement aux autres accumulateurs, les accumulateurs lithium-ion ne sont pas liés à un couple électrochimique. Tout matériau pouvant accueillir en son sein des ions lithium peut être à la base d'un accumulateur lithium-ion. [14]

Le tableau suivant, donne les caractéristiques relatives aux différentes batteries les plus utilisées :

caractéristiques	Energie massique Wh/Kg	Energie volumique Wh/l	Tension d'un élément	Puissance en Pointe en W/kg	Durée de vie (nombre de recharges)	Autodécharge par mois
Type de batterie						
Plomb/acide	30-50	75-120	2.25V	700	400-800	5%
Ni-Cd	45-80	80-150	1.2V	-	1500-2000	>20%
Ni-MH	60-110	220-330	1.2V	900	800-1000	>30%
Li-ion	90-180	220-400	3.6V	1500	500-1000	2%
Li-Po	100-130	-	3.7V	250	200-300	2%

Tableau II.3 : Comparaison entre différents types de batteries.

On constate que les batteries Li-ion ont la densité de charge la plus élevée parmi les systèmes comparables. Elles peuvent donc fournir beaucoup d'énergie sans être trop lourdes.

II .5.2. Batterie de servitude :

C'est une batterie au plomb-acide (fig.II.12), la même utilisée dans les véhicules thermiques, utilisée pour alimenter le réseau basse tension du véhicule (tension continue 12V ou 14V) pour l'éclairage, le circuit de commande, le circuit de sécurité (dit secondaire), les essuie-glaces, la ventilation, etc... Elle délivre une tension continue de 12 volts et de quelques dizaines d'ampères, selon la demande énergétique. Dans certains cas, elle peut être suppléée par l'accumulateur principal ou éventuellement par des dispositifs photovoltaïques (Prius 3). Cette batterie doit systématiquement être déconnectée afin d'inhiber les sécurités secondaires (les airbags par exemple). Cependant, il peut arriver qu'elle soit réalimentée par la batterie de traction. Il peut y avoir plusieurs batteries de servitude selon les modèles de véhicules.



Fig. II.12: Batterie de servitude pour VE.

II.5.3. Alimentations hybrides batterie/ Photovoltaïque : [12]

Actuellement, la technologie retenue pour les VE(s) hybrides de nouvelle génération est basée sur les solutions dites Lithium-ion. Elle offre actuellement des caractéristiques satisfaisantes, mais son énergie massique ($\approx 180\text{Wh/kg}$) ne pourra jamais concurrencer l'énergie massique des hydrocarbures ($\approx 12000\text{Wh/kg}$). De plus, la plupart des applications « traction électrique » requièrent une forte puissance (accélérations rapides, variations de vitesse et freinages), ce qui n'est pas toujours admissible par les batteries actuelles et peut de plus limiter leur longévité. L'hybridation des sources a pour but de pouvoir combiner les avantages de deux technologies (ou plus), avec une énergie spécifique élevée pour la première et une puissance spécifique importante pour la seconde. Il existe différentes solutions technologiques connues telles que les piles à combustible, les batteries, les super condensateurs, les panneaux solaires, etc., permettant de réaliser cette hybridation par association de deux modules de stockage. Dans notre travail nous avons opté pour l'énergie photovoltaïque comme source d'énergie supplémentaire pour recharger la batterie Plomb-acide et pour alimenter les circuits auxiliaires. Le champ photovoltaïque composé d'un ensemble de cellules solaires doit être souple, léger et surface minimale pour pouvoir prendre forme avec le toit de la voiture. La figure (II.13) montre un exemple de champ constitué de 2 modules solaires parfaitement intégrés au toit de la voiture électrique.



*Fig. II.13 : Champ PV
installé sur le toit du VE [14]*

Comme exemple réel nous pouvons citer la version rechargeable sur une prise de courant de la voiture Toyota Prius (dite Prius PHEV ou plug-in hybrid) qui est équipée d'un panneau solaire dont le rendement est variable selon l'ensoleillement, le lieu de stationnement et la propreté du panneau. Il pourrait restituer jusqu'à 5 kilomètres d'autonomie par jour.

II.5.4. Recharge de la batterie de traction : [10]

La recharge d'un VE constitue un enjeu stratégique pour les constructeurs automobiles et forme un réel défi à relever avant de pouvoir comparer ces véhicules à la simplicité d'usage du véhicule thermique. En effet, l'autonomie limitée, la durée de recharge de la batterie, le coût du déploiement d'une infrastructure de charge rapide, l'impact significatif sur les réseaux électriques et le coût élevé de la batterie sont à l'origine de plusieurs projets de recherche axés sur l'optimisation de la chaîne de recharge du VE.

Les chargeurs AC/DC adaptés à la recharge monophasée à partir de prises de courants AC et/ou à la recharge triphasée sur bornes dédiées permettent l'amélioration de la disponibilité de la recharge pour les utilisateurs tout en réduisant les coûts d'investissement dans les infrastructures. Ainsi, certains constructeurs automobiles, comme Renault et BMW, ont développé leurs propres chargeurs AC/DC embarqués. Par ailleurs, le type de chargeur, station rapide dédiée (triphasee) ou à domicile (monophasée), impacte la durée de recharge de la batterie. Le tableau (II.4) fournit un exemple de durées et de puissances de recharge pour une batterie Lithium-ion de capacité 22 kWh rechargée en Europe.

Durée de recharge (pour un état de charge à 100%)	Réseau électrique	Puissance de recharge	Niveau de tension du réseau électrique en Europe (V_{eff})	Niveau de courant absorbé au réseau (I_{eff})
6 - 8 h	AC monophasé	3.7 kW	230 V	16 A
3 - 4 h	AC monophasé	7.4 kW	230 V	32 A
2 - 2h30	AC triphasé	11 kW	400 V	16 A
1 - 1h30	AC triphasé	22 kW	400 V	32 A
20 - 30 min	AC triphasé	43 kW	400 V	63 A
20 - 30 min	Réseau DC	50 kW	400 Vdc	100 Adc

Tableau II.4: Durée et puissance de recharge du VE avec batterie 22 KWh [10].

CHAPITRE III

*Modélisation et commande de la
chaîne de puissance du VE*

III.1. Introduction :

L'énorme progrès technologique réalisé ces dernières décennies dans les domaines de l'électronique de puissance et de l'électronique numérique en plus de l'apport de plus en plus performant des programmes informatiques ont contribué à un développement réel de la construction des véhicules électriques et hybrides.

Ce chapitre comporte une étude théorique et une modélisation mathématique des différents éléments de la chaîne de traction dans le but de pouvoir les simuler. Ces éléments sont les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et DC-AC (onduleur) ainsi que le système de commande du moteur de traction (MAS triphasé).

III.2. Système de puissance du véhicule électrique :

Le système de puissance classique du véhicule électrique peut être décomposé en trois sous-systèmes (fig. III.1) : la chaîne de traction, le système de confort thermique et le réseau basse tension (ou réseau 14V).

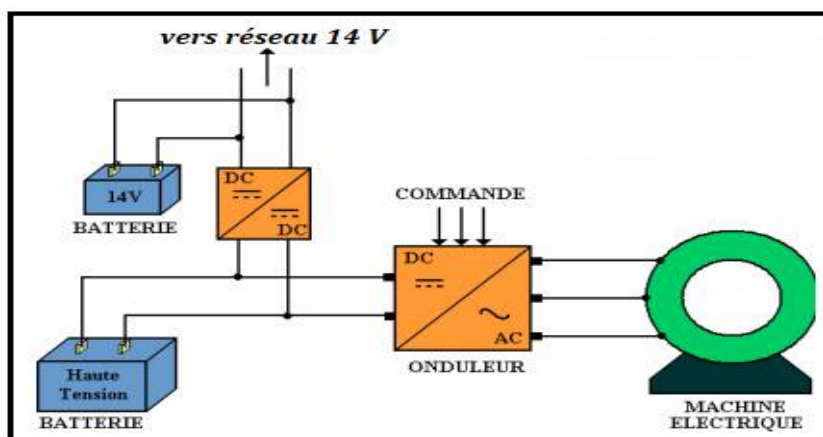


Fig. III.1: Système de puissance d'un VE.

III.3. Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs) :

Dans notre cas nous avons deux hacheurs, le premier sert à convertir la haute tension (200 à 330V) de la batterie Lithium-ion en très basse tension pour la batterie de servitude au plomb (14V), le second convertit la tension du

panneau solaire installé sur le toit de la voiture vers la batterie de servitude pour la recharge supplémentaire de la batterie (14 V).

III.3.1. La technique de découpage :

Dans une alimentation à découpage (fig. III.2), la tension d'entrée V_i est "hachée" (découpée) à une fréquence F_h à l'aide d'un transistor fonctionnant en tout ou rien (passant /bloqué), rôle d'interrupteur (K). Il en résulte une tension carrée qui sera lissée à l'aide d'une inductance pour obtenir une tension continue.

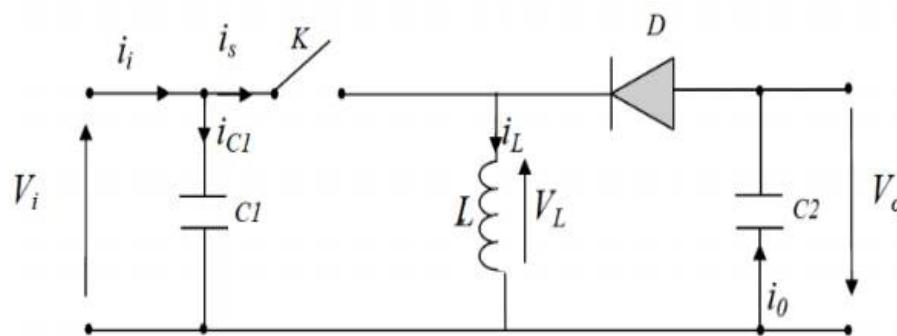


Fig. III.2 : Schéma de principe d'une alimentation à découpage.

Le transistor qui joue le rôle d'interrupteur dans le montage précédent est en général de type MOSFET. C'est un composant à trois ports (fig. III. 3) :

Le Drain (D) -La Grille (G) - La Source (S).

V_{DS} : tension entre le drain et la source et V_{GS} : la tension entre la grille et la source.

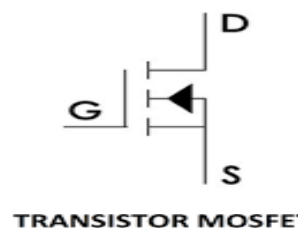


Fig. III.3 : Symbole du transistor MOSFET.

III.3.2. Rapport cyclique des impulsions de commande :

La tension de sortie du convertisseur doit être stabilisée à un niveau constant ceci est réalisé par une action sur le rapport cyclique des impulsions de la commande de l'interrupteur K. Ce rapport est défini comme étant la fraction

de la période de découpage où l'interrupteur est passant sur la période totale. Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante F_h avec un temps de fermeture égale à $d.T_h$ et un temps d'ouverture égal à $(1-d).T_h$ (voir fig. III.4), avec :

- $T_h=1/F_h$ la période de commutation.
- d le rapport cyclique du commutateur, $d \in [0, 1]$ et $1-d = d'$.

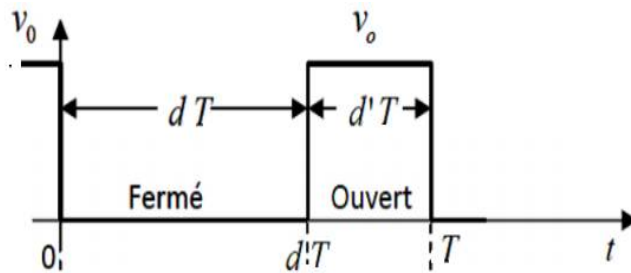


Fig. III.4: Temps de passage et de blocage du commutateur.

III.3.3. Types de convertisseurs DC-DC :

Les différents types de convertisseurs *DC-DC* fonctionnent selon l'un des trois principes suivants : dévolteur (abaisseur de tension), survolteur (élevateur de tension) ou mixte (dévolteur/survolteur) dit réversible.

III.3.3.1. Hacheur dévolteur :

Le convertisseur dévolteur est nommé hacheur Buck ou hacheur série. La figure (III.5) montre le schéma de principe d'un convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir la tension d'entrée V_i en une tension de sortie V_o inférieure. Le rapport des tensions de sortie et d'entrée V_o / V_i varie avec le rapport cyclique du commutateur.

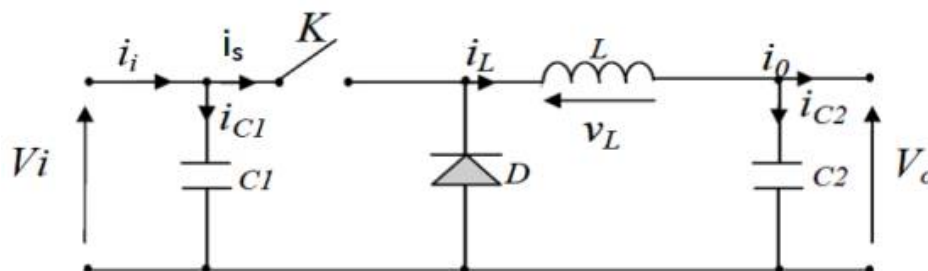


Fig. III.5 : Schéma de principe d'un hacheur Buck.

Pour modéliser le convertisseur nous devons faire la représentation du circuit équivalent pour les deux états fermé/ouvert du commutateur et établir les équations mathématiques reliant les variables d'entrée et de sortie. La figure (III.6) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur.

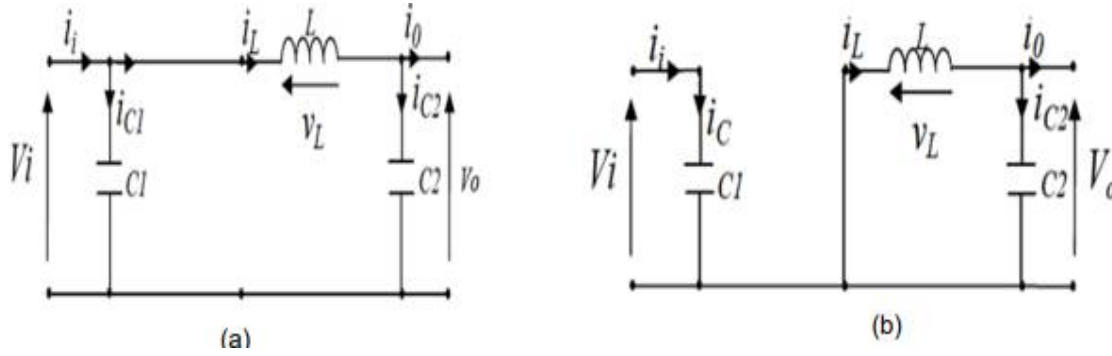


Fig.III.6: Schéma équivalent d'un hacheur buck

(a- interrupteur fermé , b- interrupteur ouvert).

Par application des lois de Kirchhoff aux deux circuits de la figure (III.6), on obtient les systèmes d'équations suivants :

- Pour l'intervalle de temps $(d.T_h)$ l'interrupteur est fermé:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (III.1)$$

- Pour l'intervalle de temps $(1-d).T_h$ l'interrupteur est ouvert :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -v_o(t) \end{cases} \quad (III.2)$$

Pour trouver une représentation dynamique pour toute la période T_h , on utilise une expression de la forme suivante (III.3) :

$$\frac{dx}{dt} T_s = \frac{dx}{dt} dT_s + \frac{dx}{dt} (1-d)T_s \quad (III.3)$$

L'application de la relation (III.3) aux systèmes (III.1) et (III.2), donne :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1-d) T_s i_i \\ C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_s = dT_s(i_L - i_o) + (1-d) T_s (i_L - i_o) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} T_s = dT_s(v_i - v_o) + (1-d) T_s (-v_o) \end{cases} \quad (III.4)$$

A partir des équations (III.4), on obtient les équations suivantes pour les courants et les tensions du modèle sur une période entière T_h :

$$\begin{cases} i_o(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ i_L(t) = i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + v_o(t)) \end{cases} \quad (III.5)$$

III.3.3.2. Hacheur survolteur :

Le convertisseur survolteur est connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe est celui de la figure (III.7). Il permet de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

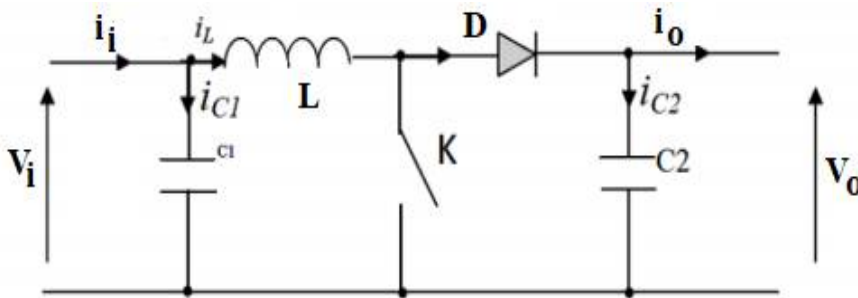


Fig. III.7 : Schéma de principe d'un hacheur Boost.

Les schémas équivalents du hacheur survolteur selon les 2 états du commutateur sont donnés par la figure (III.8).

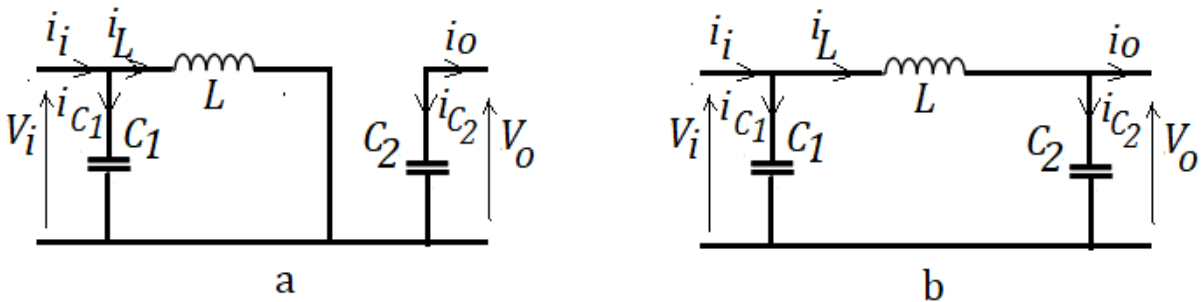


Fig. III.8: Schémas équivalents du hacheur survolteur
(a – commutateur fermé , b – commutateur ouvert).

L'application des lois de Kirchhoff aux circuits équivalents du convertisseur (fig. III.8 a et b), donne les systèmes d'équations suivants :

- Pour l'intervalle de temps $(d.Ts)$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad (III.6)$$

- Pour l'intervalle de temps $(1-d).Ts$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (III.7)$$

L'application de la relation (III.3) aux systèmes d'équations (III.6) et (III.7) donne les équations (III.8) du modèle mathématique du hacheur survolteur:

$$\begin{cases} i_o(t) = (1-d) i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ i_L(t) = i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d)v_o(t) \end{cases} \quad (III.8)$$

III.3.3.3. Hacheur dévolteur-survolteur :

Le convertisseur dévolteur-survolteur rassemble les propriétés des deux convertisseurs précédents, il permet de convertir la tension d'entrée imposée V_i en une tension de sortie désirée V_o , son schéma de principe est illustré dans la figure (III.9).

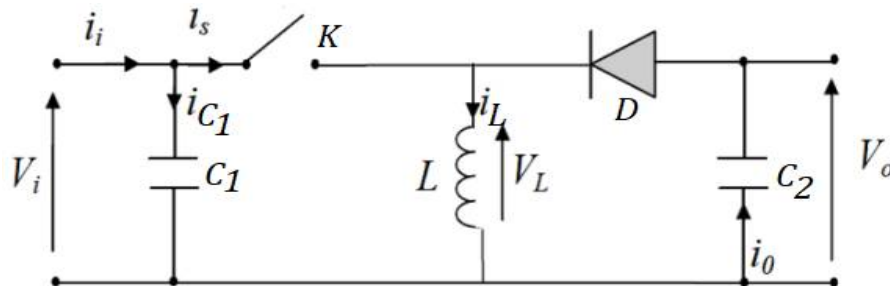


Fig.III.9 : Schéma de principe d'un hacheur Buck-Boost.

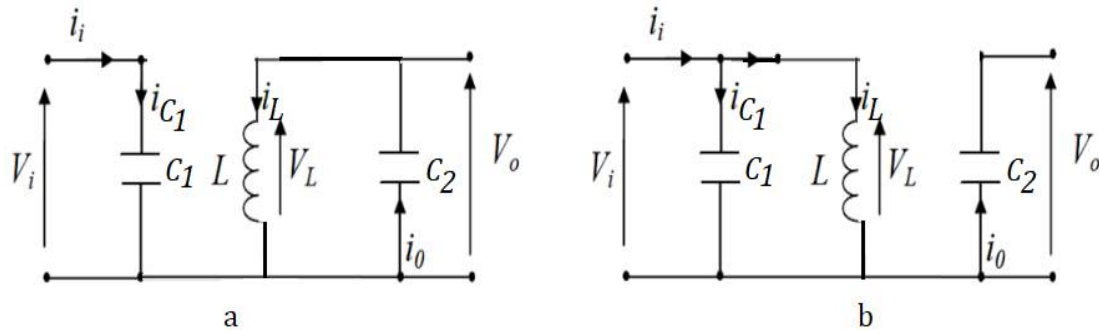


Fig.III.10 : Schéma équivalent du hacheur Buck-Boost

(a – commutateur ouvert , b – commutateur fermé).

L'application des lois de Kirchhoff aux circuits équivalents du convertisseur (fig.III.10 a et b), donne les systèmes d'équations suivants :

-Pour l'intervalle de temps $(d.T_s)$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad (III.9)$$

-Pour l'intervalle de temps $(1-d).T_s$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_o(t) \end{cases} \quad (III.10)$$

L'application de la relation (III.3) aux systèmes d'équations (III.9) et (III.10), donne le modèle mathématique (III.11) du hacheur Buck-Boost :

$$\begin{cases} i_o(t) = (1-d) i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d} (i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ v_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} - (1-d)v_o(t)) \end{cases} \quad (III.11)$$

III.4. Onduleur triphasé :

III.4 .2. Structure et éléments de base des onduleurs :

La figure (III.11) montre la structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension. Cet onduleur est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs électroniques montés en pont. Ces interrupteurs de

puissance se composent, selon la puissance commutée, de GTO (Gate Turn Off), de MOSFET de puissance ou d'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), en parallèle avec une diode (fig. III.11).

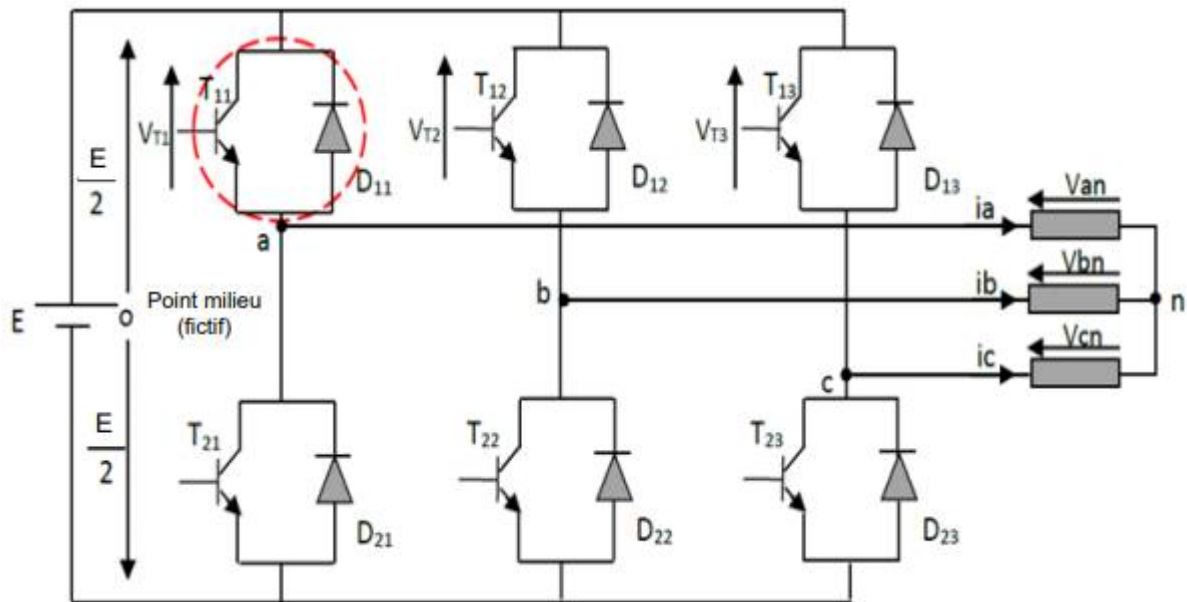


Fig.III.11: Schéma d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

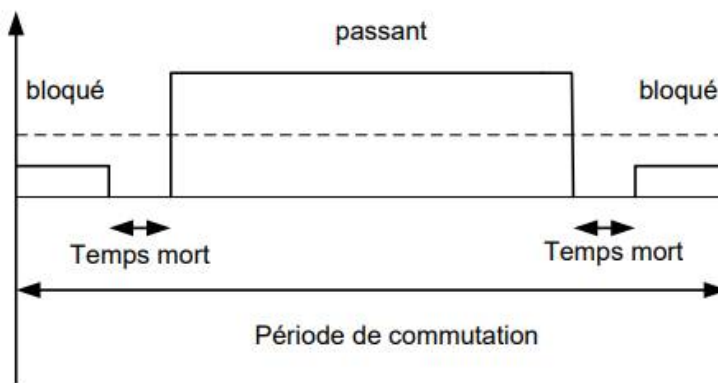


Fig.III.12 : Période de commutation d'un interrupteur

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée est équilibrée et couplée en étoile.

Pour cette structure, plusieurs types de commandes sont possibles, les plus utilisées sont :

- la commande à 120°.
- la commande à 180°.
- les commandes à modulation de largeur d'impulsion MLI.

III.4.3. Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tensions et de sa commande MLI :

L'onduleur est très utilisé avec la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables. Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer au récepteur dans les deux sens. L'onduleur de tension alimenté par une source de tension continue parfaite impose à sa sortie une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs. Le montage onduleur triphasé figure (III.11) est constitué de six interrupteurs bidirectionnels. Les couples d'interrupteurs de chaque bras sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statiques de la machine asynchrone, et pour éviter de court-circuiter la source continue. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche (voir l'ensemble T11, D11 sur la figure(III.1)). Puisque la charge triphasée est équilibrée, la somme des 3 tensions simples instantanées est nulle :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad (\text{III.12})$$

En supposant que la source de tension continue qui alimente l'onduleur possède un point milieu 'o' (fig.III.11) nous pouvons écrire les relations suivantes pour les 3 tensions simples :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

En faisant la somme des équations du système (III.13) et en utilisant (III.12), on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad (\text{III.14})$$

$$\text{D'où : } v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad (\text{III.15})$$

$$\text{Et on en déduit : } v_{on} = -\frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (\text{III.16})$$

En substituant l'équation (III.16) dans le système (III.13), on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Sachant que les interrupteurs statiques (S_k) de l'onduleur ne peuvent avoir que 2 états possibles $S_k = 1$ si l'interrupteur est fermé et $S_k = 0$ si l'interrupteur est ouvert, avec $k = a, b, c$, les tensions de branches V_{ko} peuvent être exprimées en fonction de S_k par :

$$V_{ko} = (2S_k - 1)\frac{E}{2} \quad (\text{III.18})$$

Après introduction de l'expression (III.18) dans le système (III.13) et simplification, on obtient le système matriciel (III.19) qui représente le modèle mathématique de l'onduleur à deux niveaux de tensions.

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

III.4.3.1. Modélisation de la commande MLI :

La commande de l'onduleur par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) permet de produire à partir d'une source de tension fixe, des tensions alternatives variables en amplitude et en fréquence, avec un faible taux d'harmoniques. La technique de commande MLI sinus-triangle va être développée dans cette section.

III.4.3.2. Commande MLI sinus – triangle :

La modulation de largeur d'impulsion 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. En triphasé, trois références sinusoïdales de même fréquence f_s et déphasées entre elles de $2\pi/3$ rad sont nécessaires pour réaliser la commande MLI. La figure (III.13) montre le schéma de principe de la commande MLI Sinus Triangle (MLIST).

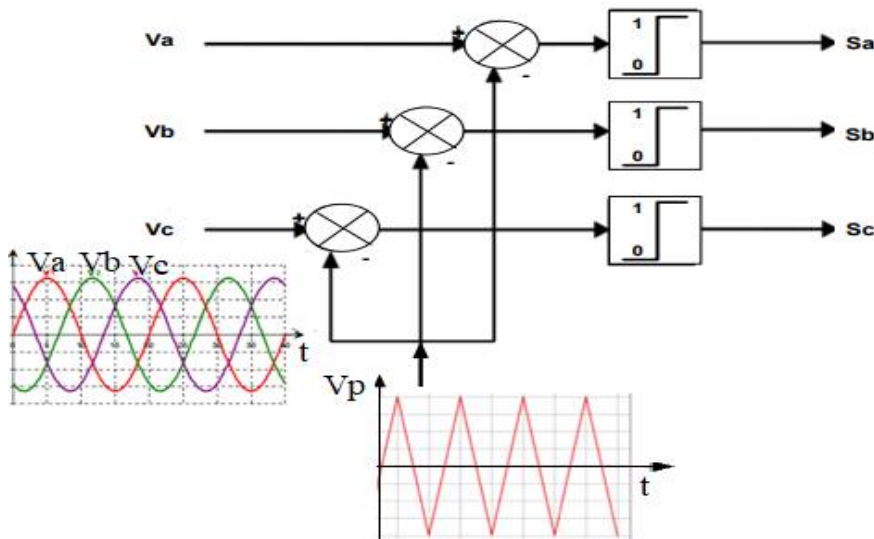


Fig.III.13: Principe de la commande MLIST.

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{aligned}
 V_a(t) &= V_m \sin(\omega t) \\
 V_b(t) &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 V_c(t) &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{III.20}$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left[4 \cdot \left(\frac{t}{T_p} \right) - (4n + 1) \right] & \text{si } t \in \left[n T_p, \left(n + \frac{1}{2} \right) T_p \right] \\ V_{pm} \left[-4 \cdot \left(\frac{t}{T_p} \right) + (4n + 3) \right] & \text{si } t \in \left[\left(n + \frac{1}{2} \right) T_p, (n + 1) T_p \right] \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

$$n \in \mathbb{N}$$

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison des trois composantes de la tension de référence $V_{a,b,c}(t)$ avec la porteuse $V_p(t)$ afin de calculer les états des interrupteurs de l'onduleur. Ces états (S_a, S_b, S_c) sont donnés par l'expression (III.22).

$$S_{a,b,c} = \begin{cases} 1 & \text{si } V_{a,b,c}(t) \geq V_p(t) \\ 0 & \text{si } V_{a,b,c}(t) < V_p(t) \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

La technique MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation f_p sur la fréquence de référence f_r , $m = f_p / f_r$
- Le taux de modulation r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_r) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_p), $r = V_r / V_p$

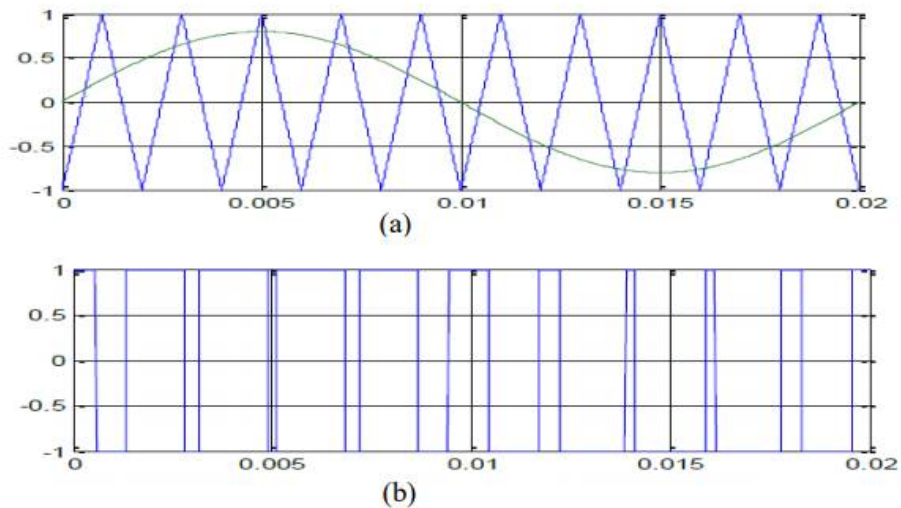


Fig.III.14: Technique de commande de l'onduleur par MLI

(a) tension de référence sinus et porteuse triangle

(b) Impulsions modulées obtenues.

III.6. Commande de la machine asynchrone : [13]

Grâce à son faible coût et sa simplicité de construction, conjugués aux techniques de variation de vitesse, la machine asynchrone s'impose de plus en plus dans les domaines de l'entraînement à vitesse variable. La figure (III.15) donne le schéma synoptique d'une commande en vitesse variable.

Nous allons présenter dans ce chapitre les techniques de commande permettant de faire varier la vitesse des machines asynchrones à cage.

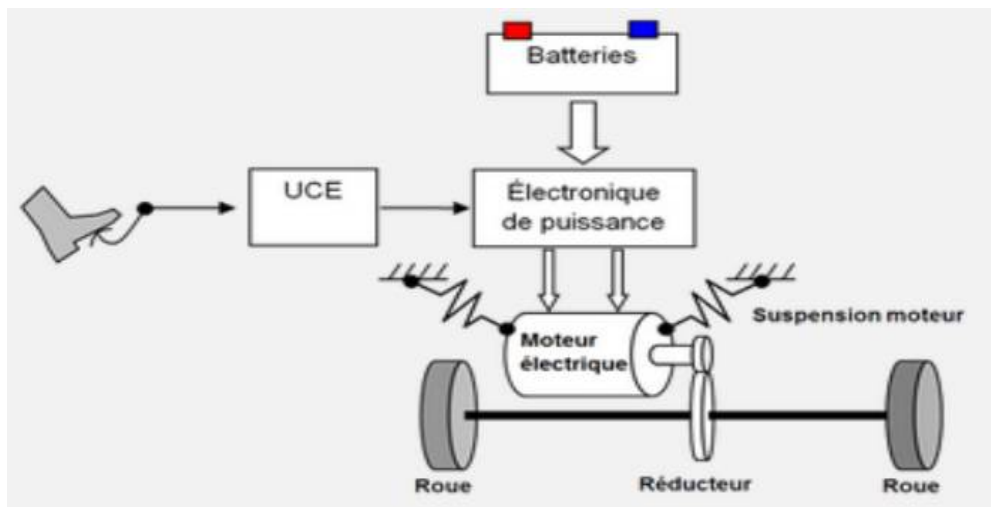


Fig.III.15 : Commande en vitesse du VE

La machine à cage d'écureuil possède un défaut important par rapport à la machine à courant continu et à la machine de type synchrone. En effet, l'alimentation par une seule armature (stator) fait que le même courant crée le flux et le couple. Il est donc logique de dire que toute commande de ce moteur ne peut se faire qu'à travers la variation des paramètres de l'onde tension (alimentation en tension) ou de l'onde courant (alimentation en courant).

Les variateurs de vitesse pour moteur asynchrone peuvent être divisés en deux groupes :

- Variateurs de vitesse à fréquence constante
- Variateurs de vitesse à fréquence variable

Le contrôle de la vitesse à fréquence statorique constante est obtenu par la variation de l'amplitude de la tension d'alimentation (ou du courant).

Les variateurs de vitesse à fréquence variable sont divisés en trois groupes selon la méthode de commande appliquée.

III.6.1. Commande scalaire :

Très répandue dans le domaine de l'industrie elle est connue comme l'une des premières commandes réalisant la variation de vitesse des moteurs asynchrones, elle se base sur l'amplitude de la variable contrôlée et non à sa phase, soit deux types de commande scalaire sont considérés :

- ✓ La commande scalaire indirecte où on utilise le rapport amplitude/fréquence de la tension ou du courant, pour contrôler le flux magnétique.
- ✓ La commande scalaire directe où le flux magnétique est contrôlé à partir de son estimation ou de sa mesure.

La deuxième méthode étant plus difficile à mettre en œuvre, on s'en tiendra uniquement à la description de la première méthode et qui est d'ailleurs la plus utilisée. En régime statique, le couple est déterminé selon l'équation

$$C_e = 3P \frac{\varphi_r^2}{R_r} \omega_r \quad (\text{III.23})$$

Cette équation montre que si le flux est maintenu constant, on obtient une caractéristique de commande rappelant celle de la machine à courant continu où le rôle du courant d'induit est joué par la résistance rotorique R_r , et en négligeant la chute de tension ohmique dans le bobinage statorique, le flux Ψ_r de pulsation rotorique ω_r peut être maintenu constant si la tension statorique reste proportionnelle à la pulsation. Toutefois cette hypothèse n'est plus appropriée aux basses vitesses et il faut alors imposer à la tension statorique une valeur plus grande que celle que donnerait un rapport (tension/pulsation) constant. En commande scalaire indirecte, l'erreur de vitesse permet par l'intermédiaire d'un régulateur PI de générer la pulsation ω_{sl} qui, ajoutée à la pulsation ω_r donne la pulsation ω_s des tensions statoriques. Ensuite, la loi (u/f) constant est appliquée pour déterminer la tension statorique de référence V_s . Cette stratégie de

commande permet d'avoir de bons résultats pour des consignes de vitesse constantes. Contrairement, pour un démarrage ou pour une inversion de sens de rotation du moteur, on obtient de grandes oscillations du flux avec de grandes amplitudes et un module variable durant les régimes transitoires. C'est pour cette raison que les relations utilisées pour calculer cette commande ne sont valables que dans le régime permanent. Ces oscillations vont se répercuter sur la qualité du couple et la vitesse, dégradant ainsi les performances en régime transitoire du moteur. Ce type de commande n'est donc utilisé que pour les applications où la variation de vitesse n'est pas grande telle en pompage ou en ventilation, cependant il est inadapté lorsque l'on veut réaliser un positionnement de la machine comme en robotique ou en commande numérique de machine outils. Ceci a conduit les chercheurs à développer des techniques plus performantes telles que la commande vectorielle, et la commande directe du couple objet de notre étude.

III.6.2. Commande vectorielle à flux orienté (FOC) :

Proposé par Blaschke en 1972, elle constitue une révolution historique pour la commande de la machine asynchrone. Cette technique consiste à ramener l'attitude de la machine asynchrone, pour la variation de vitesse, à celui du moteur à courant continu, en faisant un découplage entre le flux et le couple électromagnétique. Cette stratégie utilise deux boucles de régulation pour contrôler en même temps le couple et le flux. Mais cette commande a des inconvénients tels que le volume de traitement informatique nécessaire pour son implémentation, et la nécessité d'une bonne identification des paramètres du moteur utilisé, elle est sensible aux variations des paramètres de la machine, comme la résistance rotorique qui change considérablement avec la température. La différence entre les paramètres utilisés par l'algorithme de la commande vectorielle, et les paramètres réels de la machine conduit à des erreurs dans les valeurs de sortie du flux et du couple, ce qui conduit à l'augmentation des pertes dans la machine et la diminution des performances du système commandé.

III.6.3. Commande directe du couple (DTC) : [13]

La technique de commande directe du couple (Direct Torque Control) ou (DTC) est apparue dans la deuxième moitié des années 1980 comme concurrentielle des méthodes classiques, basée sur une alimentation à modulation de largeur d'impulsion (MLI) et sur un découplage de flux et de couple par orientation du flux magnétique. La DTC, qui est simple à mettre en œuvre, est une technique de commande qui assure un découplage du flux et du couple. Elle présente des avantages déjà bien connus par rapport aux techniques classiques. Notamment en ce qui concerne la réduction du temps de réponse du couple, l'amélioration de sa robustesse par rapport aux variations des paramètres rotoriques, l'imposition directe de l'amplitude des ondulations du couple et du flux statorique, l'absence de transformations de Park. D'autre part, cette loi de commande en couple s'adapte par nature à l'absence de capteur mécanique (vitesse, position). Beaucoup de travaux ont été faits par les chercheurs dans ce domaine dont le but d'améliorer la technique de base énoncée par Takahashi.

III.6.2.Principe de la commande direct du couple DTC [13]:

La commande directe du couple est basée sur la détermination directe de la séquence de commande à appliquer à un onduleur de tension. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation de régulateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et le couple électromagnétique.

L'état de ces grandeurs nous permet de définir le vecteur tension statorique à appliquer à la machine asynchrone pour maintenir au mieux le couple et le flux dans leurs bandes d'hystérésis. Une variable intervenant également dans le choix des tensions est la position du vecteur statorique dans le plan complexe. Pour cela, le plan est divisé en six secteurs et quelquefois en douze. Le schéma de principe de cette technique est indiqué sur la figure (III.16). Sur cette figure sont représentés les estimateurs de flux et de couple, ainsi que les régulateurs par

hystérésis du couple et du flux. La position du vecteur flux est calculée à partir de leurs estimations.

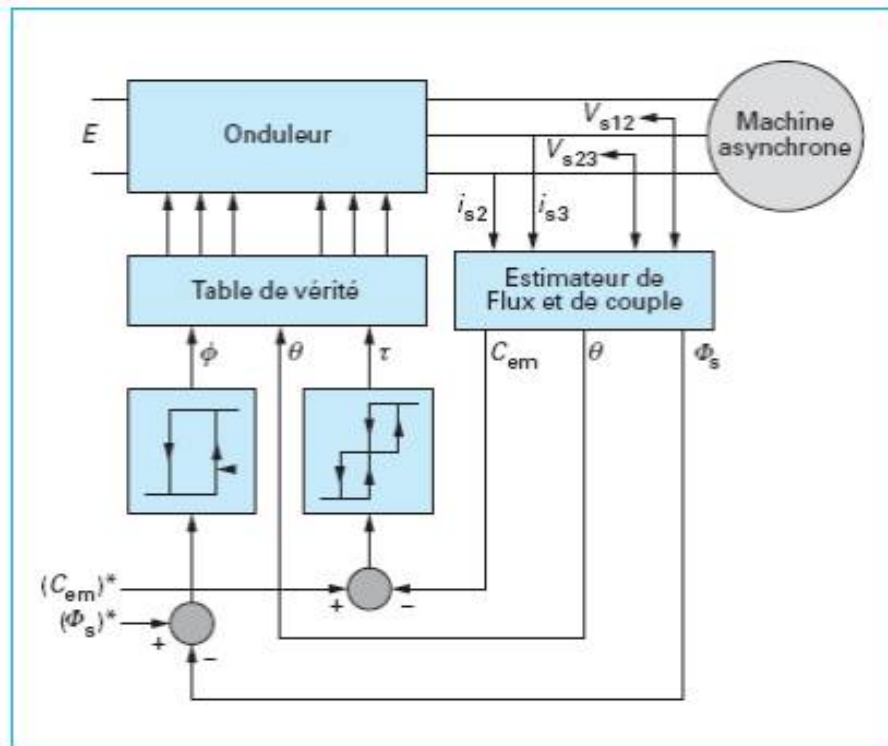


Fig. III.16: Schéma structurel de la technique DTC appliquée à une machine asynchrone[13].

III.6.3. Contrôle de flux et de couple :

- **Contrôle de flux :** On se place dans un repère fixe (α, β) lié au stator de la machine. Le flux statorique peut être obtenu par l'équation suivante :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} \Rightarrow \bar{\varphi}_s = \bar{\varphi}_{s0} + \int_0^t (\bar{V}_s - R_s \bar{I}_s) dt \quad (III.23)$$

Si on néglige la chute de tension due à la résistance R_s et par discrétisation des variables l'équation (III.23) donne :

$$\bar{\varphi}_s(k+1) \approx \bar{\varphi}_s(k) + \bar{V}_s T_e \Rightarrow \Delta \bar{\varphi}_s \approx \bar{V}_s T_e \quad (III.24)$$

$\overline{\varphi}_s(k)$: vecteur flux statorique au pas d'échantillonnage actuel,

$\overline{\varphi}_s(k + 1)$: vecteur flux statorique au pas d'échantillonnage suivant,

$\Delta\overline{\varphi}_s = \overline{\varphi}_s(k + 1) - \overline{\varphi}_s(k)$: vecteur variation de flux statorique,

T_e : période d'échantillonnage.

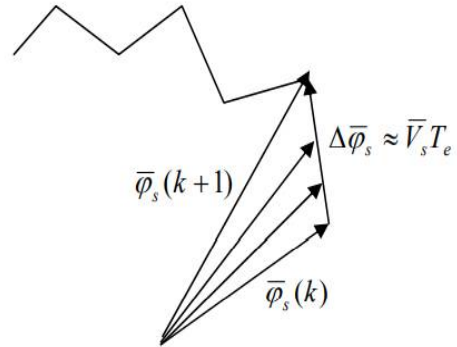


Fig. III.17 : Evolution du vecteur flux dans le plan α, β .

La relation (III.24) montre que la vitesse de rotation du flux est égale à la tension statorique appliquée. L'application d'un vecteur tension colinéaire avec le vecteur flux agit directement sur l'amplitude de ce dernier. En revanche, si on applique un vecteur tension en quadrature avec le flux, il agit sur la phase du flux et provoque soit une accélération, soit une décélération du vecteur flux. Enfin, si on applique une tension nulle (V0 ou V7), le vecteur flux reste fixe.

- **Contrôle de couple :**

Le couple électromagnétique est proportionnel au produit vectoriel du flux statorique par le flux rotorique (III.25) :

$$C_e = k(\overline{\varphi}_s \wedge \overline{\varphi}_r) = k|\overline{\varphi}_s||\overline{\varphi}_r|\sin(\theta) \quad \text{(III.25)}$$

L'angle θ est le déphasage entre les deux flux. Le flux statorique est la somme du flux rotorique et de flux de fuites totales. Les dynamiques de ces deux composantes ne sont pas les mêmes :

- Le flux de fuites a une dynamique rapide suite aux variations de la tension, car les inductances de fuites sont faibles.

- Le flux rotorique, dépendant de l'inductance magnétisante, a une dynamique plus lente, environ dix fois plus lente en référence au coefficient de dispersion σ dont la valeur moyenne est d'environ 0,1.

Dans ces conditions, on peut supposer qu'entre deux commutations, le flux rotorique reste constant. Par contre, le flux statorique est directement affecté par les variations des flux de fuites. Donc le couple dépend uniquement du produit $|\overline{\varphi_s}| \sin \theta$. Comme l'amplitude du flux statorique varie assez peu, la variation du couple peut être réalisée par variation de l'angle θ .

III.6.4.Stratégie de commande directe du couple (DTC) :

La commande directe du couple est basée sur l'algorithme suivant :

- Le domaine temporel est divisé en périodes de durée T_e ($T_e \leq 50\mu s$)
- A chaque coup d'horloge, on mesure les courants et les tensions de ligne
- On reconstitue les composantes du vecteur flux statorique
- On estime le couple grâce à la relation suivante :

$$C_e = P(\varphi_{s\alpha} I_{s\beta} - \varphi_{s\beta} I_{s\alpha}) \quad (III.26)$$

On détermine le vecteur tension à appliquer à la machine selon une logique appropriée. La figure (III.18) donne une approche de la commande DTC.

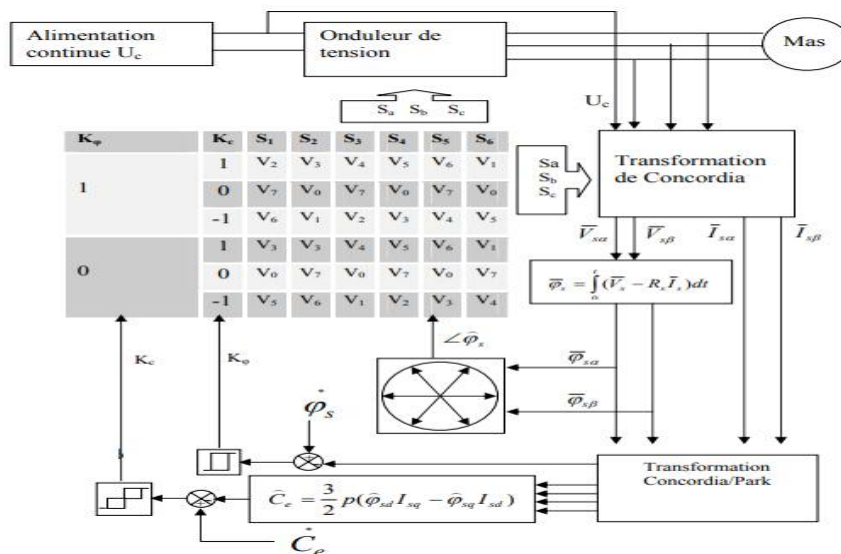


Fig. III.18: Schéma synoptique de la commande DTC.

III.5. Etude et modélisation du système PV

Pour l'instant, les procédés de stockage d'énergie utilisés dans les véhicules tout électriques ne permettent pas de rivaliser avec leurs homologues thermiques : faible autonomie, longues périodes de recharge, prix d'achat important, etc..., il est donc nécessaire de lever ce verrou technologique pour permettre le développement des voitures électriques (VE). [13]

Parmi les solutions proposées c'est l'hybridation des batteries Li-ion avec une source de puissance supplémentaire comme le photovoltaïque par exemple.

L'élément de base d'un système PV est la cellule solaire. La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle les cellules pour obtenir des modules de puissance compatible avec la charge. Les modules sont ensuite connectés en série pour former une chaîne. Les chaînes sont connectées en parallèle pour former un générateur photovoltaïque (champ PV). [14]

III.5. .1. Définition de la cellule Photovoltaïque (PV) :

Les cellules PV sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », la cellule PV a été découverte par E. Becquerel en 1839. Elle est réalisée à l'aide de matériaux semi-conducteurs.

III.5.2.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La cellule solaire est une photodiode à jonction PN (fig.III. 19) de grande surface qui génère un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire. Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photoélectrique. La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés : l'absorption de la lumière dans le matériau, le transfert d'énergie des photons aux charges électriques et la collecte des charges.

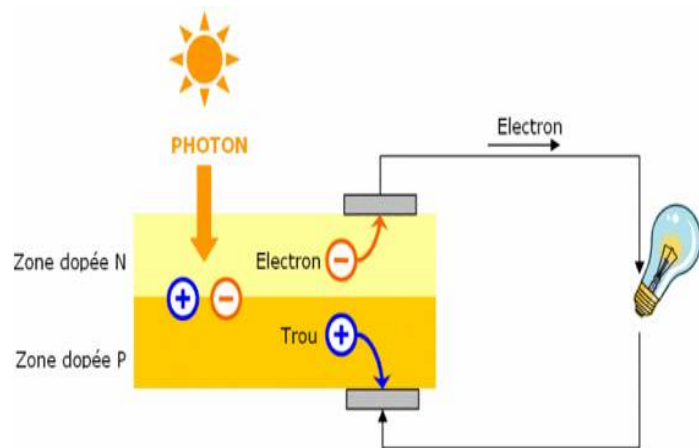


Fig.III.19 : Principe

de fonctionnement d'une cellule solaire

III.5.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

- **Tension de circuit ouvert V_{co}** : Si on place une cellule sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6V, appelée tension en circuit ouvert V_{co} (elle varie légèrement avec l'éclairement). Cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait qu'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction PN. Pour obtenir une tension plus élevée à la sortie du module, il va falloir associer les cellules en série
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : A l'inverse du cas précédent, si l'on place une cellule en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit I_{cc} . De même que pour la tension, il faudra associer les cellules en parallèle pour augmenter significativement la valeur de l'intensité en sortie du module.
- **Puissance** : Le but recherché par tous les utilisateurs de générateurs photovoltaïques est que l'énergie produite soit la plus optimale possible. Pour l'éclairement considéré, le point de puissance maximale représente le point où la puissance de la cellule est maximale. Ce point, est associé à une tension maximale V_{pm} et à une intensité maximale I_{pm} . C'est cette puissance qui sera toujours recherchée par des régulateurs de charge afin

d'optimiser la charge de la batterie et le fonctionnement du générateur. Ce régulateur est appelé **MPPT** (Maximum Power Point Tracking). Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement, on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête W_c .

- **Rendement** : Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite P_m et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module.

III.5.4. La commande MPPT :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV, il permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV, sachant que ce point dépend toujours des conditions météorologiques et de la variation de la charge. Son principe est basé sur la régulation automatique du rapport cyclique α des impulsions de commande du convertisseur DC-DC à la valeur adéquate de manière à délivrer continuellement le maximum de puissance à la sortie du panneau PV.

III.5.5. Méthode de perturbation et observation (P&O) :

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et de courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et de la température.

Comme son nom l'indique le principe de la méthode P&O est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k , puis on la compare à la puissance précédente de l'instant $(k - 1)$. Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale (P_{MP}) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même

sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale, alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique.

III.5. 6. Modélisation des cellules PV :

La modélisation des cellules PV passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module PV. Parmi ces modèles on peut citer les suivants :

a-Modèle à une diode

- Modèle à trois paramètres (L3P)
- Modèle à quatre paramètres (L4P).
- Modèle à cinq paramètres (L5P)

b- Modèle à deux diodes

- Modèle à sept paramètres (2M7P).
- Modèle à six paramètres (2M6P).
- Modèle à cinq paramètres (2M5P).

Dans notre modélisation, nous utiliserons le modèle à une diode et à cinq paramètres (L5P). La figure (III.20) représente le schéma équivalent du modèle.

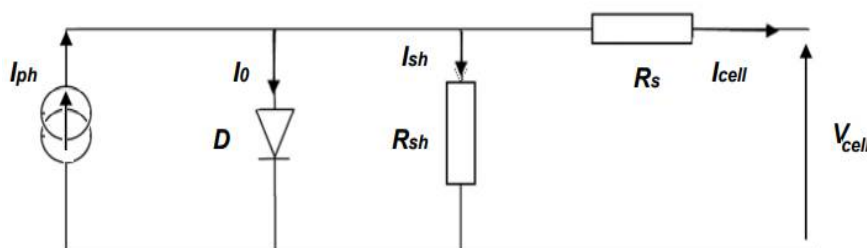


Fig. III.20: Schéma équivalent de la cellule solaire.

L'équation des courants du modèle à une diode est la suivante:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 - I_{sh} \quad (III.27)$$

Avec :

I_{cell} : courant délivré par la photopile.

I_{ph} : photo courant.

I_0 : courant de la diode.

I_{sh} : courant shunt

Le courant I_{ph} d'une cellule PV dépend de la température et de l'ensoleillement ainsi que du coefficient de température du courant de court circuit généralement donné dans les références du constructeur. Le courant I_{ph} a pour expression générale :

$$I_{ph} = \left(I_{sc} + k_i(T + T_{ref}) \right) \frac{G}{G_{ref}} n \quad (III.28)$$

I_{sc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

k_i [A/K] : coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule à 25°C et 1000 W/m² ($k_i = 0.0032$).

T [K] : Température de fonctionnement.

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule.

T_{ref} [K] : Température de référence (ambiante) (25°C + 273°C = 298K).

G_{ref} [W/m²] : Irradiation de référence (1000 W/m²).

Courant de saturation inverse de la diode :

Le courant de saturation inverse de la diode qui représente la valeur asymptotique du courant I en polarisation inverse, dépend de la température et de la largeur de bande d'énergie du matériau de la cellule solaire :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_{g0} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{A K} \right] \quad (III.29)$$

I_{rs} [A] : courant inverse de saturation

q [C] : charge de l'électron (1.6×10^{-19} C)

E_{g0} [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV) pour le silicium polycristallin à 25°C).

A : facteur d'idéalité de la jonction (diode) (1,3) ($1 < A < 2$)

K [J/K] : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$)

Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) est donné par l'expression suivante :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{A N_s K T}\right) - 1} \quad (\text{III.30})$$

avec :

V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

Le courant dans la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{v + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{III.31})$$

I [A] : courant débité par le module .

v [V] : tension aux bornes du module.

Le courant total débité par le module est donné par:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{v + R_s I}{A N_s K T}\right) - 1 \right) - \frac{v + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{III.32})$$

Remarque: pour N_p modules connectés en parallèle le courant I est multiplié par N_p :

$$I_{tot} = N_p I \quad (\text{III.33})$$

Pour N_s modules connectés en série la tension V est multipliée par N_s :

$$V_{tot} = N_s v \quad (\text{III.34})$$

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les études théoriques et les modèles mathématiques nécessaires à la simulation des différents systèmes qui composent la chaîne de puissance du VE. Les résultats de simulation seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

*Résultats de simulation et
interprétations*

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les schémas de simulation des différents étages essentiels de la chaîne de puissance du VE, avec l'interprétation des graphes de variations des différentes grandeurs obtenus par simulation. Les parties simulées sont les systèmes convertisseurs DC-DC et DC-AC représentés par le hacheur buck-boost qui relie la batterie de traction (400V) avec la batterie de servitude (12 à 14V) et l'onduleur pour alimenter le moteur asynchrone (MAS) de traction avec des tensions sinusoïdales triphasées, vient ensuite le système de la commande du moteur par la technique DTC. Nous terminerons par la source d'énergie photovoltaïque proposée pour l'hybridation et le circuit de charge de la batterie de servitude avec la commande MPPT.

IV.2 Simulations du convertisseur DC/DC :

Le convertisseur DC-DC est utilisé comme étage d'adaptation entre la batterie de traction (400V) et la batterie de servitude (12 à 14V ou autre) ou entre la batterie de traction et l'onduleur triphasé. Dans ce travail, nous avons simulé un convertisseur de type Buck-Boost qui peut travailler en régime abaisseur ou en régime élévateur et qui est contrôlé par une boucle de régulation de type PI. La figure IV.1 montre le schéma de simulation réalisé sous Matlab/Simulink et Simpower.

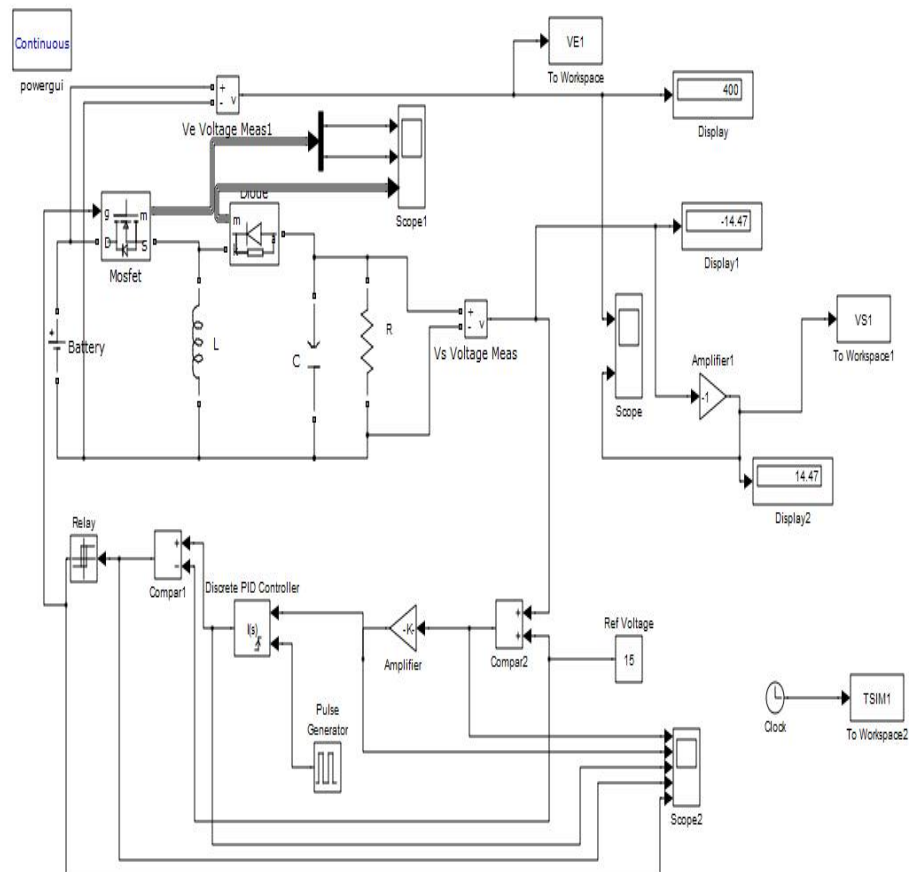


Fig. IV.1 Schéma de simulation du hacheur buck-boost avec boucle de régulation PI.

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont donnés par le tableau suivant :

Tension d'entrée V_e	400V puis 200 V
Résistance de charge R	10 Ohm
Capacité de filtrage C	40 mF
Inductance L	10 μ H
Tension de référence V_{ref} (consigne)	15V puis 400V

Tableau(IV.1): Paramètres du convertisseur DC/DC.

IV.2.1. Résultats de la simulation :

IV.2.1.1. Hacheur en régime dévolteur (Buck) :

Ce hacheur est utilisé pour charger la batterie de servitude (12 V à 14 V ou autre) à partir de la batterie de traction (400 V).

Les tensions d'entrée $V_e(t)$ et de sortie $V_s(t)$ du convertisseur en régime dévolteur (abaisseur) sont données par la figure (IV.2).

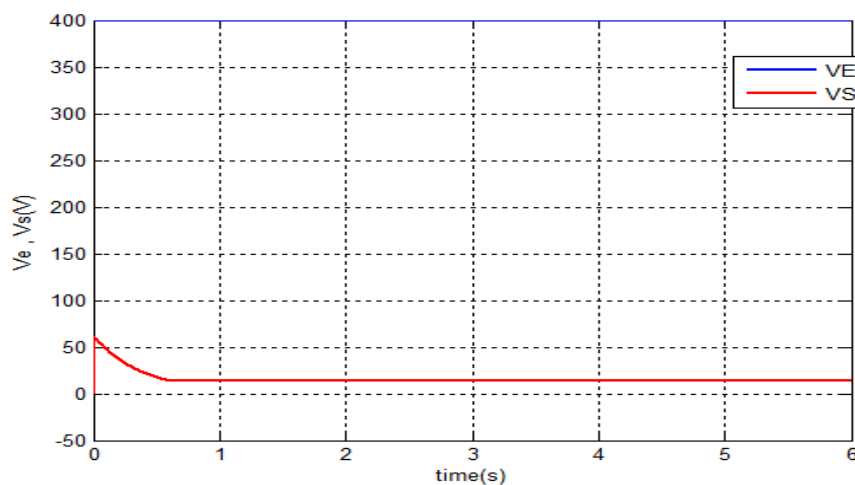


Fig. IV.2 : Les tensions d'entrée (VE) et de sortie (VS) en régime abaisseur.

IV.2.1.1 Interprétation des résultats de simulation:

Nous constatons, d'après la figure IV.2, que lorsque la tension de référence est fixée à 15 V, la tension de sortie V_s passe par un pic de 60 V puis décroît pendant un temps assez court (régime transitoire) pour se stabiliser à 14.47V en régime permanent. Le hacheur fonctionne bien en abaisseur et permet de passer d'une tension de 400 V à l'entrée imposée par la batterie de traction à une tension de 14,47 V à la sortie et qui est suffisante pour recharger la batterie de servitude et pour alimenter les circuits auxiliaires du véhicule. Pour diminuer encore plus le temps de réponse il est nécessaire de revoir le réglage des paramètres de la boucle de régulation PI.

IV.2.1.2. Hacheur en régime survolteur (Boost) :

Ce régime de fonctionnement du hacheur peut être utilisé pour élever la tension dans le cas où la batterie de traction a une tension inférieure à celle du moteur du véhicule. Par exemple batterie de traction de 200 V et moteur asynchrone triphasé alimenté par un système de tensions équilibrées de 400 V entre phases.

Les tensions d'entrée $V_e(t)$ et de sortie $V_s(t)$ du convertisseur en régime survolteur (élévateur) sont données par la figure IV.3.

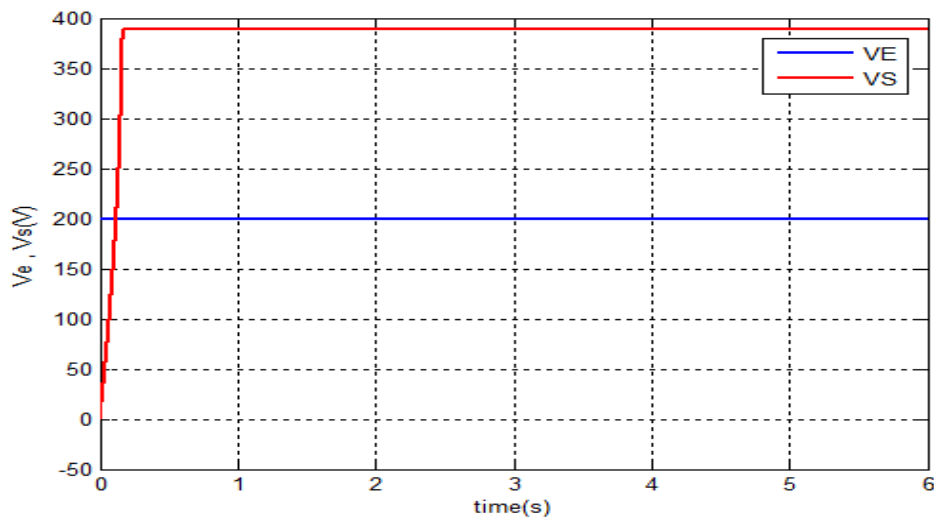


Fig. IV.3 : Les tensions d'entrée (V_e) et de sortie (V_s) en régime élévateur.

IV.2.1.2.1. Interprétation des résultats de simulation:

Nous constatons, d'après la figure IV.3, que lorsque la tension de référence est fixée à 400 V, la tension de sortie V_s croît pendant un temps très court (régime transitoire) pour se stabiliser à 388,7 V en régime permanent. Le hacheur fonctionne bien en élévateur et permet de passer d'une tension de 200 V à l'entrée imposée par la batterie de traction à une tension de 388,7 V à la sortie et qui est suffisante pour alimenter le moteur du véhicule si celui-ci nécessite une tension d'environ 400 V entre phases.

- **Commentaire :**

La comparaison entre les résultats obtenus dans les deux cas de régimes de fonctionnements du convertisseur DC/DC montre que la précision sur la tension de sortie V_s comparée à la tension de référence V_{ref} est très bonne aussi bien pour le dévolteur que pour le survolteur. Pour diminuer encore plus le temps de réponse du convertisseur il est nécessaire de revoir le réglage des paramètres de la boucle de régulation PI.

IV.3. Simulation de l'onduleur triphasé :

Pour générer le système de tensions triphasées nécessaire à l'alimentation du moteur asynchrone triphasé à partir de la tension continue obtenue à la sortie du convertisseur DC/DC, nous avons simulé un onduleur triphasé à deux niveaux de tensions. Cet onduleur est constitué de six interrupteurs électroniques (transistors MOSFET) montés en pont (figure III.11 et III.12).

Il y'a deux types de commande, la commande à 120° et la commande sinus-triangle. Dans notre travail nous avons présenté la deuxième commande. A la sortie nous avons placé un filtre triphasé de type LC intercalé entre l'onduleur et la charge résistive triphasée pour éliminer les harmoniques supérieures.

IV.3.1.Simulation de l'onduleur triphasé avec commande sinus-triangle :

La figure IV.3 donne le schéma de simulation de l'onduleur triphasé avec la commande sinus-triangle réalisé sous Matlab/Simulink et Simpower.

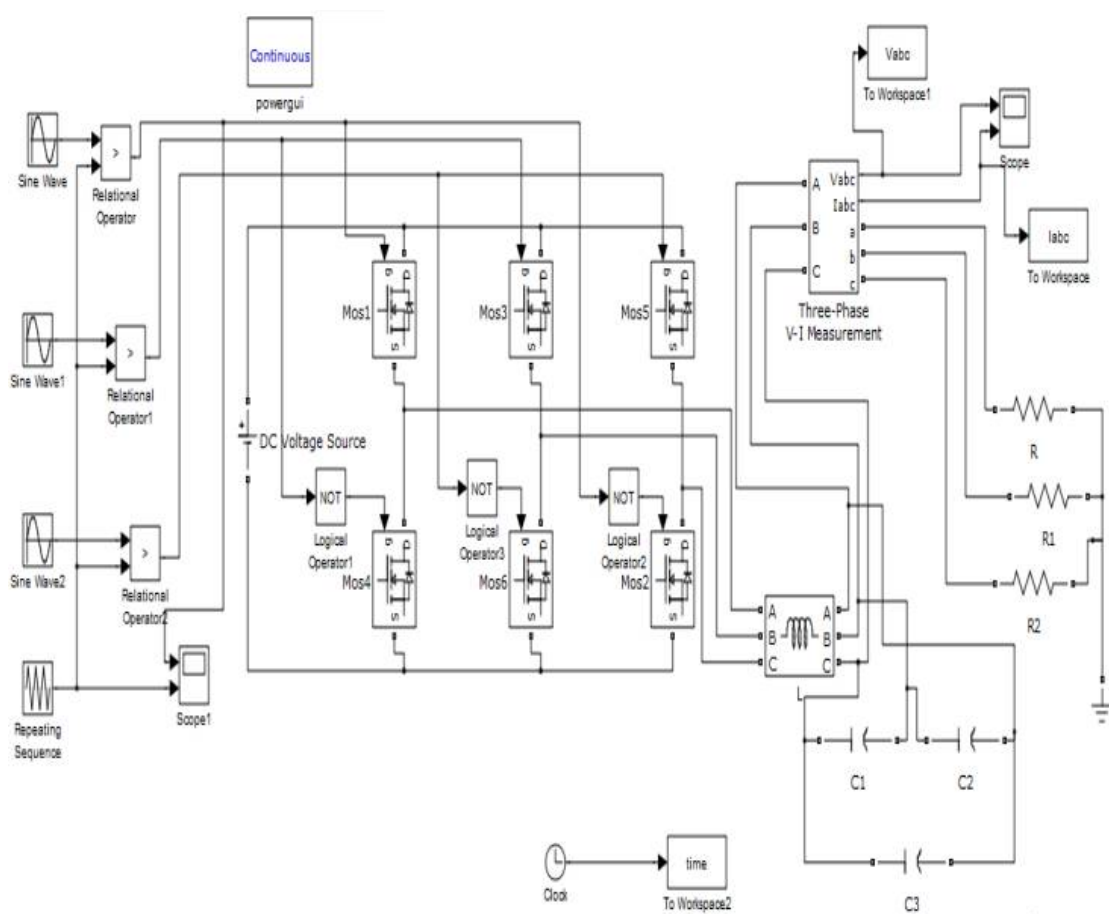


Fig.IV.4 : Schéma de simulation de l'onduleur triphasé.

Les paramètres utilisés sont donnés par le tableau suivant :

Charge triphasée résistive, couplage étoile	$R=10 \Omega$ par branche
Filtre triphasé LC	$C=360 \mu\text{F}$, $L=5,6 \text{ mH}$
Transistor de puissance	type MOSFET
Tension entrée (V_e)	400 V, DC
Signal sinusoïdal (modulante)	amplitude=1V, fréquence=50 Hz, les 3 signaux sont dans l'ordre déphasés de $2\pi/3$ rd, l'un par rapport à l'autre
Signal triangulaire (porteuse)	amplitude variable (à régler), fréquence= 4 kHz

Tableau IV.2 : Paramètres des composants de l'onduleur triphasé

IV.3.1.1. Résultat de la simulation :

Les figures IV.4 et IV.5 montrent respectivement les variations du système de tensions triphasées composées U_{abc} et celles du système de tensions simples V_{abc} en fonction temps à la sortie de l'onduleur et avant filtrage.

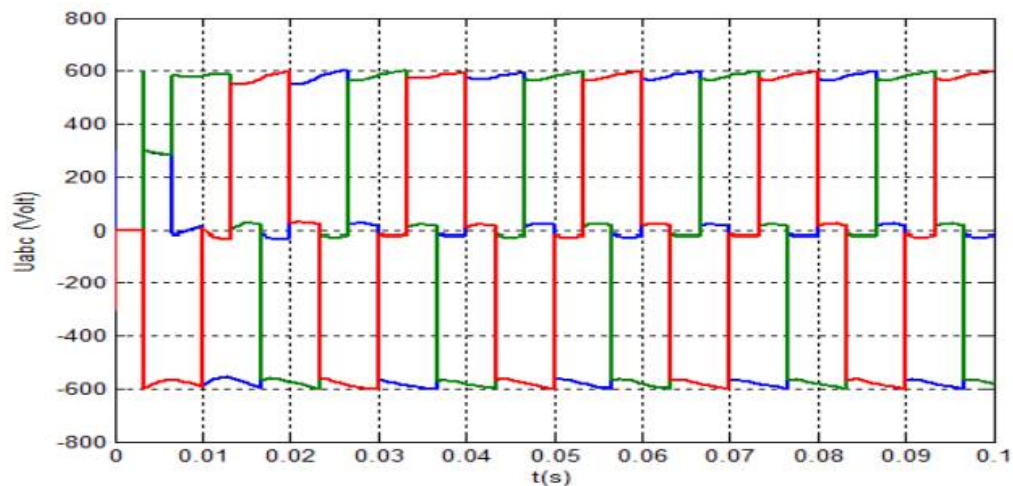


Fig. IV.5 : Graphe des tensions composées $U_{abc}(t)$ avant filtrage.

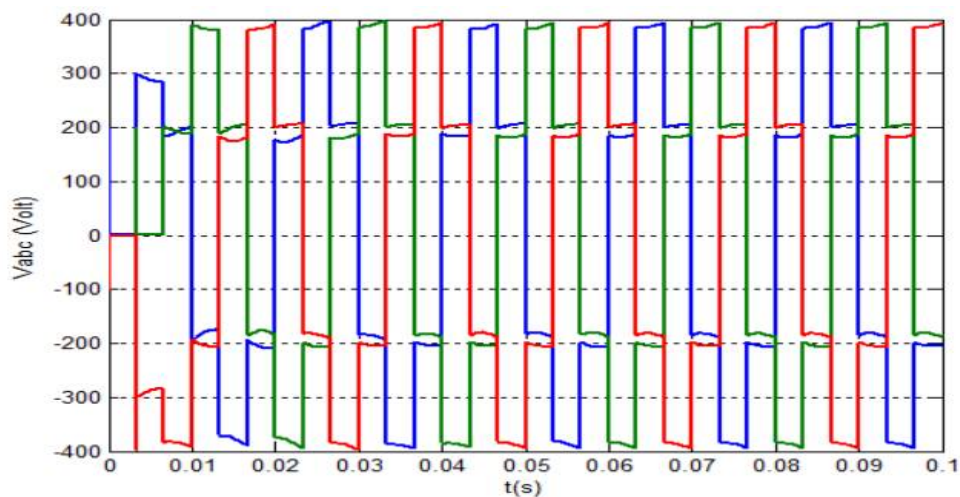


Fig. IV.6 : Graphe des tensions simples $V_{abc}(t)$ avant filtrage

Les figures IV.6, IV.7 et IV. 8 montrent respectivement les variations des systèmes de tensions triphasées composées U_{abc} et simples V_{abc} en fonction du temps, et les variations des courants triphasés $I_{abc}(t)$ débités dans la charge résistive, après filtrage.

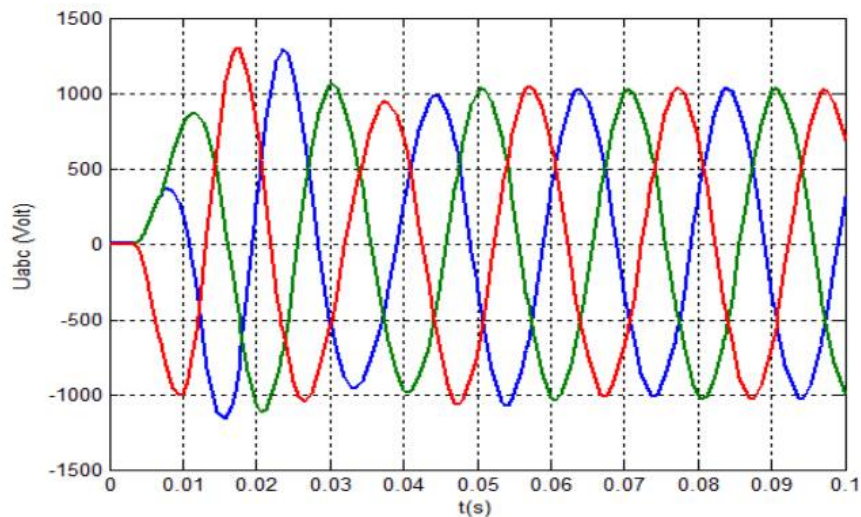


Fig. IV. 7 : Graphe des tensions composées $U_{abc}(t)$ après filtrage.

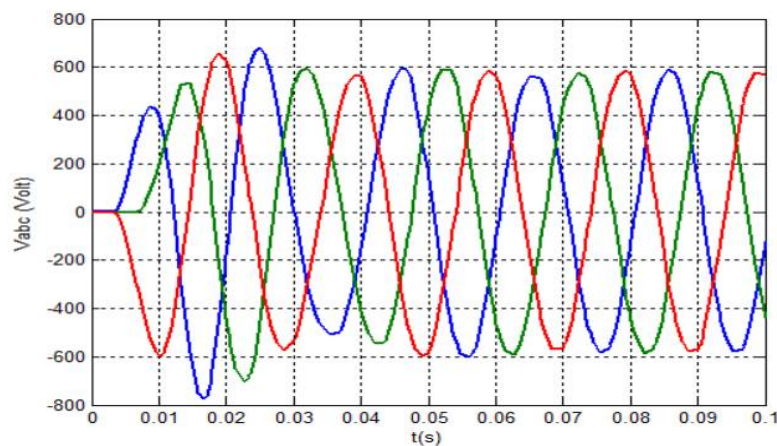


Fig. IV.8 : Graphe des tensions simples $V_{abc}(t)$ après filtrage.

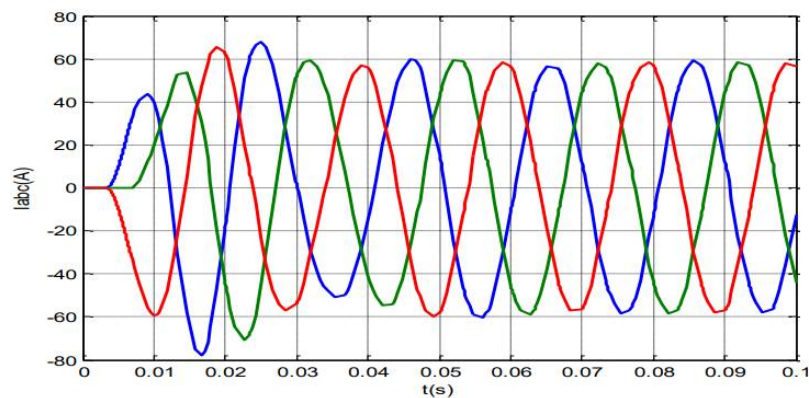


Fig. IV.9 : Graphe des courants triphasés $I_{abc}(t)$ après filtrage.

IV.3.1.2. Interprétation des résultats de simulation :

Les figures (IV.4) et (IV.5) montrent que les variations des tensions composées U_{abc} et celles des tensions simples $V_{abc}(t)$ obtenues avant filtrage

étant composées de plusieurs harmoniques ne sont pas sinusoïdales et ont une forme en escaliers asymétriques qui varie en fonction de la modulation de la largeur des impulsions de commande (MLI). Les figures (IV.6) et (IV.7) montrent les variations des tensions $U_{abc}(t)$ et $V_{abc}(t)$ qui se rapprochent de la forme sinusoïdale après filtrage. Le filtrage a permis d'éliminer quelques harmoniques supérieures et de lisser les courbes.

Une analyse harmonique serait toutefois utile pour améliorer le filtrage et permettre un fonctionnement du moteur asynchrone triphasé uniquement sous la fréquence de 50 Hz car les autres fréquences pourraient être la cause d'une mauvaise marche et d'un échauffement du moteur.

IV.4. Simulation de la technique DTC de la MAS triphasée :

Le tableau suivant donne les paramètres de la MAS triphasée utilisée dans la simulation.

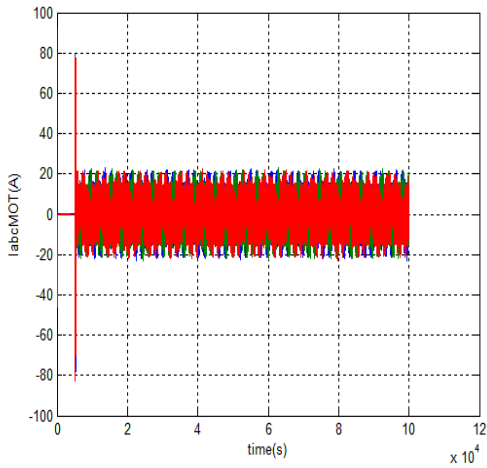
Moteur asynchrone triphasé	rotor en court-circuit (cage d'écureuil)
Nombre de pôles	4
Puissance nominale	40 kW (54 hp)
Vitesse nominale	1430 tr/mn
Tension d'alimentation	U = 400 V (entre lignes, valeur efficace)
Fréquence	$f=50\text{Hz}$
Couplage	étoile
Facteur de puissance	0,8
Résistance et inductance statorique (bobinage/phase)	$R_s = 1,405 \Omega$, $L_s = 5,839 \text{ mH}$
Résistance et inductance rotorique	$R_r = 1,395 \Omega$, $L_r = 5,839 \text{ mH}$
Inductance mutuelle	$L_m = 0,1722 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0,0131 \text{ kg.m}^2$
coefficient de friction	$F=0,002985 \text{ N.m.s}$

Tableau IV.3: Paramètres de la MAS triphasée simulée.

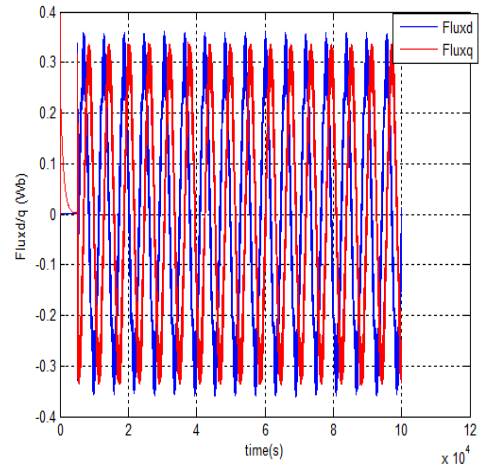
IV.4.1. Schéma de simulation : Voir annexe A.

IV.4.2 . Résultats de simulation :

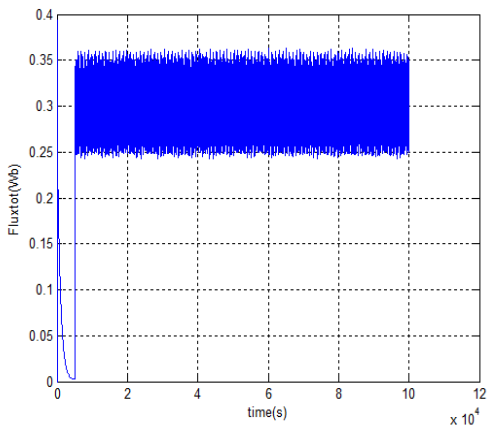
IV.4.2 .1. Commande par couple constant : dans cette simulation nous avons appliqué un couple de référence constant de 50 N.m avec régulation de vitesse.



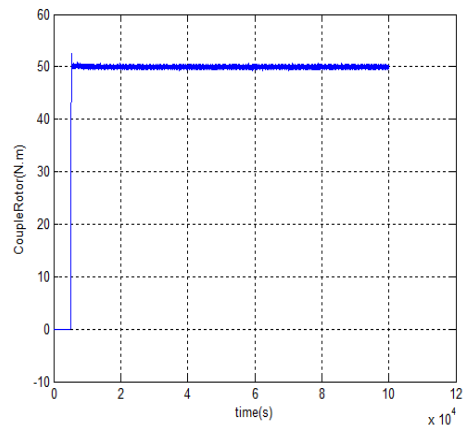
(a)



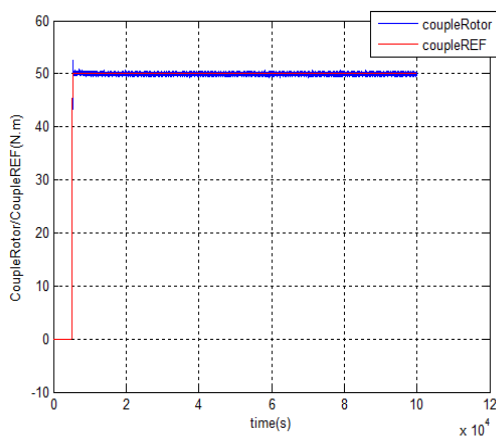
(b)



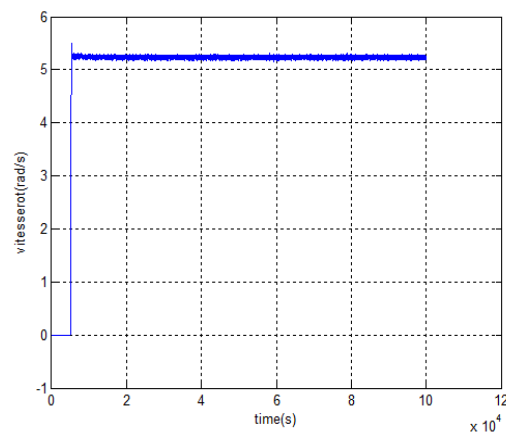
(c)



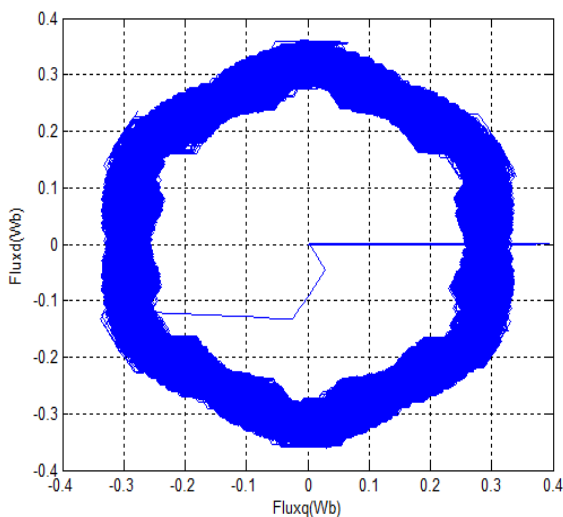
(d)



(e)



(f)



(g)

Fig. IV.10: Résultats de simulation de la DTC pour un couple de référence constant

IV.4.2 .1.1 Interprétation des résultats:

D'après la figure (IV.9 a) on constate que les courants statoriques sont très faibles dans une première phase pour un couple très faible (ou nul) (fig.IV.9 d,e) car le moteur tourne à vide (mode véhicule à l'arrêt et moteur en marche) et dans ce cas le flux total statorique (fig.IV.9 c) est très faible. Après l'application d'un couple constant fixé à 50 N.m, les courants passent par un pic important égal à 4 fois ou plus la valeur du courant nominal. C'est le courant de démarrage

du moteur, ce courant important n'a aucun risque sur les enroulements statoriques puisque la phase de démarrage est très courte. Après la phase de démarrage les courants se stabilisent à une valeur constante dont l'amplitude est d'environ 20 A, tandis que le flux total statorique varie autour d'une valeur moyenne de 0.3 Wb imposée comme référence dans le circuit de régulation du flux. Les 2 composantes du flux statorique Ψ_d et Ψ_q (fig.IV.9 b) dans le repère biphasé de park qui ont une amplitude très faible ou nulle pendant la première phase, varient autour d'une valeur moyenne nulle avec une amplitude de 0.3 Wb lorsque le couple est constant et sont en quadrature de phase entre elles. La figure (IV.9 e) montre que le couple mesuré au niveau du rotor suit bien le couple de commande imposé mais avec une très légère variation autour de celui-ci, cette variation est provoquée par l'opération de régulation du flux statorique au niveau de la commande DTC. On remarque aussi que la vitesse de rotation du moteur (fig.IV.9 f) est constante tant que le couple de commande est constant.

La figure (IV.9 g) montre la trajectoire décrite par l'amplitude du vecteur flux total statorique Ψ_s formé à partir de ses 2 composantes Ψ_d et Ψ_q dans le plan de Park. Ce vecteur dont l'amplitude varie conformément à la régulation imposée par la commande DTC décrit chacun des 6 secteurs de la table de vérité.

IV.4.2 .2. Commande par couple variable : dans cette simulation nous avons appliqué un couple de référence variable dont le profil est donné par la figure (IV.10) avec régulation de vitesse.

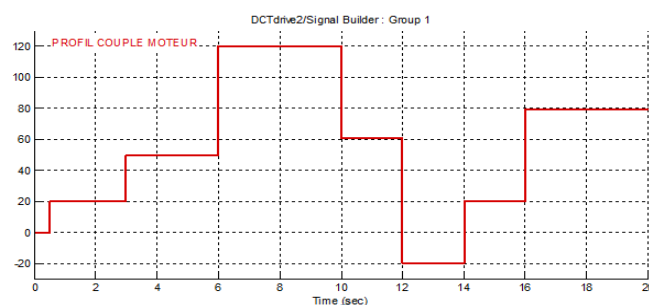
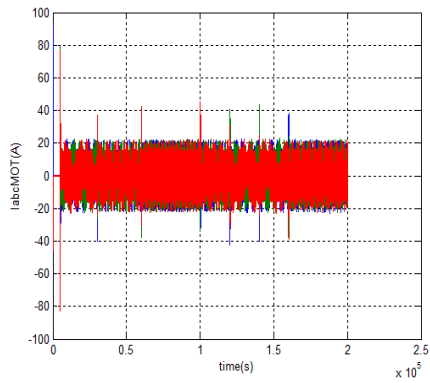
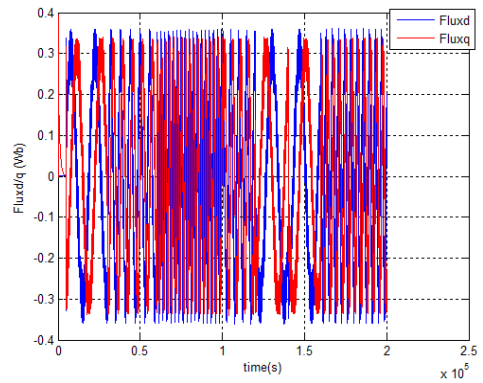


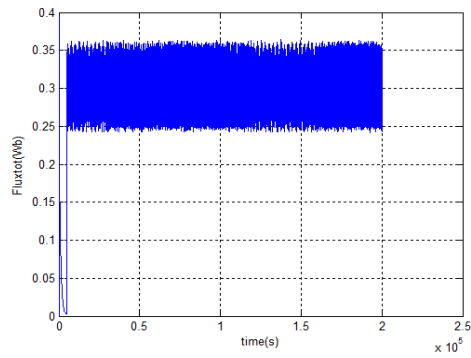
Fig. IV.11 : profil du couple de commande variable.



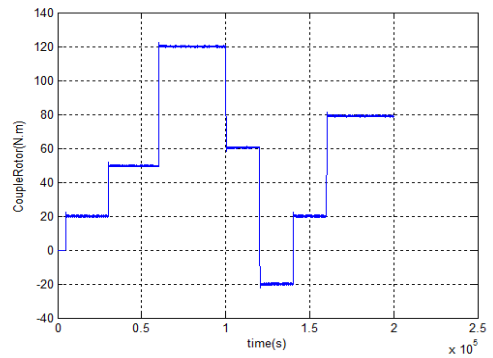
(a)



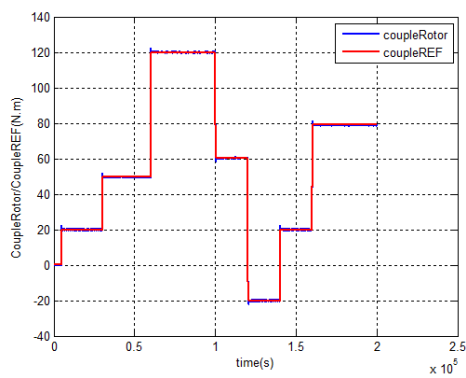
(b)



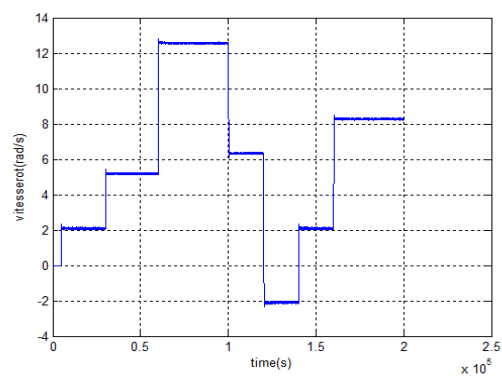
(c)



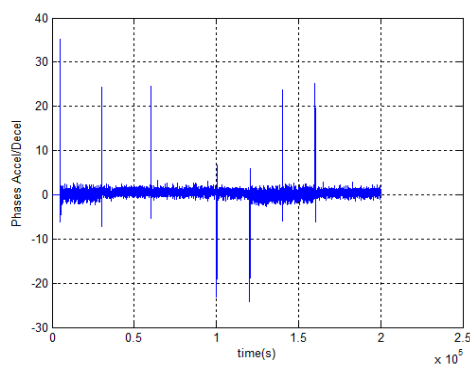
(d)



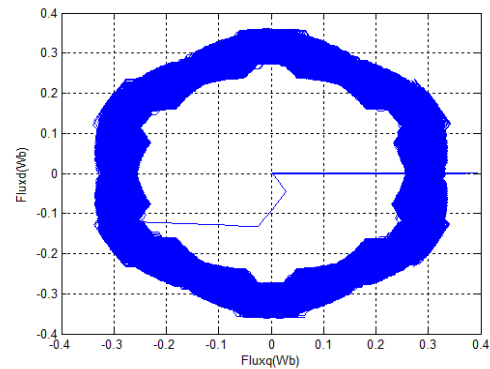
(e)



(f)



(g)



(h)

Fig. IV.12: Résultats de simulation de la DTC pour un couple de référence variable.

IV.4.2 . Interprétations des résultats :

D'après la figure (IV.11 a) on constate que les courants statoriques sont très faibles dans une première phase pour un couple très faible (ou nul) (fig.IV.11 d,e) lorsque le moteur tourne à vide et dans ce cas le flux total statorique (fig.IV.11 c) est très faible. Après l'application d'un couple variable prenant différentes valeurs pour les différentes phases de fonctionnement du véhicule comme le précise le profil de la figure (IV.10), les courants passent par un pic au début de chaque phase pour se stabiliser ensuite pendant toute la durée de la phase. Seul le premier pic est important et égal à environ 4 fois la valeur du courant nominal. Les autres pics sont au plus égaux à 2 fois le courant nominal, mais comme la durée de ces pics est très faible ils ne présentent aucun danger pour les enroulements du moteur. Durant le régime permanent de chaque phase les courants se stabilisent à une valeur constante dont l'amplitude est d'environ 20 A, tandis que le flux total statorique varie autour d'une valeur moyenne de 0.3 Wb imposée comme référence dans le circuit de régulation du flux. Nous constatons aussi que la période T des courants statoriques varie d'une phase à une autre ceci est produit par une variation de la fréquence f des courants d'alimentation du moteur laquelle est produite par un variateur de fréquence

inclus dans le système de commande et nécessaire pour faire varier la vitesse (n tr/s ou ω rd/s) du moteur proportionnellement au couple appliqué. Cette variation de période (T) et par conséquent de fréquence ($f=1/T$) apparaît clairement dans les variations des 2 flux Ψ_d et Ψ_q dans le plan de Park (fig.IV.11 b). La même remarque est aussi valable pour le flux total Ψ_s durant les différentes phases de fonctionnement. Ceci est tout à fait normal puisque les différents flux sont proportionnels aux courants statoriques $\Psi_s(t)=k.I_s(t)$,

$$\Psi_d(t)=k_1.I_{sd}(t) \text{ et } \Psi_q(t)=k_2.I_{sq}(t).$$

On sait que la vitesse de rotation est donnée par : $n=f/p$ (tr/s) ou $\omega=2\pi.n$ (rd/s), le nombre de paire de pôles étant constant ($p=2$ dans notre cas), pour faire varier n (ou ω), il faut faire varier f . Si la fréquence f augmente (donc T diminue) alors la vitesse n augmente et si f diminue (donc T augmente) alors la vitesse diminue.

Le profil de vitesses rotoriques obtenu (fig.IV.11f) confirme l'explication énoncée précédemment et en plus ce profil de vitesses suit correctement le profil de couple imposé, si le couple augmente la vitesse augmente, si le couple diminue la vitesse diminue et si le couple s'inverse la vitesse s'inverse.

La figure (IV.11 e) montre que le couple au rotor suit pratiquement le couple de référence imposé avec une grande précision. La figure (IV.11 g) montre les différentes phases d'accélération et de décélération du véhicule durant le parcours et selon le profil du couple de commande imposé.

La figure (IV.11 h) montre la trajectoire décrite par l'amplitude du vecteur flux total statorique Ψ_s formé à partir de ses 2 composantes Ψ_d et Ψ_q dans le plan de Park.

IV.5. Simulation du système photovoltaïque comme alimentation auxiliaire:

IV.5.1. Schéma de simulation : voir annexe B.

IV.5.2 Caractéristiques du panneau solaire utilisé:

Ce panneau est prévu pour être intégré au toit du véhicule.

Nombre de strings	2
Nombres de modules connectés en série par string	3
Type Module	1 Soltech 1STH-215-P
Nombre de cellules par module	60 cellules
Puissance maximum	213.15 W
Tension circuit ouvert	Voc=36.3 V
Courant court circuit	Isc= 7.84 A
Tension au point de puissance maximale	Vmp=29 V
Courant au point de puissance maximale	Imp=7.35 A
Coefficient de température pour Voc	-0.36099 %/deg.C
Coefficient de température pour Isc	0.102 %/deg.C
Résistance shunt Rsh	313.3991 Ohms
Résistance série Rs	0.39383 Ohms

Tableau IV.4 : Caractéristiques du panneau solaire.

On remarque d'après les caractéristiques I-V données par le constructeur (fig. IV.12) que le courant de court circuit augmente nettement avec l'irradiation, par contre la tension en circuit ouvert n'augmente que très faiblement et par conséquent on peut supposer qu'elle reste constante. Comme le courant I augmente avec l'irradiation on en déduit que la puissance $P=V \cdot I$ augmente aussi avec l'irradiation ce que montrent les caractéristiques P-V de la figure IV.12. On peut aussi remarquer, sur ces dernières courbes, la position des points de

puissance maximale qui seront utilisés lors d'une poursuite par la technique MPPT.

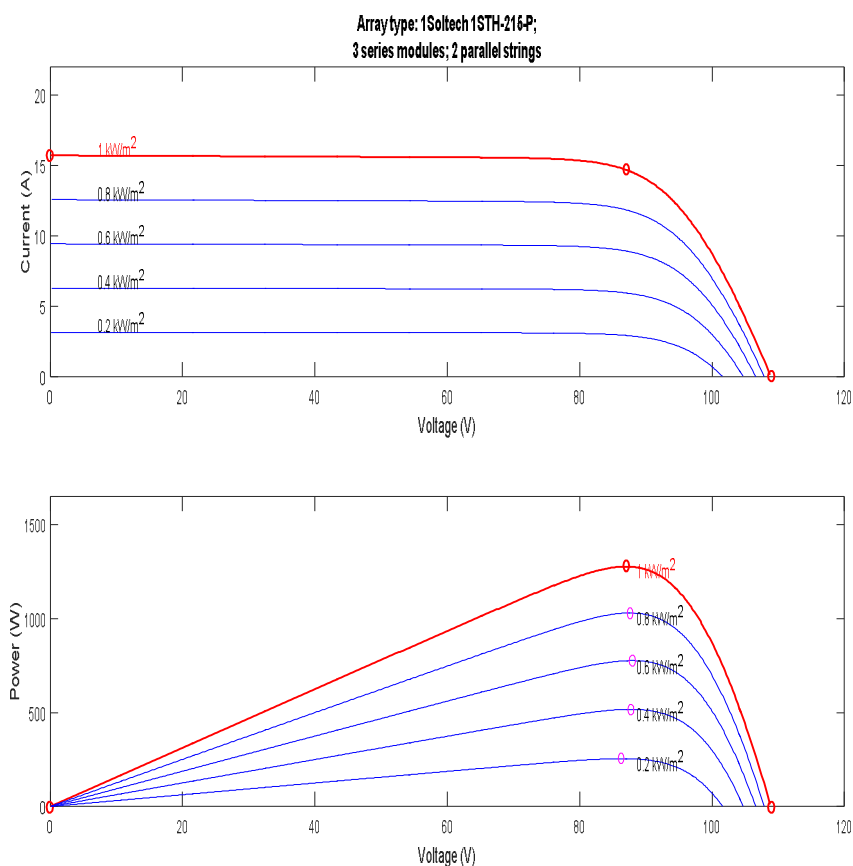


Fig. IV.13: Caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque 1STH-215-P pour une température de 25 °C et différentes irradiances (données du constructeur).

IV.5.3 Caractéristiques de la batterie :

Batterie pour voiture	12 V, 60Ah, 480 A
la tension de la batterie	12 V
capacité de la batterie	60 Ah
ampérage maximal pour un démarrage à froid	480 A

Tableau IV.5 : Caractéristiques de la batterie de servitude (données du constructeur).

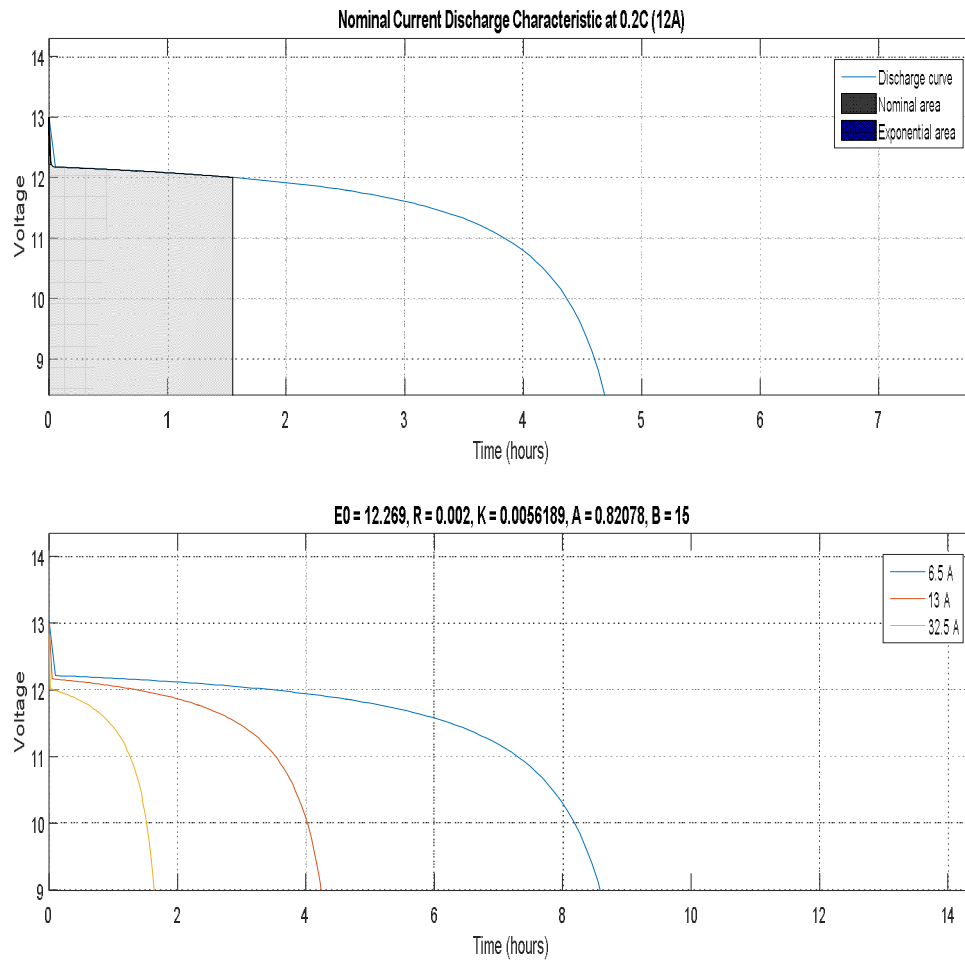
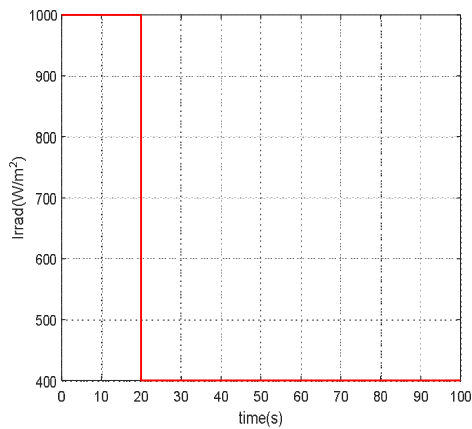
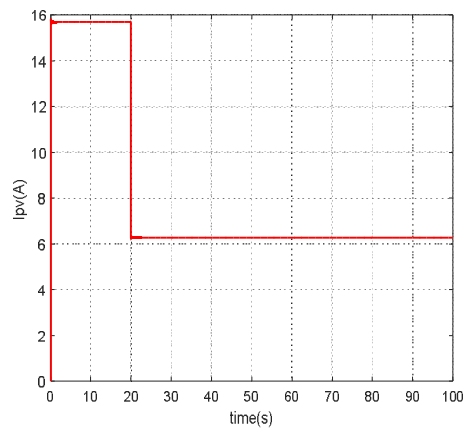


Fig. IV .14: Caractéristiques de décharge de la batterie pour différents courants (données du constructeur).

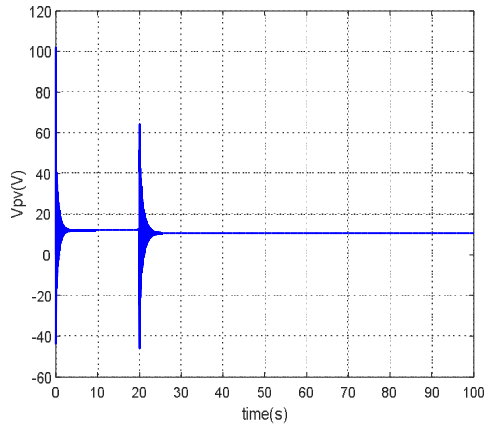
IV.5.4. Résultats de simulation du système photovoltaïque :



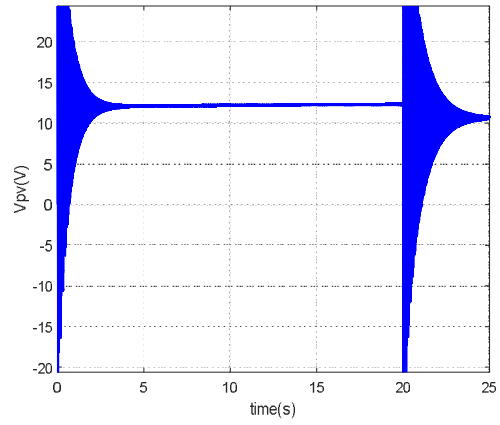
(a)



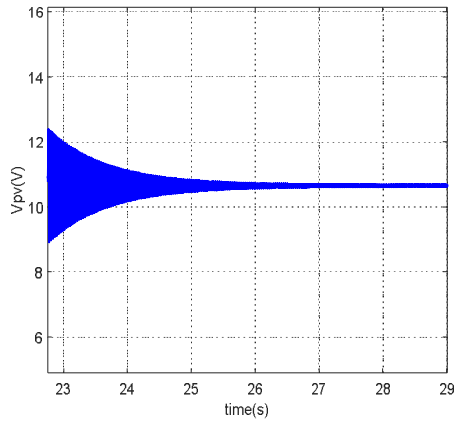
(b)



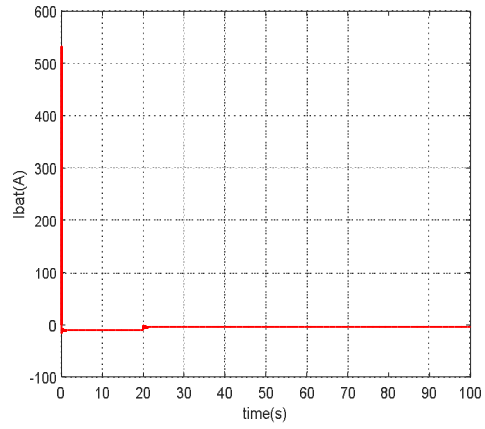
(c)



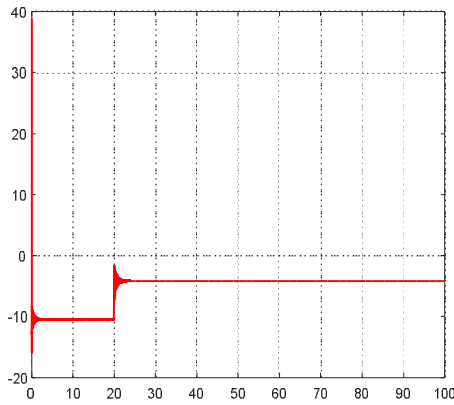
(d)



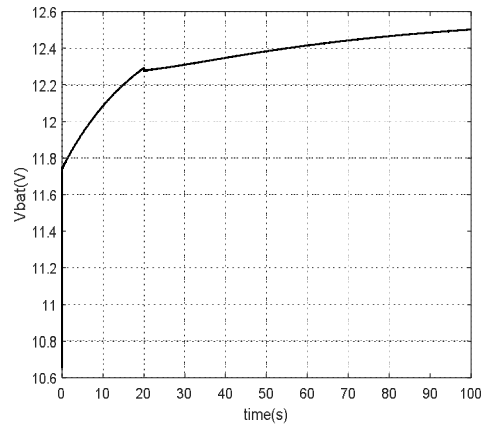
(e)



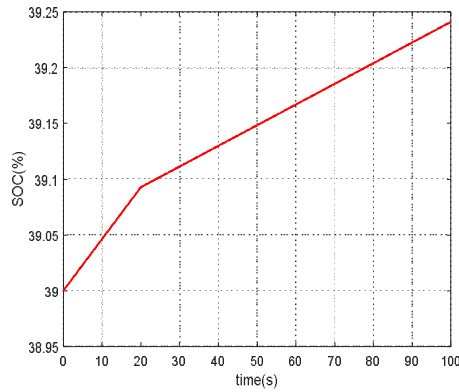
(f)



(g)



(h)



(i)

Fig. IV.15 : Résultats de simulation du système PV en régime de charge sur la batterie de servitude.

IV.5.5. Interprétations des résultats :

La figure (IV.12 a) montre le profil d'irradiation appliqué aux panneaux solaires lors de la simulation. La valeur de l'irradiation a été fixée à 2 valeurs 1000 W/m^2 pendant une première phase ce qui suppose que le ciel est très dégagé avec ensoleillement maximal et 400 W/m^2 durant une deuxième phase ce qui suppose un changement de climat pendant la même journée avec un ciel très nuageux et ensoleillement très faible.

La figure (IV.12 b) montre l'allure du courant produit par le champ PV, on constate que son intensité est maximale (15,8 A) pendant la première phase et baisse à une valeur minimale (6,3 A) durant la deuxième phase. Ce qui est suffisant pour alimenter certains circuits auxiliaires du véhicule consommant de faibles puissances et pour recharger la batterie (12V) lorsque cela devient nécessaire.

La figure (IV.12 c) montre l'allure de la tension obtenue aux bornes du champ PV, sa valeur est de 12,5 V durant la première phase et baisse à 10.8 V durant la deuxième phase. Les figures (IV.12 d et e) donnent un zoom sur les 2 phases ce qui montre que la tension passe par un régime transitoire (existence d'oscillations) au début de chaque phase pour ensuite se stabiliser. Ces

oscillations sont dues à la perturbation créée sur la tension par l'algorithme P&O (*Perturb and Observe*) implémenté dans le système de poursuite MPPT. Puisque la tension revient à une position stable cela prouve que la méthode converge correctement.

Les figures (IV.12 f et g) montrent l'allure du courant de charge de la batterie durant les 2 phases, ce courant étant débité par le hacheur DC-DC placé entre le champ PV et la batterie. On constate que l'intensité de ce courant passe de 10 A sous l'irradiation maximale de 1000 W/m^2 à 4,2 A sous l'irradiation 400 W/m^2 , ce qui prouve que l'influence de l'éclairement du panneau est très importante sur le rendement de ce système basé sur l'énergie solaire. D'où la nécessité d'introduire le système MPPT de poursuite du point de puissance maximale. Cette opération de poursuite se traduit par la présence d'oscillation au début de chaque passage de l'irradiation solaire d'une valeur à une autre, ceci est visible sur les figures (IV.12 c, d et e) et la figure (IV.12 g). Lorsque le point de puissance maximal est atteint, le courant tout comme la tension se stabilisent à une valeur constante durant chaque phase.

La figure (IV.12 h) montre l'évolution de la tension aux bornes de la batterie pendant l'opération de recharge. Tandis que la figure (IV.12 i) montre l'état de charge (SOC) de la batterie qui augmente pendant la recharge.

L'opération de recharge de la batterie s'effectue lorsque le $\text{SOC} \leq 40 \%$ et s'arrête lorsque le $\text{SOC} \geq 80 \%$. L'opération de charge de la batterie et celle d'une éventuelle décharge en cas d'alimentation des circuits auxiliaires lors d'une absence d'irradiations solaires sont gérées par un programme embarqué (voir annexe C).

Commentaires :

Pour tirer le maximum de puissance des cellules solaires travaillant sous température constante, il faut exposer ces dernières à un rayonnement solaire maximal. Cette opération peut se faire par orientation correcte du panneau PV vers le soleil en utilisant un système mécanique asservi comme suiveur du soleil, ce qui n'est pas possible dans notre cas car le panneau est supposé fixé sur le toit du véhicule.

Pour tirer le maximum de puissance des cellules solaires travaillant sous irradiation constante par exemple dans un endroit où le ciel est très dégagé pendant une longue période, il faut exposer ces cellules à la plus basse température de fonctionnement possible. Il est possible d'utiliser le circuit de climatisation du véhicule pour refroidir les cellules.

CONCLUSION GÉNÉRALE

De par sa définition un système embarqué est représenté par l'ensemble des circuits électroniques installés dans un véhicule et dans lesquels sont implémentés divers programmes informatiques nécessaires à la gestion des sources d'énergie du véhicule et de l'ensemble des appareils de mesures et de contrôles (capteurs, sondes, compteur, etc...) intégrés à toute l'installation électrique et mécanique. C'est dans cette perspective que se situe notre travail de recherche, l'objectif fixé étant de faire un lien entre les circuits électroniques de puissance et la programmation informatique adaptable à ces circuits.

Le travail dans ce cadre de mémoire nous a permis d'élaborer une étude détaillée de la commande directe du couple (DTC) appliquée à la machine asynchrone et qui permet l'amélioration du réglage de la vitesse par la commande du couple et sans l'utilisation d'un capteur mécanique de vitesse. Cette technique de commande présente une plus grande souplesse et ses performances sont meilleures comparées aux autres techniques de commandes classiques de la machine à induction.

Dans la première partie de ce travail nous avons présenté un état de l'art du véhicule électrique (VE) à partir des différents types de voitures hybrides et tout électrique proposés par les constructeurs en faisant référence à l'énorme avancée technologique du domaine de l'automobile. Notre étude s'est basée sur les composants essentiels tels que les convertisseurs de puissances (hacheurs et onduleurs) et le moteur de traction électrique (moteur asynchrone triphasé) avec

la possibilité d'intégrer une alimentation hybride par panneau solaire et batterie dans le but de compenser une partie de l'énergie.

En second lieu nous avons établis les modèles mathématiques des convertisseurs DC-DC et DC-AC utilisés dans la chaîne de traction ainsi que les équations de la MAS triphasée en utilisant la transformation de passage du plan triphasé au plan biphasé de Concordia (α , β) puis celui de Park (d, q) afin de réaliser les simulations sous Matlab/Simulink.

Ensuite nous avons cité les principales techniques de commande de la MAS en focalisant notre étude principalement sur la technique DTC.

Le travail a été complété par différentes simulations sous les logiciels Simulink, Simpower et Simscape sous l'environnement Matlab. Tous les résultats obtenus par simulation ont été analysés et commentés pour donner une image fidèle et très proche du système réel.

Après avoir obtenu des résultats de simulation très satisfaisants, nous pouvons considérer que l'objectif de cette étude a été atteint. Toutefois l'amélioration de ce travail et l'apport de solutions beaucoup plus performantes sont tout à fait envisageables.

Le domaine technologique de l'automobile tout électrique et hybride étant très vaste et surtout variant d'un constructeur à un autre tout reste à découvrir et à améliorer. Pour la continuation du présent travail et son amélioration future nous proposons comme perspectives les études suivantes :

Conclusion générale

- la gestion énergétique du véhicule d'après le programme BMS (Battery Management System) appliqué à la batterie principale au Li/ion pour augmenter la précision de contrôle et le temps d'autonomie du véhicule.
- les systèmes de recharges électriques de la batterie principale Li/ion pour diminuer le temps de recharge.
- amélioration des programmes informatiques appliqués aux systèmes de commandes de la chaîne de traction selon le type de moteur électrique utilisé par le constructeur surtout pour réduire les temps de réponses et augmenter la précision de conduite du véhicule.

ANNEXES

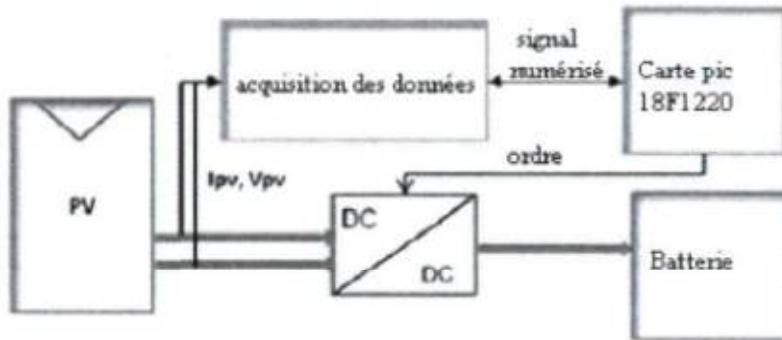
Annexe C

1) Programme Matlab pour la méthode P&O :

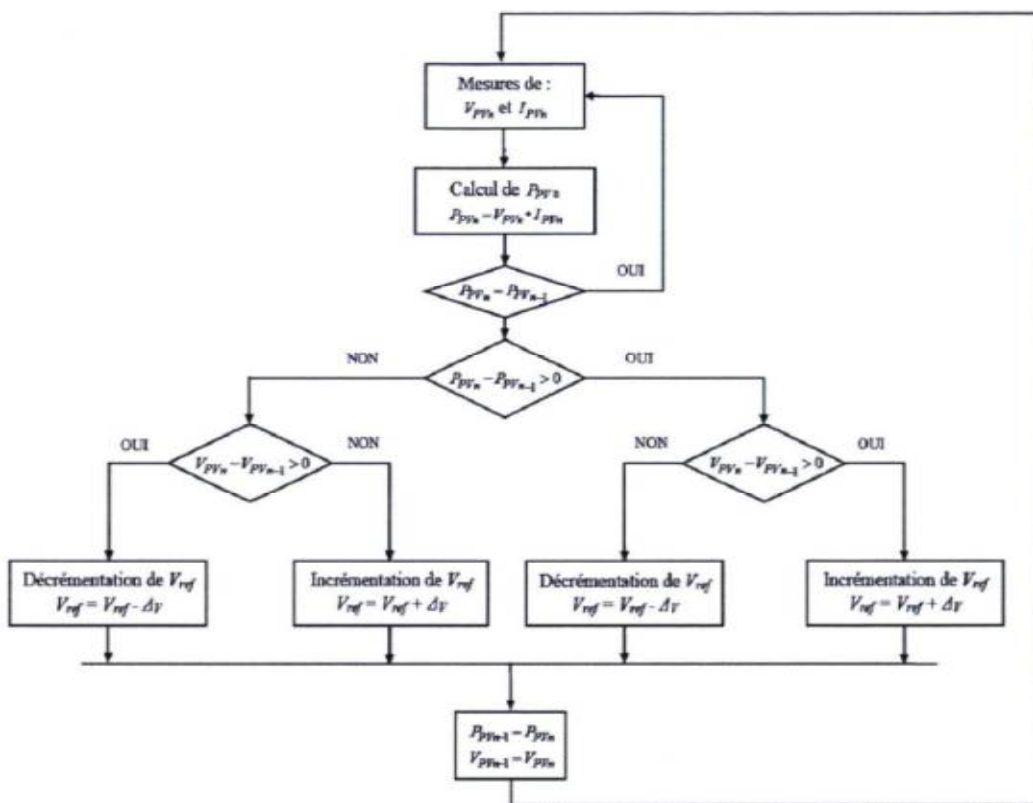
Ce programme est implémenté dans le bloc MPPT du système PV.

```
function D = PandOb(Vpv, Ipv)
%code gen
%define internal values for the voltage and power as persistent variables
persistent Dprev Pprev Vprev
%initialize the internal values for the voltage and power on the first
pass
if isempty(Dprev)
    Dprev=0.7;Vprev=100;Pprev=200;
end
%initialize algorithm parameters
deltaD=0.001;
%calculate measured array power
Ppv=Vpv*Ipv;
%increase or decrease duty cycle based on conditions
if (Ppv-Pprev)~=0
    if (Ppv-Pprev)>0
        if (Vpv-Vprev)>0
            D=Dprev-deltaD;
        else
            D=Dprev+deltaD;
        end
    else
        if (Vpv-Vprev)>0
            D=Dprev+deltaD;
        else
            D=Dprev-deltaD;
        end
    end
end
else
    D=Dprev;
end
%update internal values
Dprev=D;Vprev=Vpv;Pprev=Ppv;
```

La figure suivante donne un diagramme fonctionnel pour la commande MPPT à base de microcontroller PIC18F1220.



La figure suivante représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.



2) Programme Matlab pour la sélection du secteur parmi les six (dans le plan α, β) dans lequel se trouve le vecteur flux : Ce programme est implémenté dans le système DTC.

```
function n = sector(Phialpha, Phibeta)
%sector selection
n=0;
deta=atan2(Phibeta, Phialpha);
if (deta>=-pi/6) && (deta<pi/6)
    n=1;
end
if (deta>=pi/6) && (deta<pi/2)
    n=2;
end
if (deta>=pi/2) && (deta<5*pi/6)
    n=3;
end
if (deta>=5*pi/6) && (deta<-5*pi/6)
    n=4;
end
if (deta>=-5*pi/6) && (deta<-pi/2)
    n=5;
end
if (deta>=-pi/2) && (deta<-pi/6)
    n=6;
end
```

3) Programme Matlab pour la commande charge/ décharge de la batterie (12 V) :
Ce programme est implémenté dans le système PV.

```
function [LoadOn, ChargingOn] = ComBatt(SOC, button)
%code
LoadOn=1;
ChargingOn=0;
if (SOC>=80) && (button==1)
    LoadOn=1;
    ChargingOn=0;
end
if (SOC<40)
    LoadOn=0;
    ChargingOn=1;
end
```

Bibliographie

[1] : BOUCHA Abdellah , *Réalisation et commande d'un véhicule électrique par DSpace embarqué ,thèse de Magister , USTO MB , Oran.*

[2] D.Benoudjit . *Contribution a l'optimisation et a la commande D'un système de propulsion Pour véhicule électrique. Thèse Doctorat Es-Science Université de Batna, Janvier 2010.*

[3] Bernard MULTON, Laurent HIRSINGER " *Problème De La Motorisation D'un Véhicule Electrique "*, *Ecole normale supérieure de Cachan, d1375Revue 3E.I n°5 mars 96 pp.55-64.*

[4] MARIF Ismail & ABDAT Hichem , *La commande en vitesse d'un véhicule électrique , these de master en automatique ,université de tlemcen , 2018/2019 .*

[5] *Culture Science de l'Ingénieur .Les solutions actuelles de motorisations pour véhicules électriques. édité le 16/03/2020 .*

[6] G. Malloy, M. Lachapelle, *Essence,hybride ou électrique :ce q'il faut savoir, Association Canadienne des Automobilistes.*

[7] MILOUDI saleh - DERRADJ azeddine - BOUHLAL aissa . *Simulation Numérique D'une Chaîne De Traction D'un Véhicule Electrique . mémoire d'ingénieur d'état en Génie électrotechnique . univ de Msila . 2011-2012 .*

[8].A. Laguidi, "Réalisation, Conception et Commande d'un Véhicule Electrique", *Mémoire Magister Université de Béchar, 2011.*

[9] BOUGUENNA Ibrahim Farouk . *Commande Robuste d'une Chaîne de Traction d'un Véhicule Electrique ' multisources . thèse de doctorat en électronique – contrôle et systemes - UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES .2019/2020 .*

[10] Christelle SABER – Najib ROUHANA . *Chargeurs de batteries de véhicule électrique . Culture Science de l'Ingenieur .Ecole Normale Supérieur – Paris – saclay . Edité le 06/04/2020 .*

[11] Éric LABOURÉ . *Recharge sans contact des véhicules électriques . Culture Science de l'Ingenieur .Ecole Normale Supérieur – Paris – saclay . Edité le 11/05/2020 .*

[12] Guerraoui Imene -Maghraoui Mohamed El Habib . Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone .Mémoire de fin d'études académique .2019/2020 Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem .

[13] AKKOUCHI KAMEL . Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone . thèse de magister . université Badji Mokhtar . Annaba . 2017

[14] MAYOUF Somia. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle. Mémoire de Master en Génie électrique. Université de MOHAMED BOUDIAF - M'SILA .2016 .

[15] <https://www.voitureelectrique.net/histoire-de-la-voiture-electrique>

[16] [La première voiture électrique - Voiture électrique \(voitureelectrique.com\)](#)

[17] www.challenges.fr/automobile/

[18] www.auto-moto.com/nouveautes