

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie Electrique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الكهربائية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister
Option : Commande et motorisation des véhicules électriques

Préparé au laboratoire de Génie Electrique LGEB de Biskra

**Gestion d'énergie d'un système d'entraînement
électrique hybride basé sur un moteur synchrone à
aimants permanents**

Présenté par :

Maamir MADIHA

Soutenu publiquement le/2014

Devant le jury composé de :

Dr.Ammar. MOUSSI	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr.Achour. BETKA	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr.Boualaga. RABHI	Maitre de conférences A	Examineur	Université de Biskra
Dr.Abdelhamid.BEN AKCHA	Maitre de conférences A	Examineur	Université de Biskra
Dr.Amar. GOLEA	Professeur	Invité	Université de Biskra

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A toute ma famille et plus précisément à ma mère et mon père et je leurs

souhaitent une bonne santé.

A ma sœur aicha qui m'a aidée beaucoup.

A tous mes frères et sœurs.

A toutes mes amies, notamment

Hania, Hkima, Asma.

Remerciements

*Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du laboratoire
LGEB de Biskra.*

*Tout d'abord merci à dieu de m'avoir donné la force pour
Terminer ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur : **Dr. BETKA Achour**
Professeur, à l'Université de Biskra. Pour m'avoir encadré durant ma préparation de ce
mémoire, pour ses conseils. Son expérience et sa connaissance ont contribué à ma formation
scientifique.*

*Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur : **Dr. MOUSSI Ammar**
Professeur, à l'Université de Biskra Pour l'honneur qu'il ma fait en acceptant la présidence
du jury de ce mémoire.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur : **Dr. BOUALAGA Rabhi**, Maitre de
conférences A à l'Université de Biskra pour qu'il a porté à ce travail en me faisant
l'honneur de participer à ce jury.*

*J'adresse mes respectueux remerciements à monsieur : **Dr. BEN AKCHA**
Abdelhamid, Maitre de conférences A à l'Université de Biskra pour m'avoir accepté
d'examiner ce travail.*

*Je tiens également à remercier monsieur : **Dr. Golea Amar** Professeur, à l'Université
de Biskra d'avoir répondu à notre invitation afin d'examiner ce travail.*

*Je remercie mes enseignants poste de graduation au sein du département de Génie
Electrique de Biskra. Je tiens également à remercier le Professeur ZO'UZOU Salah -
Eddine pour les facilités et la mise à disposition des moyens du laboratoire*

*Je tiens à remercier monsieur: **Dr. Benchouia Mohamed Toufik**, M.C.A à
l'Université de Biskra pour les documentations et les informations qu'ils m'ont donnés sur
ce travail et tous les enseignants du laboratoire LGEB de Biskra.*

*Sans oublier monsieur **B.ZEGUEB** enseignant à l'Université d'EL oued,
A toute personne ayant participé de près ou de loin à réaliser ce travail, et tout
personnes dont nous avons oublié de citer.*

Merci aussi à tous mes collègues et amies à l'Université de Biskra et EL oued.

Résumé:

Ce travail s'inscrit à un système électrique hybride permettant de faire fonctionner un ascenseur. Des panneaux photovoltaïques, des batteries, et des supercondensateurs alimentent, via des convertisseurs de puissance, la machine synchrone à aimants permanents (entraînement direct) pour déplacer la cage de l'ascenseur.

L'objet proposé consiste à concevoir un gestionnaire d'énergie permettant de commander efficacement l'énergie fournie par les différentes sources. Un ensemble des régulateurs ont été proposés pour le contrôle des différents sous-systèmes.

Mots clés : Système hybride, stockage d'énergie, générateur PV, Gestion d'énergie, supercondensateurs, logique flou, batteries

Abstract:

This work focuses the simulation of an electric elevator, based on a permanent synchronous machine, and fed via an hybrid sources: photovoltaic generator, battery-bank and supercapacitors. The main objective of this study is to design a power manager to control the power of the different sources effectively. Various control algorithms have been proposed to control the power converters of the system.

Keywords: Hybrid system, energy storage, PV generator, Power management, supercapacitors, fuzzy logic, batteries.

ملخص :

يندرج هذا العمل حول نظام كهربائي هجين للسماح بتشغيل مصعد. الألواح الشمسية والبطاريات والمكثفات الفائقة ، يغذون عبر محولات الطاقة المحرك الكهربائي المتزامن ذو المغناطيس الدائم لنقل غرفة المصعد. الموضوع المقترح يركز على تصميم منظم الطاقة للتحكم بشكل فعال في الطاقة المزودة من قبل المصادر المختلفة. تم استعمال مجموعة من المنظمات للتحكم في مختلف الانظمة.

الكلمات المفتاحية : النظام الهجين, تخزين الطاقة, مولد PV ، إدارة الطاقة، المكثفات الفائقة، المنطق الضبابي، بطاريات.

Symboles et notations

R_p	Resistance série (Ω)
R_{ch}	Resistance shunt (Ω)
I	Courant d'une cellule photovoltaïque (A)
I_{cc}	Courant de court circuit (A)
I_0	Courant de saturation de la diode inverse (A)
V	Tension d'une cellule photovoltaïque (A)
V_{oc}	Tension de circuit ouvert (V)
I_{op}	Courant optimum (A)
V_{op}	Tension optimale (V)
V_{th}	Tension thermique (V)
N_s	Nombre de modules en série
N_p	Nombre de branches en parallèle
α	Coefficient de variation du courant en fonction de la température
β	Coefficient de variation de la tension en fonction de la température
T	Température effective des cellules [$^{\circ}C$]
T_{ref}	Température de référence [$^{\circ}C$]
SOC_{bat}	L'état de charge de la batterie
DoD	Profondeur de décharge de la batterie
V_{bat}	Tension de la batterie (V)
i_{bat}	Courant de la batterie (A)
r_{bat}	Résistance série d'une cellule de la batterie (Ω)
n	Nombre de cellule
E_{bat}	Tension à vide (V)
C_N	La capacité nominale de la batterie (F)
$SOC_{bat\ int}$	L'état de charge initiale de la batterie
v_{sc}	Tension de supercondensateur (V)
i_{sc}	Courant de supercondensateur (A)
SOC_{sc}	L'état de charge de supercondensateur
c_1	La capacitance (F)

Symboles et notations

Q	La charge électrique (c)
V_l	La tension appliquée (V)
ε	Constante diélectrique du matériau isolant
A	La surface (m^2)
$V_{c_{sc}}$	La tension au borne de la capacité C_{sc} (V)
R_{sc}	La résistance interne du supercondensateur (Ω)
C_{sc}	La capacité du supercondensateur (F)
d	L épaisseur (m)
W	L'énergie électrostatique stockée (J)
$[V_a V_b V_c]^T$	Tensions des phases statorique (V)
$[i_a i_b i_c]^T$	Courant des phases statorique (I)
$[\Phi_a \Phi_b \Phi_c]^T$	Flux totaux à travers les bobines statorique (wb)
M_{s0}	Inductance mutuelle entre deux phases statorique (H)
L_{s0}	Inductance propre d'une phase statorique (H)
θ_e	La position angulaire du rotor par rapport au stator
C_e	Couple électromagnétique (N.m)
C_r	Couple résistante (N.m)
ϕ_f	Flux des aimants (Wb)
J	Moment d'inertie des masses en rotor ($Kg.m^2$)
P	Nombre de paires de pôles
$\Omega_{m_{ref}}$	Vitesse mécanique de rotation de référence (rd/s)
Ω_m	Vitesse mécanique de rotation (rd/s)
R_s	Résistance statorique (Ω)
L_{ds}, L_{qs}	Inductances cycliques directe et en quadrature (H)
i_{ds}, i_{qs}	Courants statoriques d'axe direct et en quadrature (I)
V_{ds}, V_{qs}	Tensions statoriques d'axe direct et en quadrature (V)
M_p	La masse de contrepoids (Kg)
M_c	La masse de la cage (Kg)
z_c	Position de la cage (m)
$z_{c_{ref}}$	Position de la cage de référence (m)
r	Rayon du pignon (m)

θ_r	Position du rotor (codeur incrémental)
V_c	Vitesse de la cage (m/s)
$i_{L_{pv}}$	Courant de la bobine (A)
V_s	Tension de sortie (V)
L_{pv}	Inductance de l'hacheur du GPV (H)
R	Résistance de la charge (Ω)
$i_{pv_{dc}}$	Courant du GPV en sortie de l'hacheur (A)
i_{pv}	Courant du GPV (A)
α_{reg}	Rapport cyclique de l'hacheur du GPV en mode régulation de puissance
α_{mppt}	Rapport cyclique de l'hacheur du GPV fonctionnant en MPPT
$I_{pv_{ref}}$	Courant du générateur photovoltaïque de référence (A)
$P_{pv_{ref}}$	Puissance du générateur photovoltaïque de référence (w)
L_{bat}	Inductance de l'hacheur de la batterie (H)
$i_{bat_{dc}}$	Courant de la batterie en sortie de l'hacheur (A)
$I_{bat_{ref}}$	Courant de la batterie de référence (A)
α_{bat}	Rapport cyclique de l'hacheur de la batterie
L_{sc}	Inductance de l'hacheur du supercondensateur (H)
$i_{sc_{dc}}$	Courant du SC en sortie de l'hacheur (A)
$I_{sc_{ref}}$	Courant du SC de référence (A)
α_{sc}	Rapport cyclique de l'hacheur du supercondensateur
$i_{dc_{ref}}$	Courant de bus continu de référence (A)
i_c	Courant de bus continu (A)
P_{ch}	La puissance de la charge (moteur) (w)
i_m	Le courant de la charge (moteur) coté continu (A)
$V_{dc_{ref}}$	Tension de bus continu de référence (V)
V_{dc}	Tension de bus continu (V)
C	Capacité du bus continu (F)
$[D_u D_v D_w]$	Grandeurs de Commande de l'onduleur
$F_{porteuse}$	Fréquence de découpage (Hz)
SEH	Système d'Energie Hybride
MSAP	Moteur synchrone à aimant permanent

Symboles et notations

PPM	Point de Puissance Maximale
GPV	Générateur photovoltaïque
SC	supercondensateur

Liste des figures

Figure 1.1	configuration du système hybride à bus continu	6
Figure 1.2	configuration du système hybride à bus alternatif	7
Figure 1.3	Architecture du système hybride à bus CC/AC	8
Figure 1.4	Modèle général d'un système hybride PV /éolien/diesel	8
Figure 1.5	Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV	9
Figure 1.6	Constitution d'un supercondensateur	10
Figure 2.1	schéma synoptique de l'installation hybride	19
Figure 2.2	schéma équivalent d'une cellule solaire	19
Figure 2.3	Caractéristiques I-V du module photovoltaïque	21
Figure 2.4	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C	22
Figure 2.5	Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à E=1000W/m ²	23
Figure 2.6	Cellule électrochimique de base	24
Figure 2.7	Modèle équivalent électrique simple d'une batterie	24
Figure 2.8	Tension, courant et état de charge de la batterie en fonction du temps	25
Figure 2.9	Modèle d'un supercondensateur	
Figure2.10	Tension, courant et l'état de charge des supercondensateurs en cas de décharge	28
Figure 2.11	Schéma de la machine synchrone	29
Figure 2.12	Schéma de la machine synchrone dans le référentiel (d,q)	31
Figure 2.12	Schéma simplifié du système de masses de l'ascenseur	32
Figure 2.14	Le schéma de principe d'un hacheur survolteur	34
Figure 2.15	Schéma de principe de la première séquence de conduction	35
Figure 2.16	Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction	36
Figure2.17	Convertisseur associé aux batteries	37
Figure 2.18	Le schéma de principe de la première séquence de conduction	38
Figure 2.19	Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction	38
Figure 2.20	Schéma de L'onduleur de Tension	39
Figure 2.21	Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoïdale	40
Figure 3.1	Schéma bloc du système ascenseur	43

Figure 3.2	Contrôle en tension du bus DC	44
Figure 3.3	Système de Gestion d'Énergie (SGE)	46
Figure 3.4	Structure de base du contrôleur floue	47
Figure 3.5	Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et la sortie	49
Figure 3.6	Schéma d'illustration d'un GPV commandé par Logique floue	50
Figure 3.7	Rapport cyclique de l'hacheur survolteur du GPV	50
Figure 3.8	Commande du générateur photovoltaïque en mode régulation de puissance	51
Figure 3.9	caractéristique I-V du générateur photovoltaïque	51
Figure 3.10	Schéma du contrôleur robuste du bus continu	53
Figure 3.11	Schéma de commande de la batterie	55
Figure 3.12	Schéma de commande du supercapacité	56
Figure 3.13	Contrôle en position du moteur	57
Figure 3.14	Contrôle en courant du moteur dans le référentiel d-q	57
Figure 3.15	Régulateur de position	58
Figure 3.16	Régulation de la vitesse	59
Figure 4.1	Profil de l'éclairement	64
Figure 4.2	Profil de la position de référence Zref	65
Figure 4.3	Profil de la charge : Masse	65
Figure 4.4	Puissances des différentes Sources	67
Figure 4.5	Puissance du moteur	68
Figure 4.6	Zoom des puissances en mode1	68
Figure 4.7	Zoom des puissances en mode3	68
Figure 4.8	Zooms des puissances en mode 2	69
Figure 4.9	Courants de différentes sources	71
Figure 4.10	Courant du moteur	72
Figure 4.11	Zooms des courants en mode 2	72
Figure 4.12	Zooms des courants des sources pour les différents modes	73
Figure 4.13	Le courant de la batterie et son zoom	74
Figure 4.14	Le courant des SC et son zoom	75
Figure 4.15	Tension du générateur photovoltaïque et son zoom	77
Figure 4.16	Tension de la batterie et ses zooms	78
Figure 4.17	Tension des SC	79
Figure 4.18	Etat de charge des SC et de la batterie	79

Figure 4.19	Tension du bus continu et son zoom	80
Figure 4.20	Rapport cyclique du GPV pour les différents modes	82
Figure 4.21	Rapport cyclique de l'hacheur bidirectionnel lié à la batterie	83
Figure 4.22	rapport cyclique de l'hacheur bidirectionnel lié aux SC	83
Figure 4.23	Position et sa consigne de l'ascenseur	84
Figure 4.24	Vitesse de rotation mécanique	84
Figure 4.25	Le courant en quadrature (i_{qs}) et sa référence	85
Figure 4.26	Le courant direct (i_{ds}) et sa référence	85
Figure 4.27	le couple électromagnétique (C_{em}) et son zoom	86
Figure 4.28	La tension directe V_{ds}	86
Figure 4.29	La tension en quadrature V_{qs}	87
Figure 4.30	Le flux d'axe direct (Φ_d) et sa référence (flux de l'aimant)	87
Figure 4.31	Le flux d'axe en quadrature (Φ_q)	87

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------	----------

Chapitre 1 **Généralités sur les systèmes hybrides**

1.1	Introduction	5
1.2	Généralité sur les systèmes hybrides	5
1.2.1	Définition des systèmes hybrides	5
1.2.2	Topologies des Systèmes Hybrides	6
1.2.2.1	Architecture à bus continu	6
1.2.2.2	Architecture à bus alternatif	6
1.2.2.3	Architecture à bus continu/alternatif	6
1.3	Principaux Composants des systèmes hybrides	9
1.3.1	Le Générateur solaire	9
1.3.2	Le supercondensateur	10
1.3.2.1	Principe de fonctionnement	10
1.3.2.2	Caractéristique	10
1.3.2.3	Applications	11
1.3.3	Les batteries	11
1.3.3.1	Les différents types de batteries	11
1.4	Etat de l'art des systèmes hybrides	14
1.5	Conclusion	17

Chapitre 2

Modélisation du système d'entraînement

2.1	Introduction	19
2.2	Modélisation du système	19
2.2.1	Modèle du générateur photovoltaïque	19
2.2.1.1	Caractéristique I-V	21
2.2.1.2	Influence de l'éclairement et la température	21
2.2.2	Modèle de la batterie	23
2.2.2.1	Equation électrique de charge et décharge	24
2.2.2.2	Equation de l'état de charge	25
2.2.3	Modèle du Supercondensateur	26

2.2.3.1	Equation électrique de charge et décharge	27
2.2.3.2	Equation de l'état de charge	27
2.2.4	Modèle de la MSAP avec l'Ascenseur	28
2.2.4.1	Equations électriques	29
2.2.4.2	Equations magnétiques	29
2.2.4.3	Equations de la machine dans les axes d-q	30
2.2.4.4	Equation mécanique	31
2.2.5	Modèles des convertisseurs statiques	34
2.2.5.1	Modèle moyen du convertisseur survolteur du GPV	34
2.2.5.2	Modèle moyen du convertisseur bidirectionnel de la batterie	37
2.2.5.3	Modèle de l'onduleur de tension	39
2.3	Dimensionnement des sources	40
2.3.1	Dimensionnement du GPV	40
2.3.2	Dimensionnement de la batterie	41
2.3.3	Dimensionnement des Super condensateurs	41
2.4	Conclusion	41

Chapitre 3

Description des approches De commande

3.1	Introduction	43
3.2	Description du gestionnaire d'énergie	44
3.3	Description des modes de fonctionnement	45
3.4	Commande des différentes sources	46
3.4.1	Commande du générateur photovoltaïque	46
3.4.1.1	Commande en mode MPPT	46
3.4.1.2	Commande en mode régulation de puissance	50
3.4.2	Contrôleur robuste du bus continu	52
3.4.3	Commande de la batterie	53
3.4.4	Commande des Supercondensateurs	55
3.5	Commande vectorielle en position de la MSAP	56
3.5.1	Synthèse des différents régulateurs	58
3.5.1.1	Correcteur de Position	58

3.5.1.2	Correcteur de vitesse	59
3.5.1.3	Les régulateurs de courant id et iq	60
3.6	Conclusion	62

Chapitre 4

Résultats de simulation

4.1	Introduction	64
4.2	Profil de l'éclairement, de la position de référence et de la charge	64
4.3	Résultats de simulation des puissances	65
4.4	Caractéristiques des courants	70
4.5	Caractéristiques des tensions	75
4.6	Caractéristiques de commande	80
4.7	Résultats de simulation de la MSAP	83
4.8	Conclusion	88
	Conclusion générale	90
	Annexe	93
	Bibliographie	97

Introduction Générale

Dans les prochaines décennies, la stagnation probable de la production du pétrole entre 2020 et 2030, et les conséquences du changement climatique obligeront les gouvernements à employer l'énergie de façon plus efficace et à recourir à de nouvelles sources d'énergie moins polluantes [MAK-08]. L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. Les énergies renouvelables, notamment d'origine solaire, éolienne, hydraulique, ainsi que la biomasse fonctionnent dans de nombreuses régions du monde.

L'intermittence des énergies renouvelables pose des problèmes d'approvisionnement en particulier pour les sites isolés du réseau de distribution électrique. Dans ce cas, au moins un élément de stockage de l'énergie devient alors obligatoire pour assurer la continuité de la fourniture d'électricité au client. Les sources raccordées au réseau électrique nécessitent également parfois des moyens de stockage intermédiaires afin d'ajuster, en temps réel, l'offre et la demande d'électricité. Ces sources d'énergies renouvelables et les éléments de stockage associés constituent ainsi un système hybride. Le terme « Système d'Energie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources.

Le système hybride présente en somme un double avantage afin de minimiser les perturbations de l'environnement grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et d'une sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques [BEL-12].

Les Système d'Energie Hybride sont généralement conçu aux systèmes stationnaires ou embarqués ayant des besoins ponctuels de puissance, l'association d'une source d'énergie (groupe électrogène, panneaux photovoltaïques, batteries, etc.) avec une source de puissance (supercondensateurs, volant d'inertie, etc.) permet de bénéficier de l'apport de chacune en les sollicitant suivant leurs caractéristiques et le profil de mission à satisfaire [PAI-10_a].

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un champ photovoltaïque (PV) qui est devenue une source alternative prometteuse car elle présente de nombreux avantages comme l'abondance, la pollution libre et renouvelable. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) jouera un rôle important dans la

lutte contre la crise de l'énergie et de réduire la pollution de l'environnement et a une belle perspective d'applications. Les éléments de stockage les plus utilisés pour des systèmes électriques hybrides sont les super condensateurs et les batteries, les supercondensateurs sont envisagés pour compléter les batteries au plomb. Des solutions combinant supercondensateurs et autres sources primaires d'énergie sont aussi évaluées pour des applications telles que le véhicule électrique et les alimentations de secours (forte puissance). Les supercondensateurs ont permis le développement des véhicules hybrides, l'énergie de freinage étant récupérée par les supercondensateurs qui la restitue pour les pics de puissance nécessaires au démarrage du moteur[CAM-11].

Dans ce contexte que nous nous sommes intéressés, à un système électrique hybride permettant de faire fonctionner un ascenseur de 3mètres de hauteur. Des panneaux photovoltaïques, des batteries, et des supercondensateurs alimentent, via des convertisseurs de puissance, la machine synchrone à aimants permanents (entraînement direct) pour déplacer la cage de l'ascenseur.

Les buts envisagés de ce travail sont :

- L'intégration d'un système de supervision est fort intéressante. En effet, le système à énergie hybride étudié présente une structure complexe, et pour une meilleure intégration des sources interconnectées, il faut non seulement des systèmes de commande individuels mais aussi un système global de supervision, et c'est là que réside le point le plus lourd du système hybride. Le superviseur d'énergie proposé basé sur des règles permet une permutation souple des différents modes de fonctionnement afin d'assurer l'énergie demandée par la charge.
- Des stratégies de contrôle pour les convertisseurs de puissance sont présentées afin de protéger les équipements et de gérer les échanges de flux d'énergie entre les sources et la charge.
- La Conception d'une commande MPPT basée sur la logique floue du convertisseur DC/DC connecté au GPV.

Pour atteindre ces objectifs, quatre chapitres sont proposées.

- Dans le premier chapitre, un aperçu général sur les systèmes de génération hybride, ainsi que l'état de l'art de ces systèmes sont présentés.
- La modélisation et la caractérisation des différents éléments constituant le SEH sont détaillées dans le deuxième chapitre.
- Le troisième chapitre est consacré à la commande des convertisseurs DC/DC, du moteur synchrone à aimant permanent et du convertisseur DC/AC. Une description du gestionnaire d'énergie est présentée en début de ce chapitre.
- À partir de ces modèles et lois de commande au système ascenseur, des simulations sont effectuées et présentées dans le dernier chapitre.

CHAPITRE 1

Généralités sur les systèmes hybrides

1.1 Introduction

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgente la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie, un fait qui interpelle plus fort que jamais le développement des **énergies renouvelables**.

Il existe différentes sources d'énergie renouvelables disponibles sur la planète dont les principales sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse et la géothermie. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire [LAB-06], [BEN-11].

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est liée à la variabilité des ressources. Les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources. Pour les régions isolées, la solution à retenir est certainement le couplage entre plusieurs sources, par exemple des éoliennes, des panneaux photovoltaïque et des générateurs diesel.

Le système de génération hybride, peut être combiné à différents types d'énergies renouvelables associées avec des unités disponibles de stockage pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur [THO-07].

1.2 Généralités sur les systèmes hybrides

1.2.1 Définition des systèmes hybrides

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH).

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables[BAG-11]. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes

d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [VEC -05].

1.2.2 Topologies des Systèmes Hybrides

1.2.2.1 Architecture à bus continu

Dans le système hybride présenté dans la figure suivante, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu [VEC -05].

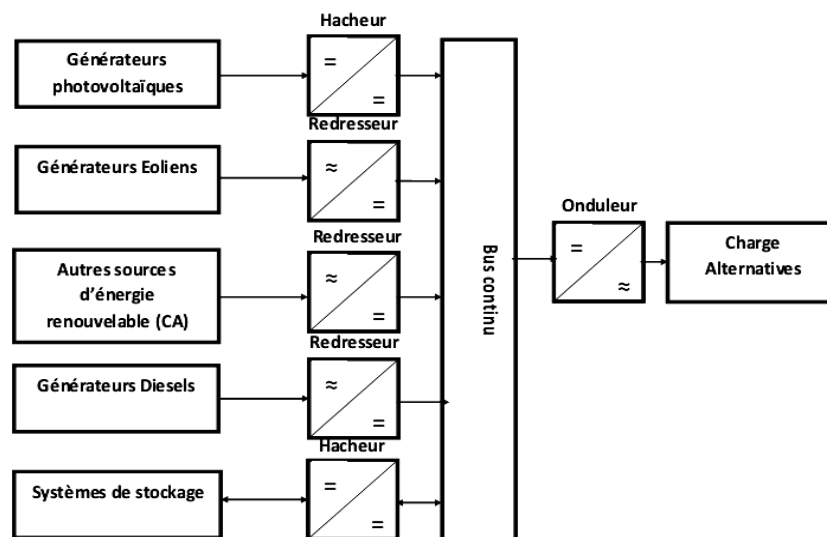


Figure (1.1): configuration du système hybride à bus continu

1.2.2.2 Architecture à bus alternatif

Dans cette topologie, tous les composants du système hybrides ont reliés à la charge alternative, comme montrée sur la figure (1.2). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs, Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. La réalisation de ce système est

relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge [TIA-11].

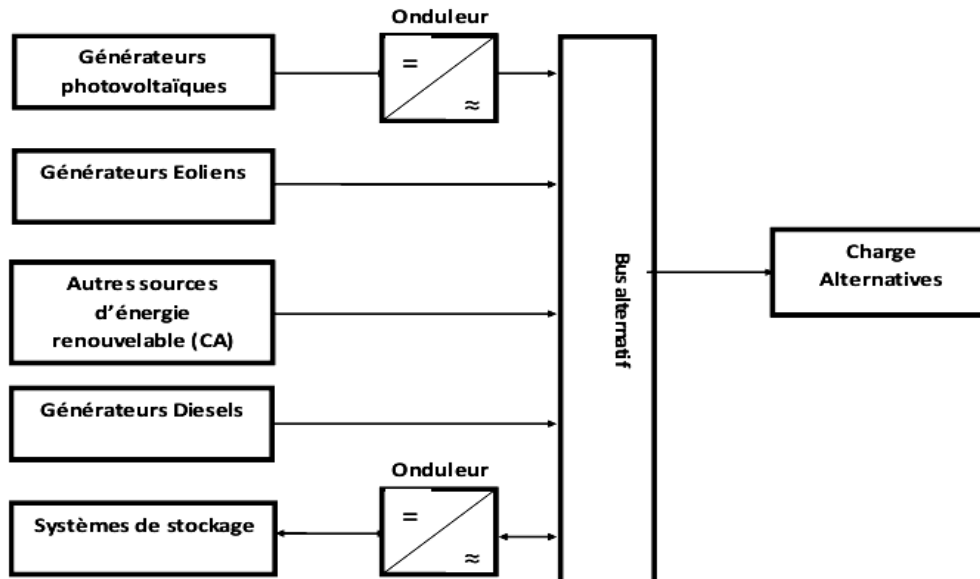


Figure (1.2) : configuration du système hybride à bus alternatif

1.2.2.3 Architecture à bus continu/alternatif

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesels (GD) et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Celles-ci sont résumées dans la Figure (1.3). Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels [BAG-11].

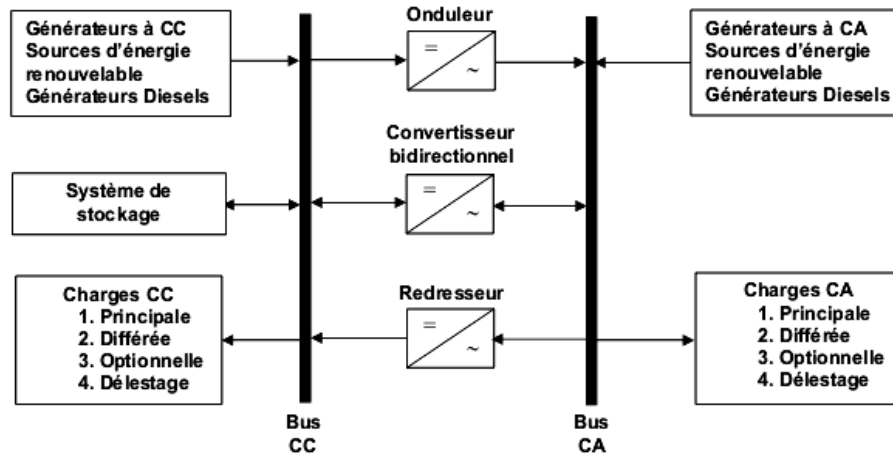


Figure (1.3) : Architecture du système hybride à bus CC/AC

Sur la figure (1.4) est illustrée un exemple type de cette configuration (système hybride PV/éolien/Diesel), ou le dipôle PV/Diesel peut également être couplé avec d'autres sources d'énergie, telles que les turbines éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a complémentarité des productions électriques. Dans les régions ensoleillées avec des vents forts l'hiver, les systèmes PV /éolien/diesel permettent d'exploiter en plus l'énergie du vent pour couvrir une part de l'exigence de la charge qui, autrement serait couverte par un groupe diesel[BRI-12].

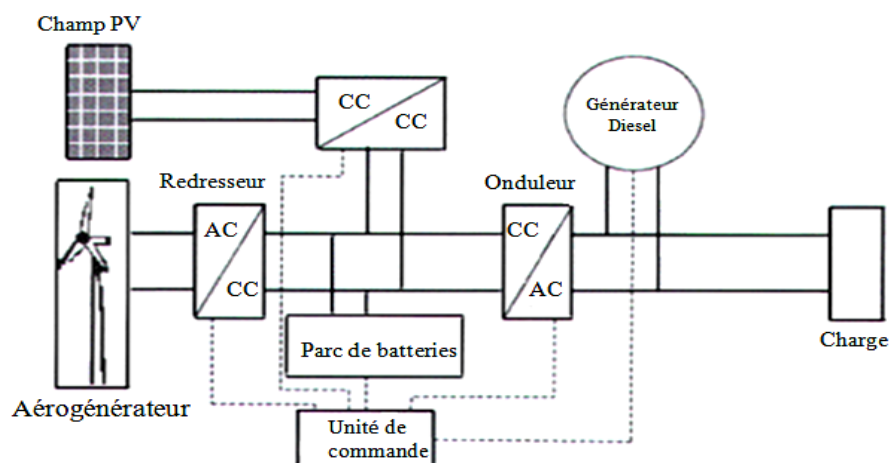


Figure (1.4): Modèle général d'un système hybride PV /éolien/diesel

1.3 Principaux Composants des systèmes hybrides

Notre système à étudier dans ce travail, est un ascenseur alimenté d'une part par source principale : le générateur photovoltaïque, et des éléments de stockage (batteries et supercondensateurs) comme sources d'appoint. Dans ce qui suit, on décrira d'une manière brève le principe de ces conversions.

1.3.1 Le Générateur solaire

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommée cellule PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant tension I-V non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM) [BOU-07].

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau (fig. (1.5)) [BAG-11].

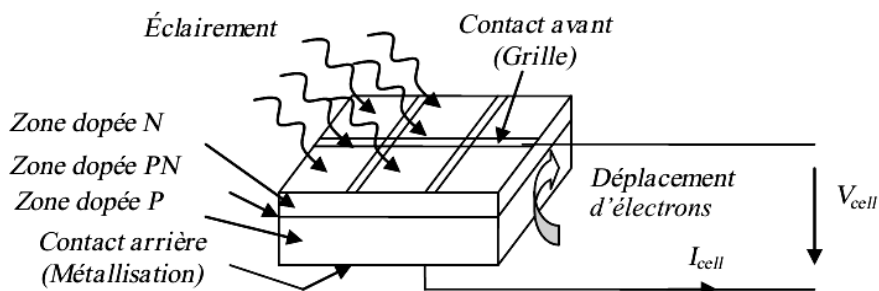


Figure (1.5) : Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ces composants et définit leur performance. Le rendement est fonction du type de semi-conducteur utilisé et est directement lié au «band gap». Pour le silicium

cristallin, le rendement théorique maximum est de 44 %. Le silicium n'est pas le meilleur matériau, son «band gap» est de 1.10 eV, celui de l'arséniure de gallium (GaAs) a un «band gap» quasi optimal de 1.4 eV. Le rendement commercial des cellules monocristallines est de l'ordre de 12 à 17 % maximum [BOU-11_b]. Le générateur est une combinaison en série et en parallèle des modules solaires, composés à leurs tours de 34 à 70 cellules selon la tension souhaitée.

1.3.2 Le supercondensateur

1.3.2.1 Principe de fonctionnement

Un supercondensateur est formé de deux collecteurs métalliques (généralement en aluminium), de deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique (pouvant atteindre plusieurs centaines ou milliers de m² par gramme de matière) plongeant dans un électrolyte (conducteur purement ionique, isolant électronique) et d'une membrane de séparation poreuse, comme il est illustrée sur la figure (1.6). Quand les électrodes sont chargées, les ions de l'électrolyte se déplacent sous l'influence du champ électrique en direction de l'électrode de signe opposé. Lorsque le condensateur est chargé, une fraction des anions et des cations est localisée tout contre l'électrode de façon à équilibrer la charge en excès dans le carbone actif. Ainsi, on obtient à l'interface entre le carbone et l'électrolyte deux couches de charges en excès de polarité opposée appelées double couche électrochimique [CAM-11].

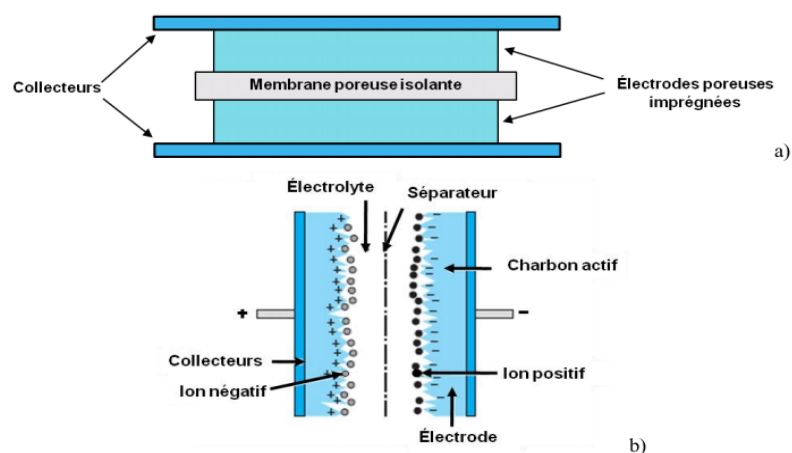


Figure (1.6) Constitution d'un super condensateur

1.3.2.2 Caractéristique

Le supercondensateur possède une puissance instantanée très importante et une durée de vie très élevée d'environ 100 000 cycles [SAD-13]. Il a une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels, et permet ainsi d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (supérieures à 3600 F).

La puissance spécifique des super condensateurs est supérieure à 10 kW/kg. Il est donc très intéressant d'utiliser ces composants comme source de puissance auxiliaire dans les véhicules électriques [PAI-10_a]. Les supercondensateurs actuels qui vont jusqu'à quelques kilo Farads, sont capables de travailler sur un domaine des températures allant de -40 à 70°C. Les tensions de cellule sont très faibles de l'ordre de 2.7 V, mais la mise en série de plusieurs cellules permet d'atteindre des tensions élevées [CAM-07].

1.3.2.3 Applications

De nouveaux concepts d'applications et des produits sont en développement, particulièrement dans les véhicules hybrides pour réduire la consommation. L'introduction de ces composants de stockage dans les applications de transport semble être une réalité industrielle. Une hybridation de ce type de sources avec des batteries permet de répondre la demande de la charge en toutes circonstances, ou le supercondensateur couvre l'appel d'énergie en dynamique, alors que le banc de batterie assure l'alimentation en statique [CAM-07].

1.3.3 Les batteries

Un accumulateur électrochimique ou batterie est un système permettant de convertir de l'énergie électrique en une énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en énergie électrique lors de la décharge. C'est la modification chimique de l'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie.

1.3.3.1 Les différents types des batteries

a) Les batteries au nickel

Le nickel est un métal plus léger que le plomb et propose un potentiel électrochimique intéressant pour une application pour les batteries. On distingue quatre différents couples

électrochimiques utilisés par des batteries au nickel : nickel fer, nickel cadmium et nickel métal hydrure [PAI-10_a].

➤ **Nickel fer (Ni-Fe)**

Thomas Edison en 1901 a mis au point la première batterie nickel fer. Ce type de batterie a été beaucoup utilisé (50 % du marché des voitures électriques) au début du XXème siècle. Cette batterie utilise une électrode positive en nickel et une électrode négative en fer. L'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium [PAI-10_a].

➤ **Nickel cadmium (Ni-Cd) :**

Les accumulateurs nickel-cadmium ont été découverts en Suède par Waldemar Jungner, qui déposa un premier brevet en 1899, qu'il étendit aux États-Unis en 1901 [CAM-11]. Elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium. La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70% [BEL-07].

➤ **Nickel métal hydrure (Ni-MH)**

Les batteries Ni-MH ont remplacé les batteries nickel cadmium dans de nombreuses applications ces dernières années. Elles offrent de meilleures performances sans les problèmes de toxicité du cadmium [PAI-10_a]. Les batteries Ni-MH sont constituées d'une électrode positive en nickel et d'une électrode négative en hydrogène absorbé dans du métal [BEN-11]. L'électrolyte est composé d'une solution d'hydroxyde de potassium. Ce type de batterie est très sensible à l'intrusion d'air. L'hydrogène réagirait immédiatement. Elles sont pourvues d'une soupape de sécurité pour pouvoir dégazer lors de surcharges. La tension à vide d'une cellule de nickel métal hydrure varie peu en fonction de son état de charge. Elle reste très proche de 1,2 V [PAI-10_a].

b) Les batteries acides plomb

Dans un système photovoltaïque, la puissance délivrée par le GPV est imprévisible et varie indépendamment de la demande. Ainsi, pour une installation PV autonome, l'unité de stockage est requise pour assurer un approvisionnement continu en énergie électrique. Parmi les

nombreuses technologies de stockage, la batterie au plomb est la plus utilisée dans les installations PV autonomes.

La batterie acide plomb a été inventée en 1859 par Gaston Planté [DIL-04] et fut utilisée dans le premier véhicule électrique («la jamais contente») en France en 1881. Ces batteries sont peu chères et leur technologie est maîtrisée. Elles comptent un grand nombre d'applications et permettent de fournir des courants importants. La batterie au plomb ne présente pas seulement des avantages. La densité énergétique du couple plomb/acide est assez faible. Ces performances sont très dépendantes de la température. En dessous de 10°C, la puissance et la capacité sont alors fortement réduites. L'utilisation de batterie au plomb dans des pays froids nécessite un système de chauffage des batteries pour que ces dernières soient pleinement efficaces [PAI-10_a].

➤ **Caractéristiques électriques**

- Capacité en Ampère heure

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant [BAG-11].

-Température

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [BEN-11].

- La durée de vie

Est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale [BOU-11_b].

- Le taux d'autodécharge

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

- La tension d'utilisation

Dans le cas de la décharge d'une batterie, la tension minimale acceptable est appelée tension seuil de décharge. La baisse au-dessous de cette tension est appelée décharge profonde, durant laquelle la batterie peut être endommagée. Dans le cadre du photovoltaïque, la tension seuil de décharge pour une batterie au plomb de 12V est de 11,7V. En ce qui concerne la recharge d'une batterie, une tension supérieure à la tension nominale doit être appliquée. Cependant, cette tension ne doit pas dépasser une certaine valeur appelée tension de charge maximale. Pour une batterie de 12V, la tension de recharge est comprise entre 12V et 14,4V [BEL-07].

1.4 Etat de l'art des systèmes hybrides

Le travail effectué dans [SAD-13] concerne l'association de sources d'énergie électrique de natures différentes pour l'alimentation de véhicules électriques. Ce principe a été l'objet d'une étude de dimensionnement poursuivie par des essais expérimentaux, et ce par la combinaison des batteries Li-ion et des super condensateurs. Grâce à la gestion en temps réel de l'état de charge des super condensateurs, le volume de ces derniers a pu être réduit. De manière générale, l'hybridation batteries/super condensateurs permet d'améliorer les caractéristiques en masse, volume et coût des systèmes de stockage d'énergie.

Pour le dimensionnement du système hybride, l'auteur a constaté que le bon choix de la tension d'alimentation optimise les performances. Par ailleurs, l'utilisation de batteries Li-ion Ultra Haute Puissance pour l'hybridation des batteries Li-ion a offert des résultats encourageants.

Dans [BOU-11_a], l'auteur mène une étude comparative entre les méthodes classiques (perturbation et observation (P&O), conductance incrémentale) et intelligentes (logique floue) pour le suivi de la puissance maximale du générateur. Les résultats de simulation ont démontré une supériorité notable de la dernière méthode lors des variations de l'éclairement et de la température, avec une oscillation minimale autour du point optimum. Dans le même contexte, [LAH-07] présente l'application des trois méthodes MPPT conventionnelles (Perturbation et Observation, Incrémentation de Conductance et Hill Climbing) pour l'alimentation d'une charge continue, et ce dans des conditions quasiment similaires pour pouvoir faire des comparaisons.

de performances des étages d'adaptation. L'auteur a déduit que la deuxième technique est plus rapide et plus stable.

Le travail présenté dans [BOU-11_b] est consacré à l'étude des performances de la commande non linéaire appliquée à la machine synchrone à aimants permanents. Deux techniques de commande non linéaire ont été appliquées à la machine pour tester ses performances, en l'occurrence une commande par mode glissant et une commande non linéaire obtenue de la théorie de la stabilité de Lyapounov. Des tests de robustesse par la variation de la résistance du stator ont enfin été effectués. Les résultats obtenus pour les deux commandes présentent des performances intéressantes dans le fonctionnement nominal, mais la commande par mode glissant semble plus robuste par rapport à la commande déduite de la théorie de Lyapounov lors des variations paramétriques.

Dans [BEH-10], [BEC-06], [AYD-07], la commande par passivité (Passivity Based Control) est appliquée pour assurer le contrôle et la gestion de l'énergie entre les différentes sources utilisées du système hybride, ou [BEC-06] utilise la pile à combustible et le supercondensateur pour alimenter une charge de type (R-L) et le système étudié dans [AYD-07] est constitué d'une batterie, d'une pile à combustible à basse température et de supercondensateurs. Le problème du contrôle de la tension du bus continu est résolu en utilisant les contrôleurs linéaires simples basés sur l'approche d'IDA-PBC. Un grand avantage des différents dispositifs de commande est la mesure seulement de deux variables (tension de la pile à combustible et le courant du SC), pour contrôler le système global. De nombreux avantages peuvent être attendus de la structure proposée, parmi les quelles la possibilité de fournir et d'absorber les pics de puissance à l'aide du SC, ce qui permet également de récupérer l'énergie.

L'étude de [HAS-10], propose un algorithme de supervision d'énergie pour un mini réseau hybride autonome, utilisant un panneau photovoltaïque et une éolienne, permettant de calibrer l'exploitation de ces sources. Pour adapter la production des sources renouvelables au besoin de la charge, une batterie de stockage est intégrée. Toutefois, en vue de sécuriser la batterie d'une part et assurer une alimentation continue de l'installation d'autre part, l'intervention d'une source complémentaire d'énergie, tel qu'un groupe électrogène, s'avère nécessaire. L'algorithme de gestion est développé pour couvrir les besoins énergétiques de l'installation en cas de manque ou d'absence d'énergie, basé sur un système de

commutation douce s'impose. Ce système est formé par deux commutateurs (I1 et I2) qui relie respectivement le groupe diesel et les deux sources renouvelables. Cet outil doit :

- Empêcher les décharges profondes et les surcharges de la batterie.
- Assurer l'alimentation continue de l'installation en engageant un groupe diesel.
- Calculer le temps de démarrage du groupe diesel en respectant son temps de réponse et l'état de charge de la batterie.

Le principal objectif de [THO-05] était de proposer une stratégie de contrôle d'un bus continu alimenté par une source hybride constituée d'une batterie et de super condensateurs comme sources auxiliaires et d'une pile à combustible comme source principale. La variable de contrôle considérée était la régulation de la tension du bus continu. Les différents résultats expérimentaux présentés ont été obtenus sur un banc d'essais représentant une maquette à échelle réduite d'un système de type application automobile. Les tests présentés ont souligné la lenteur de la réponse de la pile à combustible à des transitoires de courant, démontrée lors du démarrage et de freinage d'un moteur à courant continu connecté au bus continu, ainsi que pendant des échelons de charge.

Par ailleurs, J. W. Dixon [DIX-02], a présenté un véhicule hybride batterie/super condensateurs (20 F, 300 V, 200 A) d'une puissance de 32 kW. Ces travaux ont permis de gérer l'énergie entre un module de super condensateurs et des batteries. Les super condensateurs étaient utilisés pour les grandes accélérations et les grands ralentissements du véhicule avec des pertes minimales d'énergie, et évitaient la dégradation des batteries principales.

1.5 Conclusion

Dans le présent chapitre, un aperçu macroscopique des systèmes de génération hybride, une description des différentes sources utilisées ont été brièvement donnés. En outre, une lecture d'un ensemble de documents figurant dans la bibliographie, nous ont permis d'inspirer quelques idées utiles pour le contrôle de notre système d'entraînement.

CHAPITRE 2

Modélisation du système

D'entraînement

2.1 Introduction

Ce chapitre présente la modélisation des différents sous systèmes de l'architecture de la figure (2.1). Cette dernière inclut un générateur PV, un système de stockage composé des batteries et des supercondensateurs, des convertisseurs DC/DC et un système ascenseur piloté par une machine synchrone à aimants permanents.

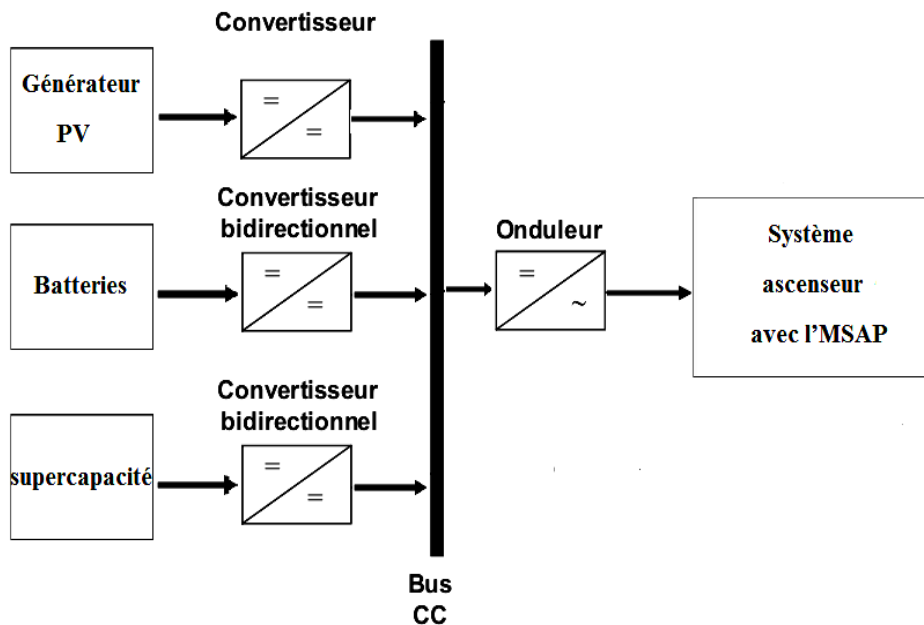


Figure (2.1): schéma synoptique de l'installation hybride

2.2 Modélisation du système

2.2.1 Modèle du générateur photovoltaïque

L'assemblage de plusieurs modules solaires est appelé: générateur photovoltaïque, Où chaque module se compose de plusieurs cellules, la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant[BOU-07] :

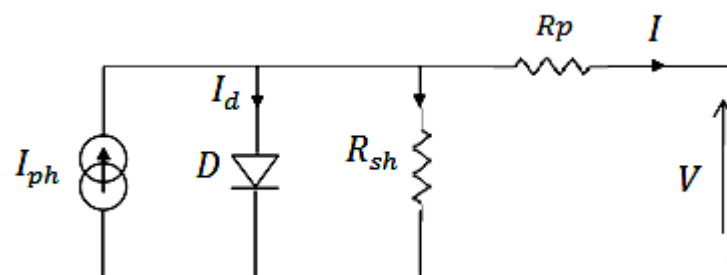


Figure (2.2) : schéma équivalent d'une cellule solaire

Ce dernier est considéré comme le plus classique dans la littérature, où il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt)(fig. (2.2)). Généralement pour les cellules cristallines, la résistance shunt est grande, et le modèle se réduit alors à quatre paramètres (I_{cc} , I_0 , R_p , V_{th}).

La caractéristique (I-V) est modélisée par une équation non linéaire de forme implicite :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_p I}{V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

Pour tracer la caractéristique (I-V), il faut tenir compte trois points de mesure, fournis par le constructeur :

- Le point de court-circuit (I_{cc} , 0).
- Le point à circuit ouvert (0, V_{oc}).
- Le point optimum (I_{op} , V_{op}), où le module délivre sa puissance maximale.

La tension thermique V_{th} et le courant d'obscurité I_0 s'identifient par :

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_p I_{op} - V_{oc}}{\log \left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}} \right)} \quad (2.2)$$

$$I_0 = (I_{cc} - I_{op}) \exp \left[- \frac{(V_{op} + R_p I_{op})}{V_{th}} \right] \quad (2.3)$$

Les paramètres du générateur sont liés à ceux du module par les relations suivantes :

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc}(\text{module}).$$

$$V_{th} = N_s \cdot V_{th}(\text{module}).$$

$$r_s = (N_s / N_p) \cdot R_p(\text{module}).$$

$$I_0 = N_p \cdot I_0(\text{module}).$$

$$V_{oc} = N_s \cdot V_{oc}(\text{module}).$$

$$V_{op} = N_s \cdot V_{op}(\text{module}).$$

Pour d'autres niveaux d'éclairements et de températures, on fait recours aux lois suivantes :

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (2.4)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{ccref} \quad (2.5)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - r_s \Delta I \quad (2.6)$$

Donc les nouvelles valeurs des courants et de tensions sont sous la forme :

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (2.7)$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (2.8)$$

2.2.1.1 Caractéristique I-V

La figure (2.3) représente la caractéristique (courant, tension) tracée pour un éclairement $E=1000\text{W/m}^2$ et une température ambiante $T = 25^\circ\text{C}$. On constate que la caractéristique I-V se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension dans la partie verticale. On note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale, située sur le coude de la caractéristique.

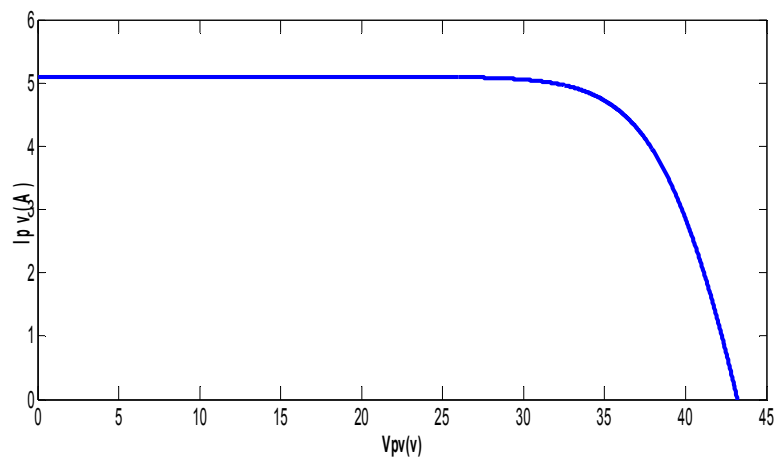


Figure (2.3): Caractéristiques I-V du module photovoltaïque

2.2.1.2 Influence de l'éclairement et la température

Avec une température de la jonction constante ($T_c = 25^\circ\text{C}$), à différents éclairements (fig. (2.4)), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit (I_{CC}) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert (V_{OC}) est une fonction logarithmique.

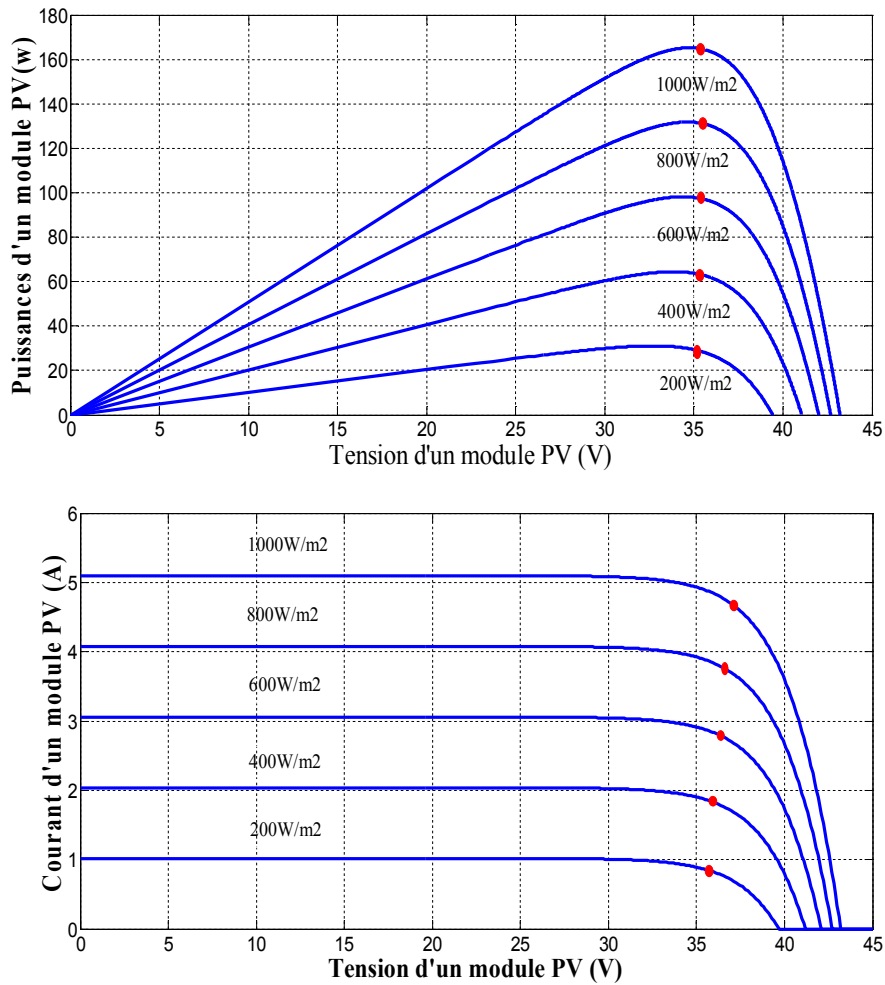


Figure (2.4) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $T=25^{\circ}\text{C}$

Puisque l'énergie du band gap décroît avec l'augmentation de la température, plus de photons ont assez d'énergie pour créer des paires électrons-trous. Par conséquent, le courant de court circuit augmente légèrement [ARR-07]. Nous avons effectué une simulation pour un éclairement constant et des différentes températures (fig. (2.5)). Les résultats de simulation montrent que la tension diminue avec l'augmentation de la température alors que le courant augmente légèrement, cela se traduit par une baisse de puissance d'environ de $0.4\%/^{\circ}\text{C}$.

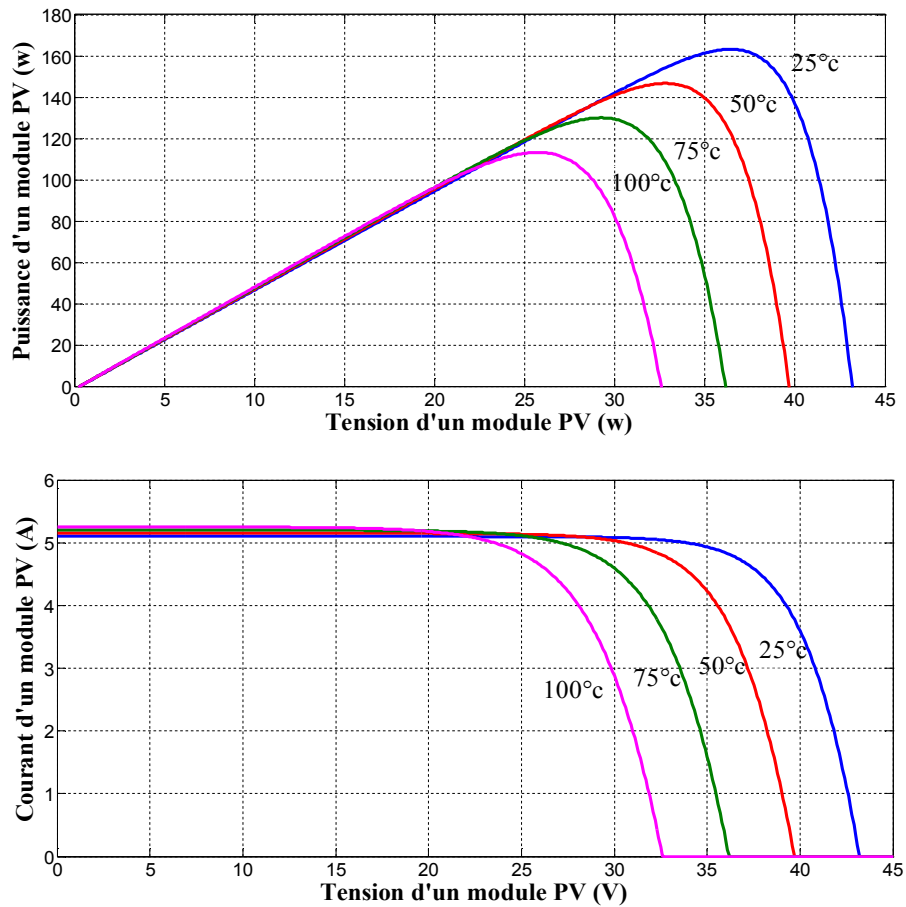


Figure (2.5): Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $E=1000W/m^2$

2.2.2 Modèle de la batterie

Toute batterie est un ensemble d'éléments ou des cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, où le courant circule sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie (fig. (2.6)) [BOU-11_b].

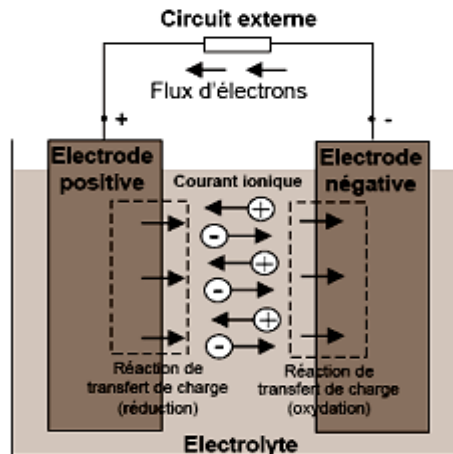


Figure (2.6): Cellule électrochimique de base

Actuellement, la technologie la plus largement utilisée pour les applications photovoltaïques est la technologie au Plomb (Pb)[RIF-10]. C'est encore la technologie la plus compétitive et la mieux maîtrisée. Nous présentons ici le modèle de cet accumulateur.

Le modèle de la batterie adopté est celui permettant de prédire l'autonomie du système ascenseur, c'est-à-dire permettre à chaque instant d'estimer l'énergie restante (état de charge SOC_{bat} ou profondeur de décharge DoD) dans la batterie [PAI-10_a]. Le modèle choisi est, par conséquent, un modèle équivalent électrique (fig. (2.7)) composé d'une source de tension en série avec une résistance (résistance interne) [GER-02], [RIF-10].

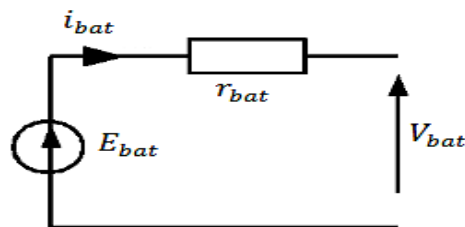


Figure (2.7) : Modèle équivalent électrique simple d'une batterie

2.2.2.1 Equation électrique de charge et décharge

La tension en charge est déduite directement à partir de la tension à vide et de la chute de tension due à la résistance interne série [OUL-07]:

$$V_{bat} = E_{bat} - r_{bat} \cdot i_{bat} \quad (2.9)$$

La tension à vide E_{bat} est approximativement proportionnelle à l'état de charge de la batterie [DAN-12]. En considérant la variable DoD comme paramètre variant entre 0 et 1, selon

que la batterie est chargée ou déchargée pleinement, l'équation (2.10) présente un modèle valide l'équation électrique.

$$E_{bat} = n(2.15 - DOD \cdot (2.15 - 2.00)) \quad (2.10)$$

$$DOD = 1 - SOC_{bat} \quad (2.11)$$

2.2.2.2 Equation de l'état de charge

L'état de charge de la batterie est un paramètre estimé pendant que la batterie est traversée par un courant électrique. Le SOC_{bat} est donné par le rapport entre la capacité actuelle disponible et la capacité totale effective disponible à l'instant qui précède l'utilisation [SAD-13].

$$SOC_{bat} = \frac{C_{actuelle}}{C_{totale}} = SOC_{b_{int}} + \frac{100}{C_N} \int i(t) dt \quad (2.12)$$

Pour tester la validité du modèle, la figure (2.8) représente les allures de tension et de l'état de charge de la batterie résultant d'une charge à courant constant ($i_{bat} = -8A$), puis une décharge à ($i_{bat} = 8 A$). On remarque bien une augmentation monotone du SOC_{bat} dans le premier cas jusqu'à 0.89, puis une diminution, allant à 0.3 en décharge.

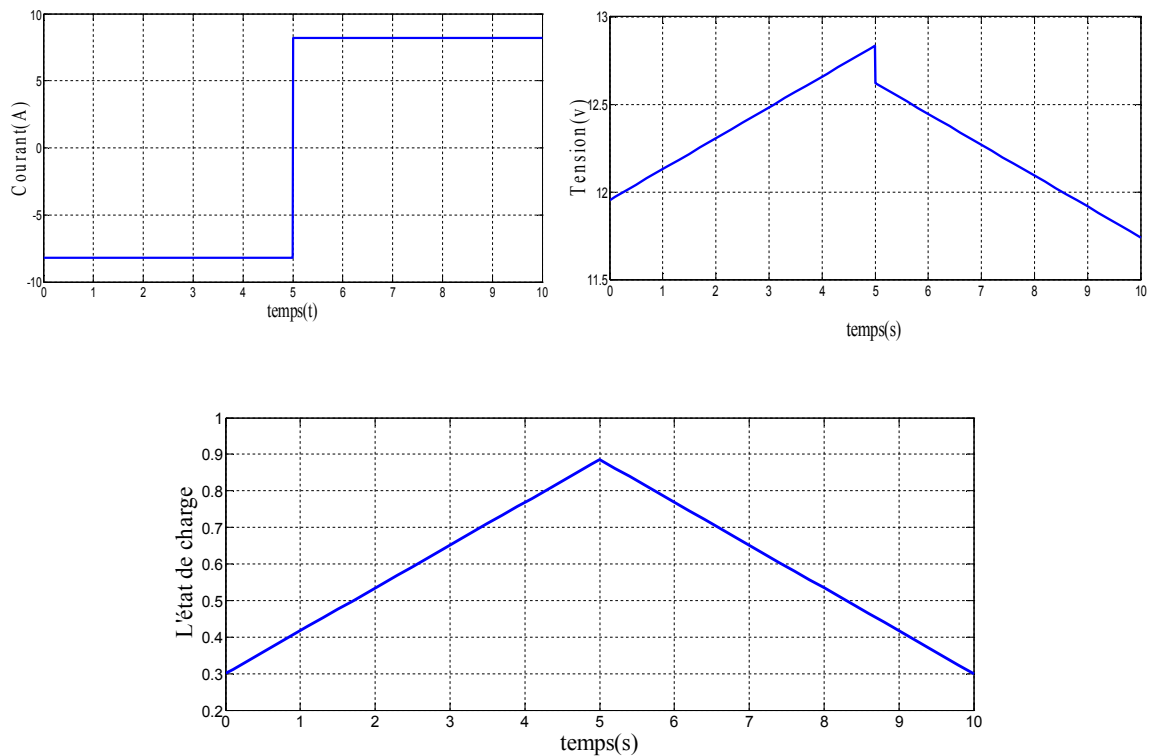


Figure (2.8) : Tension, courant et état de charge de la batterie en fonction du temps

2.2.3 Modèle du Supercondensateur

Les supercondensateurs constituent une nouvelle technologie de stockage d'énergie spécifique supérieure à celle des condensateurs usuels, et de puissance spécifique supérieure à celle des accumulateurs électrochimiques.

Les supercondensateurs à couche double électrique, curieusement appelées capacités électrochimiques, ont en fait un fonctionnement analogue à celui des capacités électrostatiques classiques. Les dites sont typiquement constituées de deux électrodes métalliques séparées par un matériau diélectrique. L'énergie est stockée sous forme d'une charge électrique induite au voisinage de l'interface électrode-diélectrique, par l'application d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes. Le rapport de la charge stockée sur la tension appliquée est connu sous le nom de capacitance, ou capacité, et est représentatif de l'aptitude du dispositif à stocker de l'énergie. Les relations de base s'écrivent, pour une capacité linéaire [THO -05]:

$$c_1 = \frac{Q}{V_1} = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2.13)$$

$$w = \frac{1}{2} c_1 V_1^2 \quad (2.14)$$

Ainsi, l'objectif est d'établir un modèle de connaissance du stockage de l'énergie par supercondensateurs, suffisamment précis et accessible. Le modèle équivalent d'un élément supercondensateur est un condensateur C_{sc} en série avec une résistance (R_{sc}) [MAK-08] fig. (2.9)). La résistance décrit les pertes ohmiques de la composante tandis que la capacité désigne le comportement du supercondensateur pendant la charge et la décharge [AYD-07].

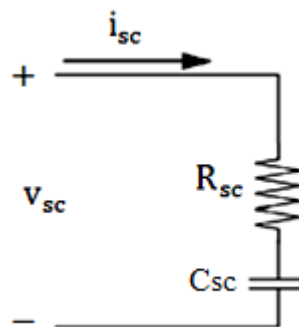


Figure (2.9) : Modèle d'un Supercondensateur

2.2.3.1 Equation électrique de charge et décharge

Pour analyser le circuit du modèle précédent, on admet que le courant du supercondensateur i_{sc} est positif pendant la phase de décharge et il est négatif pendant la phase de charge. La tension aux bornes des super condensateurs peut être présentée par :

$$v_{sc} = v_{csc} + R_{sc} \cdot i_{sc} \quad (2.15)$$

2.2.3.2 Equation de l'état de charge

L'état de charge, appelé SOC_{sc} , caractérise la quantité d'énergie présente dans les supercondensateurs. Il vaut 100% lorsqu'ils sont complètement chargés et 0% lorsqu'ils sont chargés à leur valeur minimale. L'équation (2.16) présente le modèle adopté dans ce travail [PAI-10_b].

$$SOC_{sc} = \frac{v_{sc}^2}{v_{scmax}^2} \quad (2.16)$$

Pour tester ce modèle, le graphe (2.10) illustre les tracés de la tension du supercondensateur et son état de charge lors du passage en créneau du courant de décharge de 0 à 20A. Comme on peut le constater, la tension et l'état de charge diminuent. Il est à noter que la tension aux bornes du supercondensateur peut être développée en deux termes : une composante capacitive, associée à l'évolution de l'énergie stockée dans l'élément, et une composante résistive, liée à la résistance série de l'élément. Le profil de charge sera similaire, mais dans un sens inverse de telle sorte que la tension aux bornes de la supercapacité augmente avec le temps de charge.

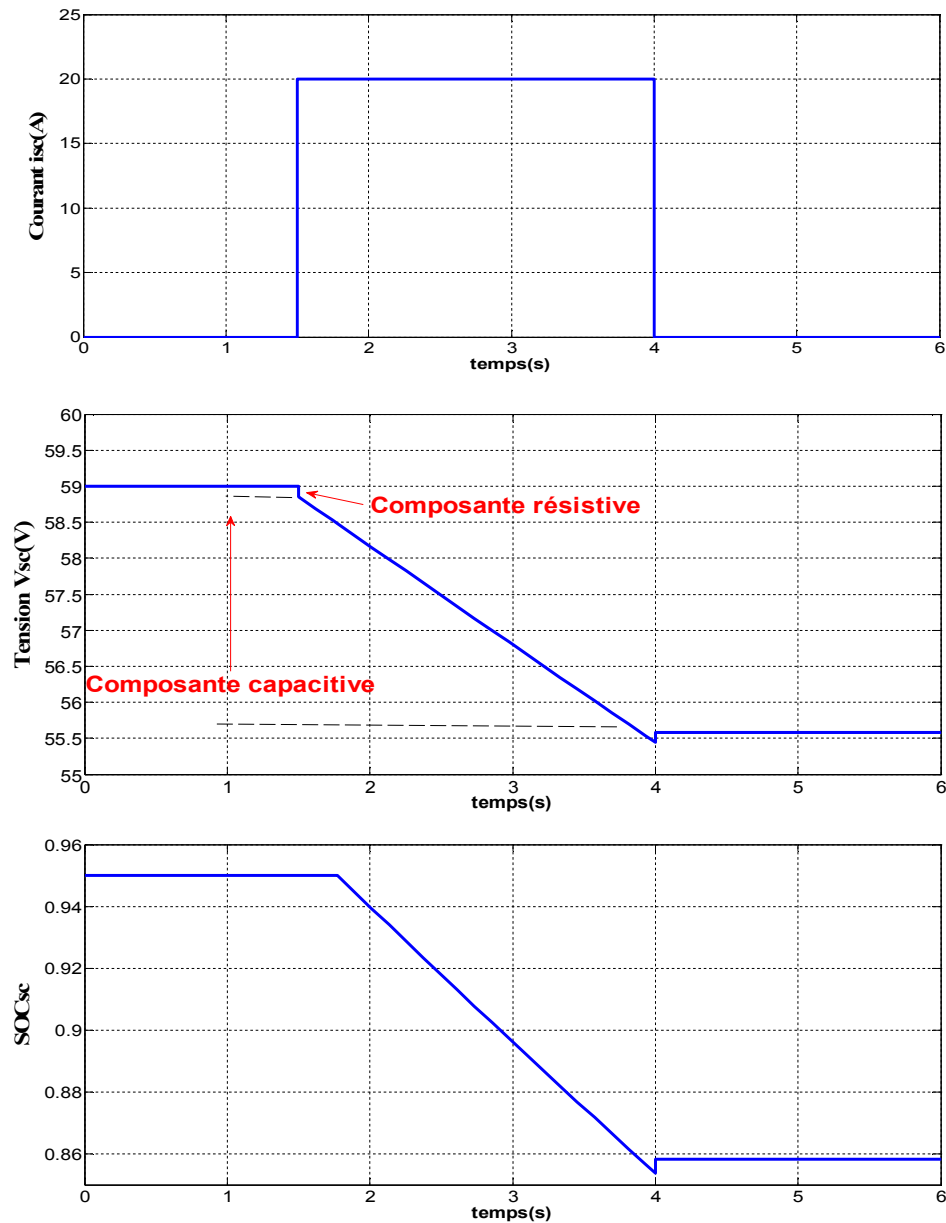


Figure (2.10) : Tension, courant et l'état de charge des supercondensateurs en cas de décharge

2.2.4 Modèle de la MSAP avec l'Ascenseur

La modélisation est une méthode mathématique utilisée pour réduire la machine électrique en un simple système d'équations différentielles. L'élaboration du modèle mathématique des machines est une étape nécessaire en vue de la commande et de la simulation de leurs différents régimes de fonctionnement. L'établissement des équations du modèle repose sur les hypothèses habituelles suivantes [BOU-08]:

On désigne par :

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statoriques. Elle contient des termes constants que nous regroupons dans $[L_{s0}]$ et des termes variables dépendant de θ_e , que nous regroupons dans $[L_{s2}(\theta_e)]$

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s2}] \quad (2.19)$$

Où :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} I_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & I_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & I_{s0} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$[L_{s2}] = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_e) & \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)\right) & \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \\ \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)\right) & \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)\right) & \cos(2\theta_e) \\ \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)\right) & \cos(2\theta_e) & \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$[M_{sf}] = M_f \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ \cos\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

2.2.4.3 Equations de la machine dans les axes d-q

Vu la dépendance des flux statoriques $[\Phi_s]$ de l'angle θ_e , la résolution des équations électriques (2.17) s'avèrent très difficile. Pour remédier à ce problème, on fait recours au modèle biphasé (équations (2.23)), via la théorie de Park [BOU-08] :

- Equations Electriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e L_{qs} i_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e L_{ds} i_{ds} + \omega_e \Phi_f \end{cases} \quad (2.23)$$

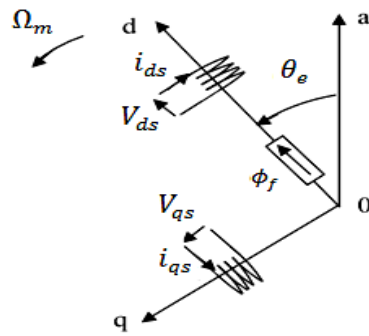


Figure (2.12) : Schéma de la machine synchrone dans le référentiel (d,q)

2.2.4.4 Equation mécanique

L'équation mécanique développée pour la machine est donnée par la relation conventionnelle suivante [LAH-09] :

$$C_e - C_r - f\Omega_m = J \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.24)$$

Le couple électromagnétique C_e est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les *FMMs* dans l'entrefer généré par les courants statoriques. Il est exprimé par :

$$C_e = P[(L_{ds} - L_{qs})i_{ds}i_{qs} + \phi_f I_{qs}] \quad (2.25)$$

Le couple résistant est calculé d'après le schéma du système ascenseur qui mesure 3m de hauteur et 1m de côtés. Il est constitué d'une cage (de masse M_c) et d'un contrepoids (de masse M_p) (fig. (2.13)). La transmission s'effectue grâce à une chaîne fixée sur la cage et le contrepoids, la liaison entre l'arbre moteur et la chaîne est réalisée via une roue dentée.

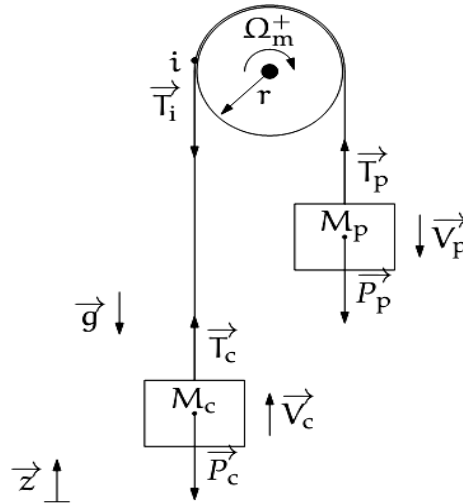


Figure (2.13) : Schéma simplifié du système de masses de l'ascenseur

Dans ce qui suit, on négligera la masse de la chaîne, les frottements de la transmission ainsi que l'inertie du pignon [PAI-10_a].

➤ *Bilan des forces sur la charge :*

Le bilan des forces sur la charge s'écrit :

$$\vec{T}_c + \vec{P}_c = M_c \frac{d\vec{V}_c}{dt} \quad (2.26)$$

Où la force de la charge T_c s'exprime par :

$$\vec{T}_c = M_c \frac{d\vec{V}_c}{dt} - M_c \vec{g} \quad (2.27)$$

Il vient alors :

$$T_c \vec{z} = M_c \frac{dV_c}{dt} \vec{z} + M_c g \vec{z} \quad (2.28)$$

$$T_c \vec{z} = M_c \left(\frac{dV_c}{dt} + g \right) \vec{z} \quad (2.29)$$

➤ *bilan des forces sur le contre-poids*

Le bilan des forces sur le contre-poids est le suivant :

$$\vec{T}_p + \vec{P}_p = M_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} \quad (2.30)$$

Il vient donc :

$$\vec{T}_p = M_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} - M_p \vec{g} \quad (2.31)$$

Or d'après la figure (2.13), la relation vectorielle entre les deux vitesses linéaires du poids et du contrepoids se met sous :

$$\vec{V}_p = -\vec{V}_c \quad (2.32)$$

Il en résulte :

$$\vec{T}_p = -M_p \frac{d\vec{V}_c}{dt} - M_p \vec{g} \quad (2.33)$$

$$T_p \vec{z} = -M_p \frac{dV_c}{dt} \vec{z} + M_p g \vec{z} \quad (2.34)$$

$$T_p \vec{z} = M_p \left(g - \frac{dV_c}{dt} \right) \vec{z} \quad (2.35)$$

➤ *Bilan des forces sur le pignon*

Le bilan des forces sur le pignon reportées au point i s'exprime par:

$$\vec{T}_i = \vec{T}_p - \vec{T}_c \quad (2.36)$$

$$-T_i \vec{z} = (T_p - T_c) \vec{z} \quad (2.37)$$

$$T_i \vec{z} = (T_c - T_p) \vec{z} \quad (2.38)$$

On en déduit donc le couple résistant du aux masses :

$$C_r = (T_c - T_p) r = \left[M_c \left(\frac{dV_c}{dt} + g \right) - M_p \left(g - \frac{dV_c}{dt} \right) \right] \cdot r \quad (2.39)$$

Ou

$$C_r = (M_c - M_p) g r + (M_c + M_p) \frac{dV_c}{dt} r \quad (2.40)$$

Or :

$$V_c = \Omega_m \cdot r \quad (2.41)$$

Dou finalement, l'équation (2.42) exprime le couple résistant du système ascenseur:

$$C_r = (M_c - M_p) g r + (M_c + M_p) r^2 \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.42)$$

Dans cette expression, on distingue bien la masse à lever qui vaut $(M_c - M_p)$ et l'inertie $(M_c + M_p)r^2$ qui s'oppose à la variation de vitesse.

2.2.5 Modèles des convertisseurs statiques

Dans beaucoup de cas, nous avons intérêt à transformer le système original en un système continu qui représente macroscopiquement au mieux les comportements dynamiques et statiques du circuit. A cet effet, le comportement moyen est tout à fait adapté. Le modèle dit « moyen » associé trouve un vaste champ d'applications que ce soit en commande, en simulation ou encore en analyse des modes [MER-09]. Le modèle moyen permet de répondre à trois exigences essentielles:

- Une simplicité de mise en œuvre et d'utilisation.
- Une précision suffisante dans son domaine de validité.
- La possibilité d'utilisation en boucle fermée : possibilité éventuelle de passer en fonction de transfert. Pour toutes ces raisons, le modèle moyen des convertisseurs statiques est adopté :

2.2.5.1 Modèle moyen du convertisseur survolteur du GPV

Le schéma (2.14) illustre le synoptique de l'hacheur survolteur pour la déduction du modèle d'état moyen [TIA-11]. Le transistor étant fermé de 0 à αT et ouvert de αT à T , avec:

- α est le rapport cyclique.
- T est la période de découpage.

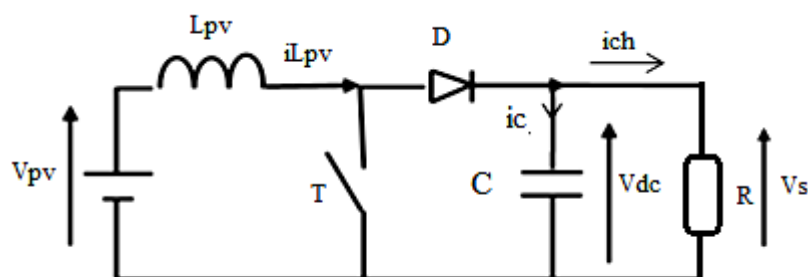


Figure (2.14) : Le schéma de principe d'un hacheur survolteur

Dans de tels systèmes, l'ordre d'équations d'états est égal au nombre des éléments de stockage (dans le cas présent $n=2$) [TIA-11].

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ y = C_1 \cdot X \end{cases} \quad (2.43)$$

Où X est le vecteur d'état, compos du courant de la bobine i_{Lpv} et la tension de sortie V_{dc} :

$$X = [i_{Lpv}, V_{dc}] \quad (2.44)$$

u: vecteur de commande, A: matrice d'état, B: matrice d'entrée et C: matrice de sortie.

Séquences de fonctionnement et équations d'état:

- Première séquence de conduction [0 - αT]:

Le transistor est en position "on" et la diode en position "off", et le schéma de principe devient:

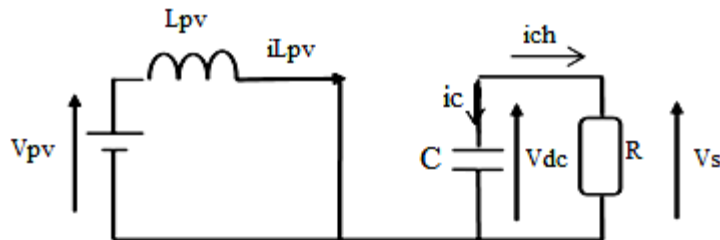


Figure (2.15) : Schéma de principe de la première séquence de conduction

Les équations dynamiques des éléments de stockage (bobine, condensateur) s'écrivent :

$$V_{pv} = L_{pv} \frac{di_{Lpv}}{dt} \quad (2.45)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{V_{pv}}{L_{pv}} \quad (2.46)$$

$$V_{dc} = \frac{1}{c} \int i_c dt \quad (2.47)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{c} i_c \quad (2.48)$$

$$i_c = -i_{ch} \quad (2.49)$$

Donc :

$$\dot{x}_2 = -\frac{V_{dc}}{Rc} \quad (2.50)$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{Rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (2.51)$$

Qui peut être écrit sous la forme :

$$\dot{X} = A_1 X + B_1 V_e \quad (2.52)$$

$$V_s = C_1 X \quad (2.53)$$

Avec : $C_1 = [0 \ 1]$

- Deuxième séquence de conduction: [αT - T]

Le transistor est en position " off " et la diode en position "ON", et le schéma de principe devient:

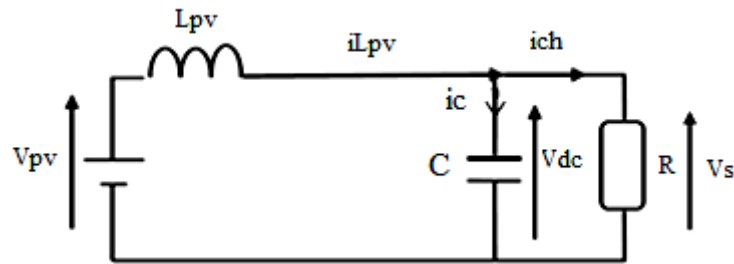


Figure (2.16) : Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction

Les équations des deux mailles fournissent :

$$L_{pv} \frac{di_{Lpv}}{dt} = V_{pv} - V_{dc} \quad (2.54)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{Lpv} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (2.55)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{V_{pv}}{L_{pv}} - \frac{1}{L_{pv}} x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \end{cases} \quad (2.56)$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_{pv}} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (2.57)$$

Qui peut être mit sous la forme:

$$\dot{X}_1 = A_2 X + B_2 V_e \quad (2.58)$$

$$V_s = C_1 X \quad (2.59)$$

Modèle moyen:

A partir des équations (2-51) et (2-57), on peut déduire la forme d'état moyenne de X et Y pour toute la période:

$$\dot{X}_1 = (A_1 X + B_1 V_e) \alpha + (A_2 X + B_2 V_e)(1 - \alpha) \quad (2.60)$$

$$V_s = (C_1 \alpha + C_1(1 - \alpha)) X \quad (2.61)$$

Avec :

$$\begin{cases} A = A_1 \alpha + A_2(1 - \alpha) \\ B = B_1 \alpha + B_2(1 - \alpha) \end{cases} \quad (2.62)$$

En conclusion: le modèle moyen du hacheur survolteur se met sous:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-\alpha}{L_{pv}} X_2 + \frac{1}{L_{pv}} u \\ \dot{x}_2 = \frac{1-\alpha}{c} X_1 - \frac{1}{RC} X_2 \end{cases} \quad (2.63)$$

2.2.5.2 Modèle moyen du convertisseur bidirectionnel de la batterie

Dans le cas de l' hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur PV) vers le bus continu. Dans le cas de l' Hacheur utilisé pour la charge/décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés comme l'indique la Figure (2.17) [VEC -05].

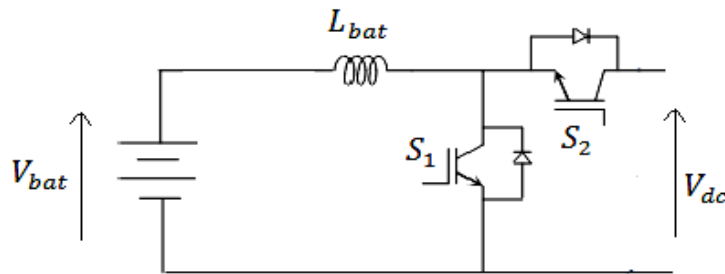


Figure (2.17) : Convertisseur associé aux batteries

- Séquences de fonctionnement et équations d'état:

De même, le modèle moyen du convertisseur réversible en courant de la batterie est adopté. Ce dernier permettra de tester les algorithmes de commande dans des modèles continus du système global. On distingue les deux phases de commutation des IGBT, représentés par un

fil lorsqu'ils sont fermés et l'absence de connexion lorsqu'ils sont ouverts. Ainsi, la période de découpage (T_{pwm}) est scindée en deux [PAI-10_a], [BEC-06].

- Première séquence de conduction $t \in [0; \alpha_{bat} \cdot T_{pwm}]$:

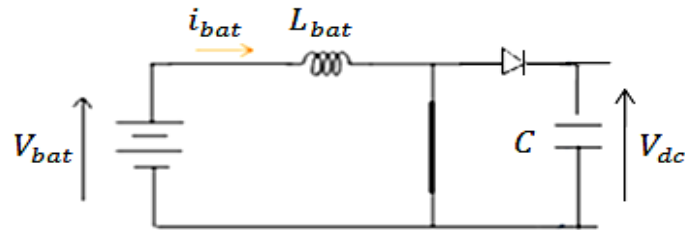


Figure (2.18) : Le schéma de principe de la première séquence de conduction

L'équation dynamique du courant de la bobine s'écrit :

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} \quad (2.64)$$

- Deuxième séquence de conduction $t \in [\alpha_{bat} \cdot T_{pwm}; T_{pwm}]$:

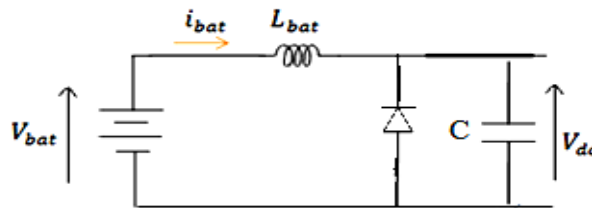


Figure (2.19) : Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction

La relation dynamique reliant tension de la batterie et le bus est donnée par :

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} + V_{dc} \quad (2.65)$$

La moyenne temporelle de ces deux équations donne ainsi un modèle moyen de ce convertisseur :

$$L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha_{bat})V_{dc} \quad (2.66)$$

Le modèle de l'équation (2.66) reproduit le comportement de la batterie en cas de charge ($i_{bat} < 0$) et en décharge ($i_{bat} > 0$).

Remarque : Le convertisseur bidirectionnel du supercondensateur est modélisé de façon analogue à celui de la batterie :

$$L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = V_{sc} - (1 - \alpha_{sc})V_{dc} \quad (2.67)$$

2.2.5.3 Modèle de l'onduleur de tension

Le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé monté en pont, alimentant le stator de la MSAP est donné par la figure (2.20).

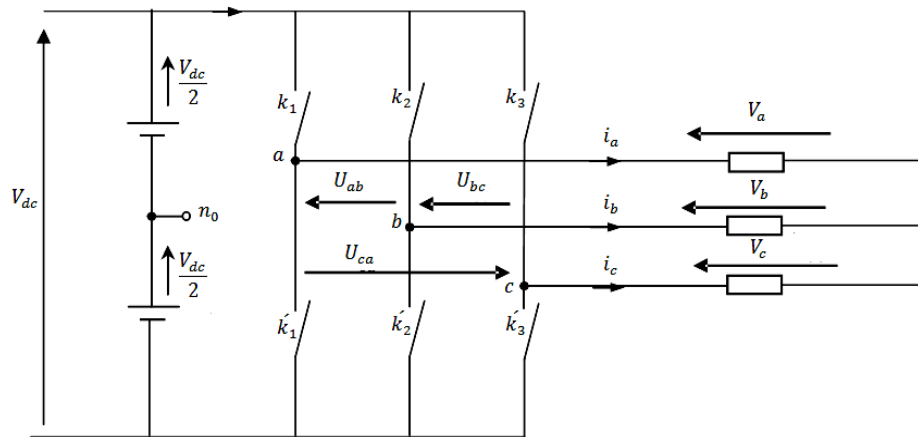


Figure (2.20) : Schéma de L'onduleur de Tension

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont :

$$U_{ab} = V_a - V_b = V_{dc}(D_u - D_v) \quad (2.68)$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = V_{dc}(D_u - D_w) \quad (2.69)$$

$$U_{ca} = V_c - V_a = V_{dc}(D_w - D_u) \quad (2.70)$$

Les tensions V_a , V_b et V_c forment un système de tension triphasées équilibrées :

$$V_a = \frac{V_{dc}}{3}(2D_u - D_v - D_w) \quad (2.71)$$

$$V_b = \frac{V_{dc}}{3}(2D_v - D_u - D_w) \quad (2.72)$$

$$V_c = \frac{V_{dc}}{3}(2D_w - D_u - D_v) \quad (2.73)$$

En conclusion, l'équation matricielle (2.74) lie les tensions simples de sorties aux séquences de conduction des interrupteurs, comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_u \\ D_v \\ D_w \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

Dans notre travail, l'onduleur est commandé par la technique de Modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI). Elle consiste à imposer aux bornes de la machine des tensions, hachées à fréquence fixe, évoluant en fonction des références de tension obtenues à partir des régulateurs de courants comme il viendra au chapitre suivant. A l'aide d'un signal triangulaire appelé porteuse, ces tensions sont modulées en largeur d'impulsion afin de déterminer les instants de commutation et la durée de conduction de chaque interrupteur de l'onduleur. A chaque instant, l'un des deux interrupteurs de chaque bras est en conduction et l'autre est bloqué [LAH-09].

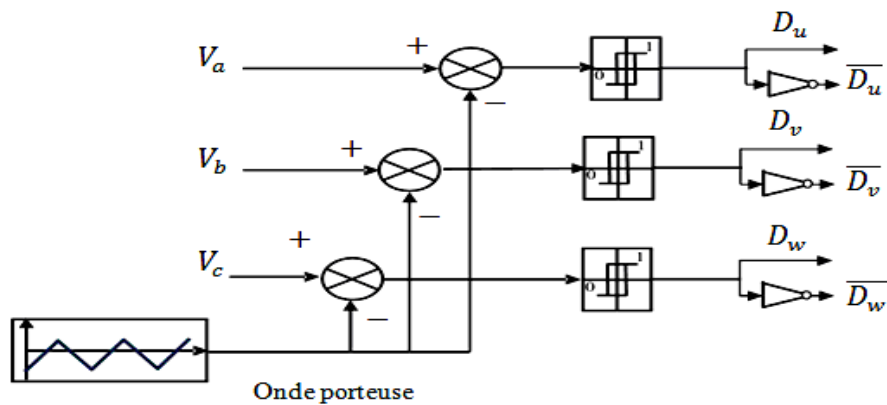


Figure (2.21) : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoïdale

2.3 Dimensionnement des sources

Pour le dimensionnement des sources, le générateur photovoltaïque est considéré comme source principale, alors que le banc de batterie est choisie comme source d'appoint en régime statique, alors que le supercondensateur, fournit la puissance nécessaire à la MSAP en dynamique.

2.3.1 Dimensionnement du GPV

Le générateur PV utilisé est constitué de 6 modules de 165w, dont les caractéristiques sont :

- Tension à la puissance typique : 34,4 V
- Intensité à la puissance typique : 4,8 A
- Intensité de court-circuit : 5,1 A
- Tension en circuit ouvert : 43,2 V

Les six modules sont associés par ensemble de deux panneaux en série, ces trois ensembles sont connectés en parallèle.

2.3.2 Dimensionnement de la batterie

Quatre batteries sont connectées en série afin d'obtenir une tension de 48 V. Les batteries doivent donc avoir une capacité (Q_{bat}) minimale de 139 Ah, afin de stocker une journée de production. Finalement quatre batteries de 12 V d'une capacité de 200 Ah sont utilisées [PAI-10_a].

2.3.3 Dimensionnement des Supercondensateurs

Le banc de super condensateurs est constitué de 4packs et possède une capacité totale (C_{sc}) de 14.5F sous une tension nominale de 60V, soit une énergie disponible de 9575J. La tension du banc évolue entre 30V et 60V [PAI-10_a].

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un SEH constitué par des panneaux photovoltaïques, un système de stockage et le système ascenseur. Cette modélisation nous permettra de prédire les performances du système une fois les approches de commande suggérées au chapitre suivant sont appliquées.

CHAPITRE 3

Description des Approches De commande

3.1 Introduction

Nous avons établi dans le chapitre précédent la modélisation de chaque élément du système complet qui est constitué des panneaux photovoltaïques, des batteries et des supercondensateurs via des convertisseurs de puissance, ainsi que la machine synchrone à aimants permanents (entraînement direct) pour déplacer la cage de l'ascenseur (figure 3.1). Nous souhaitons satisfaire la demande de système ascenseur, pour cela un ensemble d'algorithmes permettant de commander le système de gestion hybride seront présentés.

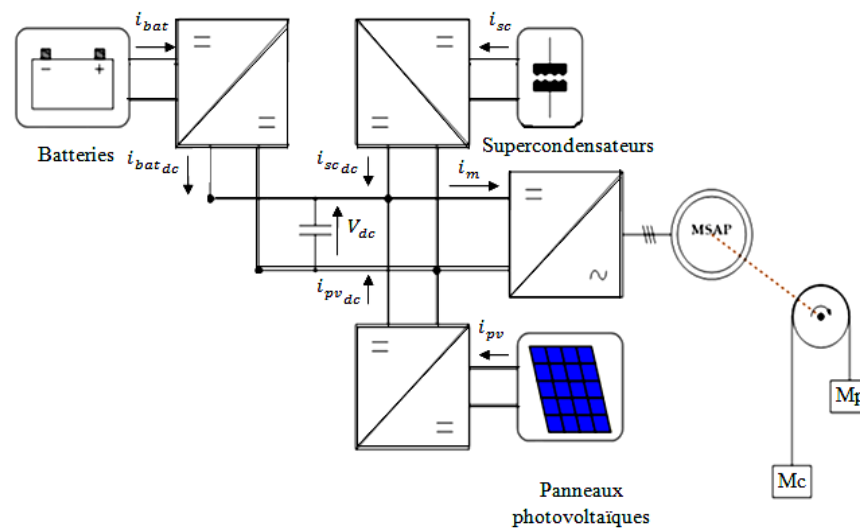


Figure (3.1): Schéma bloc du système ascenseur

- Le gestionnaire d'énergie détermine la puissance de réglage fournie par le sous-système (batterie, supercapacité) à partir de la puissance demandée par la charge et la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque.
- Les lois de commande choisies pour les convertisseurs de puissance sont présentées. La plupart de ces convertisseurs sont asservis en courant afin de protéger les équipements et de gérer les échanges de flux entre les sources et la charge [PAI-10_a].
- La commande vectorielle par régulateur par mode glissant est choisie pour l'actionneur synchrone vue sa simplicité de mise en œuvre et sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes.

3-2 Description du gestionnaire d'énergie

Le comportement du bus DC peut être modélisé par l'équation (3.1)

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{sc_{dc}} + i_{bat_{dc}} + i_{pv_{dc}} - i_m \quad (3.1)$$

Où le courant du condensateur se détermine par :

$$i_c = i_{sc_{dc}} + i_{bat_{dc}} + i_{pv_{dc}} - i_m \quad (3.2)$$

i_m désigne le courant de charge coté continu.

Par conséquent, le courant dit 'd'appoint' délivré par le système 'supercapacité-batterie' s'identifie par :

$$I_{dc_{ref}} = i_c + i_m - i_{pv_{dc}} \quad (3.3)$$

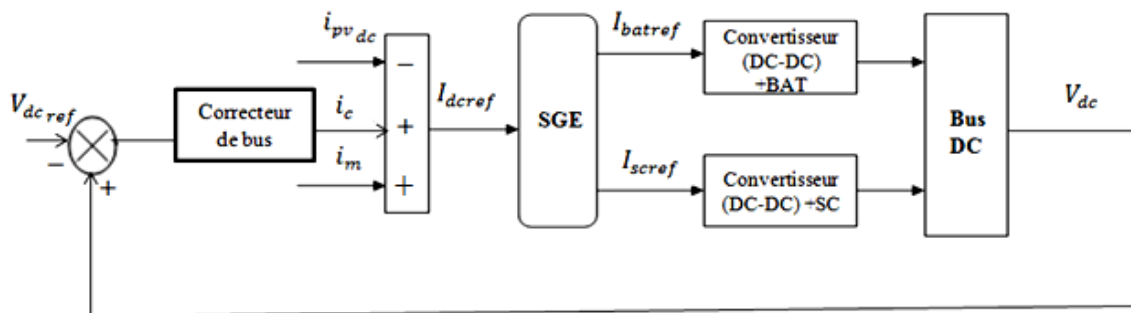


Figure (3.2): Contrôle en tension du bus DC

Un Système de Gestion d'Énergie (SGE) élabore les consignes de courant à destination des convertisseurs statiques des batteries et des supercondensateurs (respectivement $I_{bat_{ref}}$, $I_{sc_{ref}}$). Ils sont générés suivant le principe décrit par la Figure (3.2). Afin de limiter la dynamique du courant de la batterie, la référence $I_{dc_{ref}}$ passe à travers un filtre passe-bas pour constituer la référence $I_{bat'_{ref}}$. La différence entre $I_{bat'_{ref}}$ et $I_{dc_{ref}}$ permet de déterminer $I_{sc'_{ref}}$, qui est destinée aux supercondensateurs (fig. (3.3)).

Vu les caractéristiques des batteries et des supercondensateurs, leurs états de charge doivent être pris en considération dans l'élaboration des références. Un commutateur, piloté par une fonction de l'état de charge et la référence $I_{dc_{ref}}$, permet de désactiver les batteries ou les

supercondensateurs en affectant 0 respectivement à I_{batref} ou I_{scref} . Le comportement de ces commutateurs est résumé par l'équation (3.4) pour les batteries et par l'équation (3.5) pour les supercondensateurs. Lorsque l'état de charge des éléments de stockage est en dessous de 25%, une charge progressive est effectuée automatiquement [PAI-10_a]. Il est à noter que ce même filtre permet de piloter le fonctionnement de la batterie en statique et les supercapacités en dynamique.

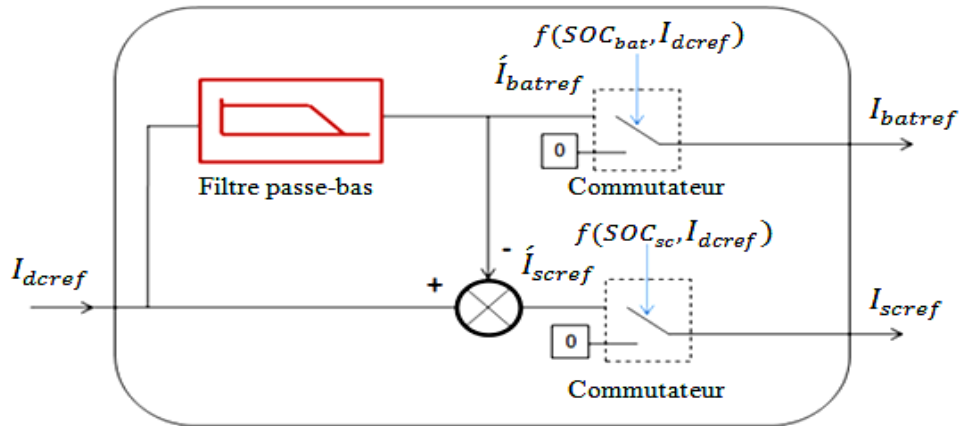


Figure (3.3): Système de Gestion d'Énergie (SGE)

$$I_{batref} \begin{cases} 0, \text{ if } \begin{cases} I_{dcref} < 0 \text{ and } SOC_{bat} > 95\%, \\ I_{dcref} > 0 \text{ and } SOC_{bat} < 25\% \end{cases} \\ I_{batref}, \text{ if } \begin{cases} I_{dcref} < 0 \text{ and } SOC_{bat} < 95\%, \\ I_{dcref} > 0 \text{ and } SOC_{bat} > 25\%, \end{cases} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$I_{scref} \begin{cases} 0, \text{ if } \begin{cases} I_{dcref} < 0 \text{ and } SOC_{sc} > 95\%, \\ I_{dcref} > 0 \text{ and } SOC_{sc} < 25\% \end{cases} \\ I_{scref}, \text{ if } \begin{cases} I_{dcref} < 0 \text{ and } SOC_{sc} < 95\%, \\ I_{dcref} > 0 \text{ and } SOC_{sc} > 25\%, \end{cases} \end{cases} \quad (3.5)$$

3-3 Description des modes de fonctionnement

Dans ce qui suit, on décrit les modes de fonctionnement du système, imposés d'une part par la valeur de la puissance photovoltaïque et d'autre part par la consommation. L'énergie photovoltaïque est utilisée en priorité pour alimenter la charge. On distingue alors trois modes :

Mode 1 :

Dans ce mode la source principale (GPV) fournit l'énergie à l'organe de stockage (batteries, supercondensateurs) et à la charge (moteur)

Mode 2 :

- En régime de montée, les supercondensateurs assurent l'alimentation du moteur et chargent les batteries.
- En régime de descente et au freinage, les supercondensateurs récupèrent l'énergie du moteur.

Mode 3 (régulation de puissance):

Quand la batterie est complètement chargée, le GPV fonctionne en mode régulation de puissance pour satisfaire uniquement la puissance de la charge.

3.4 Commande des différentes sources**3.4.1 Commande du générateur photovoltaïque****3.4.1.1 Commande en mode MPPT**

Ces dernières années, les contrôleurs par logique floue (FLC) sont largement utilisés pour la recherche du point MPP. Ces derniers sont indépendants du modèle du processus, ils se caractérisent par leur aptitude à appréhender les problèmes de non linéarité et ils présentent des performances robustes par rapport aux variations des conditions atmosphériques et de la charge [TIA-11].

Dans ce travail, on présente un algorithme MPPT qui utilise la théorie de la logique floue [BEN-11], pour remédier au problème d'oscillation de la méthode perturbation et observation (P&O). Le contrôleur flou proposé optimise l'amplitude de la perturbation pour minimiser les oscillations et pour avoir une réponse rapide et sans oscillations.

Le contrôleur flou comporte les trois blocs suivants : Fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire, ensuite l'inférence, où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la

réponse appropriée. Et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification centroïde [CHI-11].

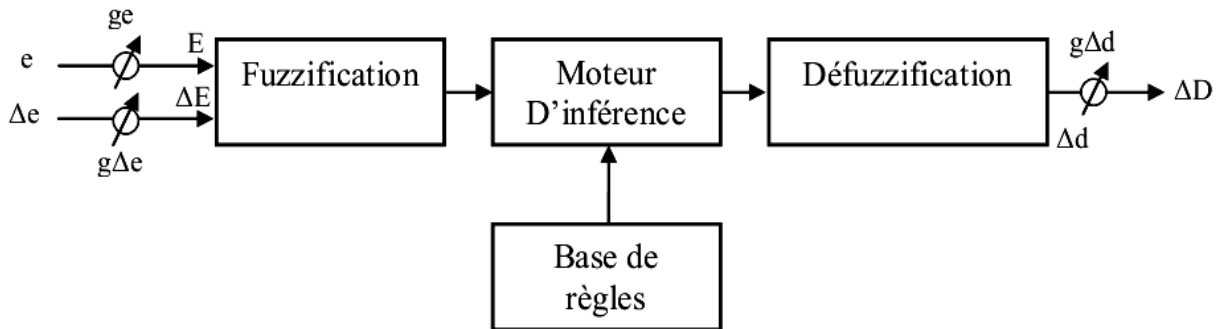


Figure (3.4) : Structure de base du contrôleur flou

La Figure (3.4), montre la configuration du contrôleur flou qui se compose des : Entrées /Sortie d'échelle, fuzzification, décision floue, et la défuzzification. Deux entrées sont traitées, l'erreur e et la dérivée de l'erreur Δe . Les deux entrées sont normalisées au moyen de gains de normalisation, g_e pour l'erreur et $g_{\Delta e}$ pour la dérivée de l'erreur. Un gain de dénormalisation, $g_{\Delta d}$, est affecté sur la sortie.

Les deux variables d'entrée du contrôleur flou sont l'erreur e et la variation de l'erreur Δe prélevées à chaque pas d'échantillonnage t . ces deux variables sont définies par les deux expressions suivantes :

$$e = \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} = \frac{P_{PV}(t) - P_{PV}(t-1)}{V_{PV}(t) - V_{PV}(t-1)} \quad (3.6)$$

$$\Delta e = e(t) - e(t-1) \quad (3.7)$$

Avec $P_{PV}(t)$ et $V_{PV}(t)$ désignent respectivement la puissance et la tension instantanée du générateur PV. La valeur de $e(t)$ montre, si le point de fonctionnement pour la charge utilisée à l'instant t se situe du côté gauche ou du côté droit du point de puissance maximale sur la caractéristique P-V. La valeur $\Delta e(t)$ exprime le sens de déplacement de ce point. La méthode choisie pour l'inférence, dans notre travail, est celle de Mamdani. quant à la défuzzification, c'est la méthode du centre de gravité qui a été préférée pour le calcul de l'incrément du rapport cyclique ΔD [CHI-11]. La matrice des règles que nous utilisons est représentée par le tableau (3.1), alors que la variable d'erreur (e) est transformée en termes de variable linguistique à l'aide de cinq sous-ensembles flous qui sont désignés par NG (négatif grand), NP (négatif petit), ZE (zéro), PP (positive petite), et PG (positif grand) avec NG et PG fonctions d'appartenance sous forme trapézoïdale et NP, ZE et PP sous forme triangulaire.

$e \backslash \Delta e$	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	PG	PG	PG	PP	ZE
NP	PG	PG	PP	ZE	NP
ZE	PG	PP	ZE	NP	NG
PP	PP	ZE	NP	NG	NG
PG	ZE	NP	NG	NG	NG

Tableau (3.1) : Base de règles floues

La variable linguistique assignée à ΔD , dépend des différentes combinaisons entre e et Δe . Par exemple, si les variables d'entrée (e et Δe), ont comme valeur PG et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie ΔD est NG , ce qui implique une forte variation négative du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et le point optimum. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à ΔD s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

$$D(t) = D(t - 1) + \Delta D(t) \quad (3.8)$$

La figure (3.5) est illustrée respectivement les sous-ensembles flous de l'erreur et de la variation d'erreur, ainsi que de la variable de sortie.

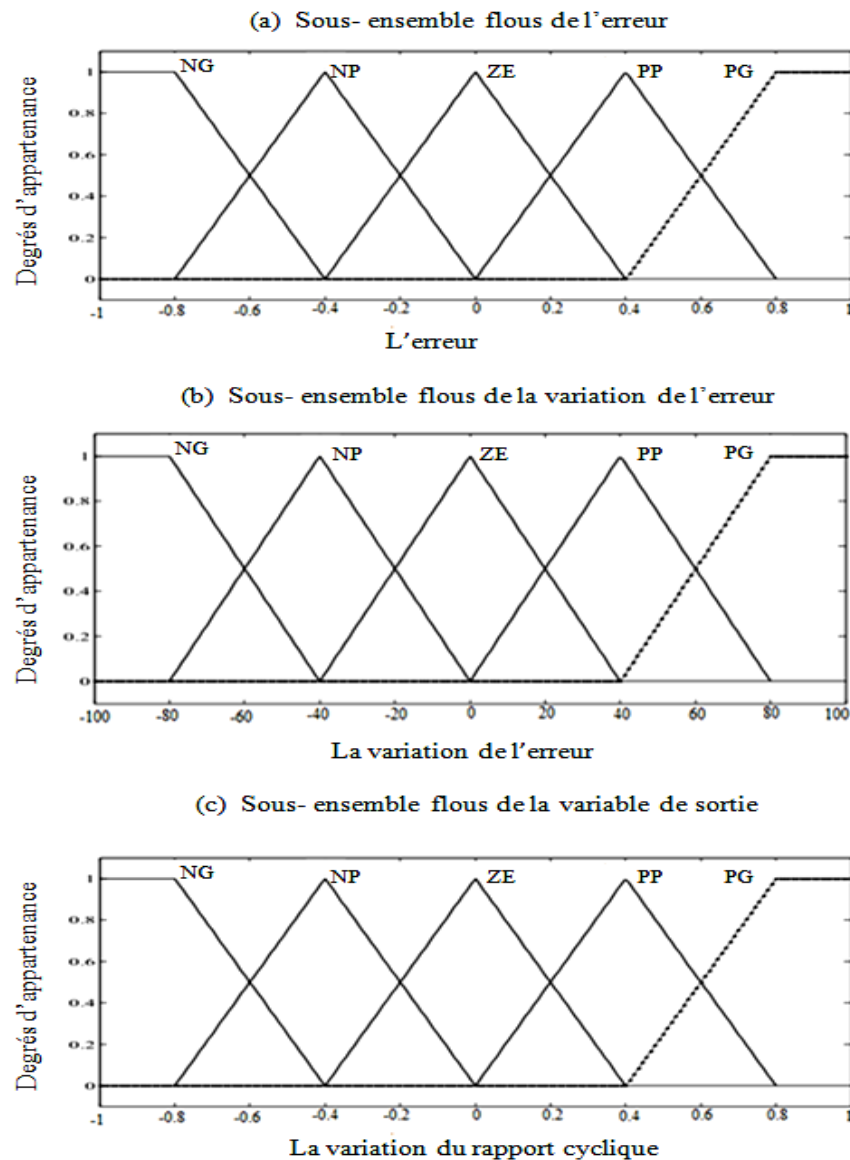


Figure (3.5) : Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et la sortie

La figure (3.6) représente le schéma fonctionnel d'une commande MPPT type logique floue commandé un GPV via un convertisseur statique DC-DC (type hacheur Boost). Le principe de ce type de commande est basé sur la fuzzification de l'erreur e et la variation de l'erreur Δe à partir des fonctions d'appartenance trapézoïdale et triangulaire comme le montre la figure (3.6).

Le rapport cyclique est obtenu à partir de la somme du rapport cyclique à l'instant $(t-1)$ et la sortie de régulateur floue qui représente la variation du rapport cyclique à l'instant (t) , comme le montre l'équation (3.8) [ZAR-10].

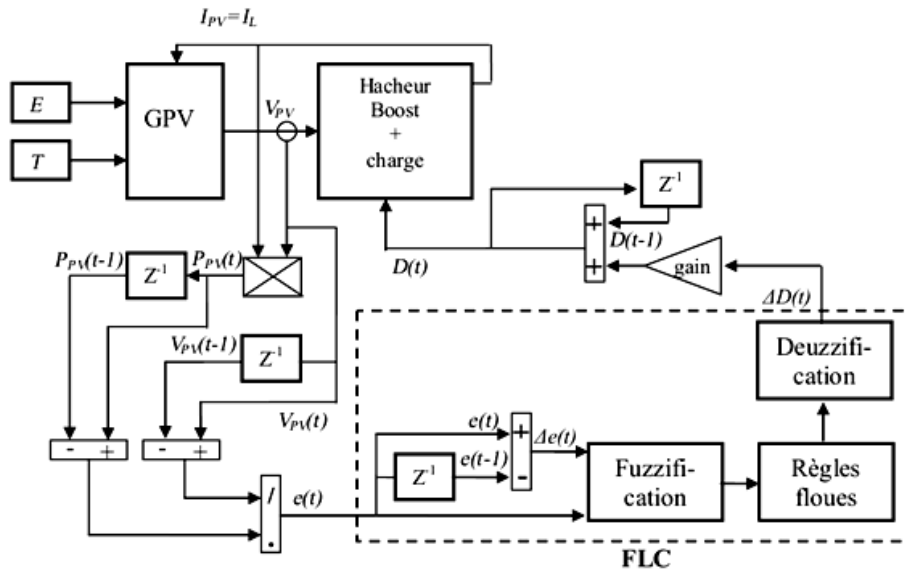


Figure (3.6) : Schéma d'illustration d'un GPV commandé par Logique floue

3.4.1.2 Commande en mode régulation de puissance

Quand la batterie est complètement chargée, le GPV délivre la puissance suffisante à la demande de la charge qui est inférieure à la puissance maximale du GPV. Le rapport cyclique de l'hacheur survolteur lié au GPV devient α_{reg} , comme le montre la figure (3.7).

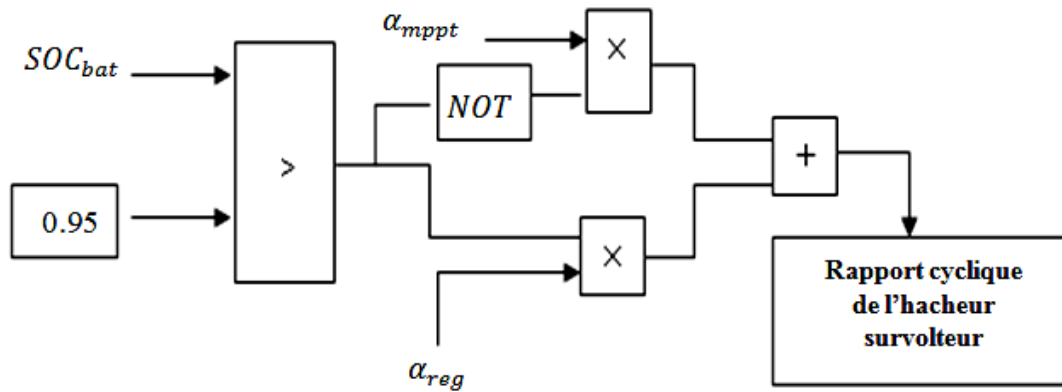


Figure (3.7) : Rapport cyclique de l'hacheur survolteur du GPV

En fait, pour ce mode de fonctionnement, le rapport cyclique α_{mppt} est désactivé, et α_{reg} est déterminé par le contrôle de la tension du bus continu selon la théorie de Lyapounov (voir fig. (3.8)).

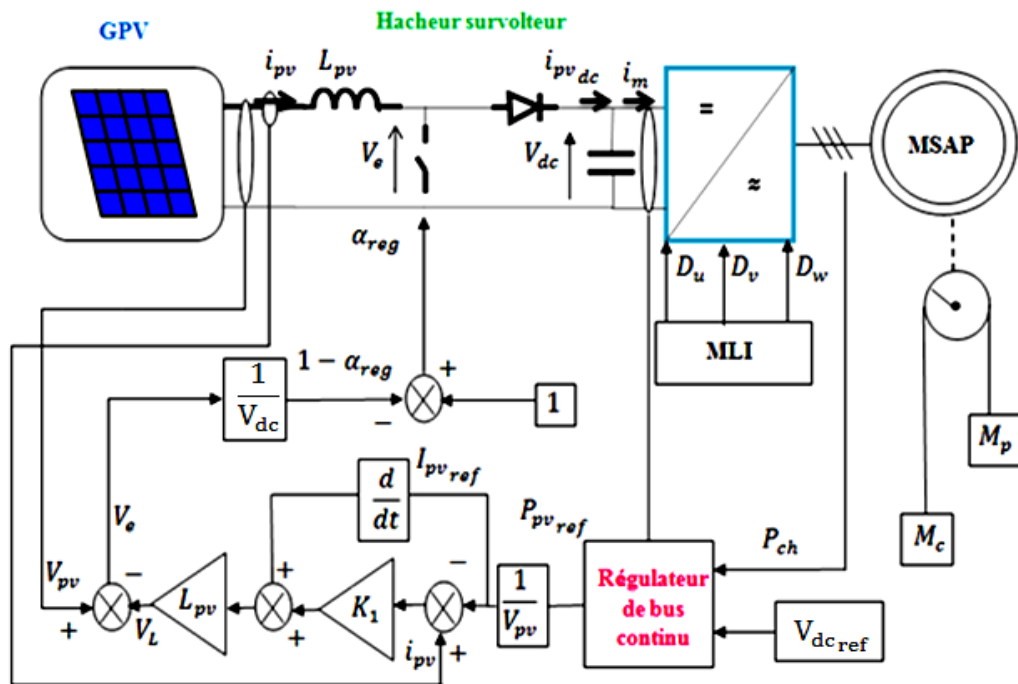


Figure (3.8) : Commande du générateur photovoltaïque en mode régulation de puissance

Pour ce mode de fonctionnement et pour assurer la stabilité du système, le point de fonctionnement doit se situer à droite du point MPP (point B) et non pas à gauche (point A) de la caractéristique I-V du GPV. Cette conclusion est déduite lors de l'utilisation de hacheur survolteur [TIA-11]. Voir (fig. (3.9))

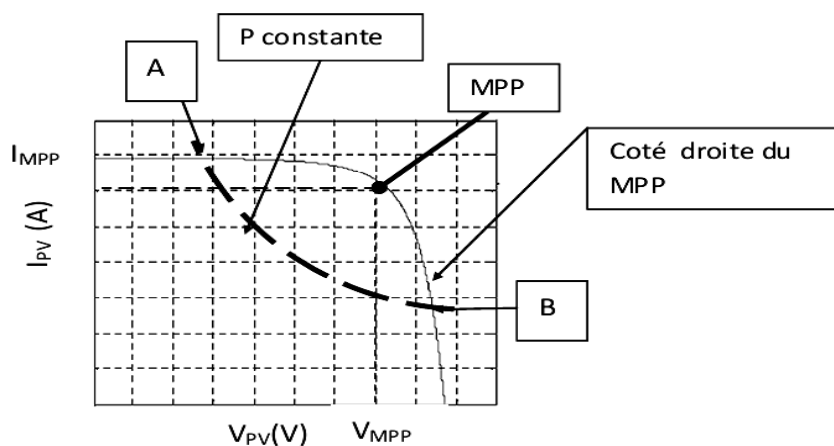


Figure (3.9): caractéristique I-V du générateur photovoltaïque

3.4.2 Contrôleur robuste du bus continu

La conception de cette commande est basée sur la théorie directe de Lyapounov. La stabilité asymptotique globale du système est assurée par un choix judicieux d'une fonction candidate de Lyapounov définie positive [TIA-11].

On définit l'erreur de tension du bus comme suit :

$$e = V_{dc} - V_{dc\text{ref}} \quad (3.9)$$

La dérivée de l'erreur est alors :

$$\dot{e} = \dot{V}_{dc} - \dot{V}_{dc\text{ref}} \quad (3.10)$$

On choisit une fonction de Lyapounov quadratique :

$$V = \frac{1}{2} e^2 \quad (3.11)$$

La dérivée de V s'écrit :

$$\dot{V} = \dot{e}e \quad (3.12)$$

Une condition suffisante de stabilité est d'assurer la dérivée de V semi définie négative.

Choisissons une dérivée de V de forme exponentielle :

$$\dot{V} = -K_2 e^2 \quad (3.13)$$

D'où, on aura:

$$\dot{e} = -K_2 e \quad (3.14)$$

A partir de l'équation dynamique du bus continu :

$$i_c = c \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (3.15)$$

D'après l'équation (3.10) on a :

$$\dot{V}_{dc} = \dot{e} + \dot{V}_{dc\text{ref}} \quad (3.16)$$

En substituant l'expression de \dot{V}_{dc} de l'équation (3.16) dans l'équation (3.15), on déduit :

$$i_c = c(\dot{e} + V_{dc_ref}) \quad (3.17)$$

Dans notre cas, la tension de référence V_{dc_ref} est choisie égale à 100 V, et ce pour ne pas surdimensionner les éléments de stockage.

L'équation (3.17) devient :

$$i_c = c \cdot \dot{e} \quad (3.18)$$

En remplaçant l'équation (3.14) dans (3.18), on obtient :

$$i_c = -cK_2 e \quad (3.19)$$

Où

$$K = -cK_2 \quad (3.20)$$

Sur la figure (3.10) est illustré le schéma de principe de la régulation du bus continu. Il est à noter qu'une fois la tension du bus réglée, le courant I_c désigne le courant des sources de secours (batteries et supercondensateurs).

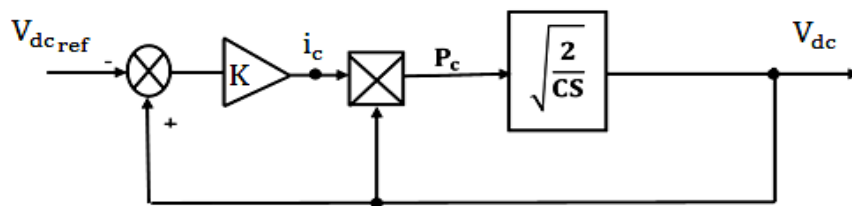


Figure (3.10): Schéma du contrôleur robuste du bus continu

3.4.3 Commande de la batterie

L'hacheur réversible en courant est contrôlé à l'aide d'un correcteur basé sur la théorie de Lyapounov, dont le SGE génère le courant de référence I_{bat_ref} comme illustre la figure (3.11). En fait, la régulation en courant de la batterie permet de verrouiller les deux interrupteurs du convertisseur bidirectionnel.

On définit l'erreur du courant de la batterie comme suit :

$$e = i_{bat} - I_{bat_ref} \quad (3.21)$$

La dérivée de l'erreur est alors :

$$\dot{e} = i_{\text{bat}} - I_{\text{bat,ref}} \quad (3.22)$$

On choisit une fonction de Lyapunov quadratique :

$$V = \frac{1}{2} e^2 \quad (3.23)$$

Une condition suffisante de stabilité est d'assurer la dérivée de V définie négative :

$$\dot{V} = \dot{e}e \quad (3.24)$$

Choisissons une dérivée de V de forme exponentielle :

$$\dot{V} = -K_3 e^2 \quad (3.25)$$

D'où, on aura:

$$\dot{e} = -K_3 e \quad (3.26)$$

On choisit une constante positive K_3 pour assurer la négativité de V, et faire converger l'erreur vers zéro. Dans cette condition, on détermine la commande (la tension aux bornes de la bobine V_L) à partir de l'équation dynamique de la bobine de l'hacheur :

$$V_L = L_{\text{bat}} \frac{di_{\text{bat}}}{dt} \quad (3.27)$$

En substituant l'expression de i_{bat} de l'équation (3.22) dans l'équation (3.27) :

$$V_L = L_{\text{bat}}(\dot{e} + I_{\text{bat,ref}}) \quad (3.28)$$

En remplaçant l'équation (3.26) dans (3.28), on obtient :

$$V_L = L_{\text{bat}}(-K_3 \cdot e + I_{\text{bat,ref}}) \quad (3.29)$$

Par conséquent, la tension à l'entrée de l'interrupteur V_e se déduit par :

$$V_e = V_{\text{bat}} - V_L \quad (3.30)$$

Et le rapport cyclique α_{bat} se met sous :

$$\alpha_{\text{bat}} = 1 - \frac{V_e}{V_{dc}} \quad (3.31)$$

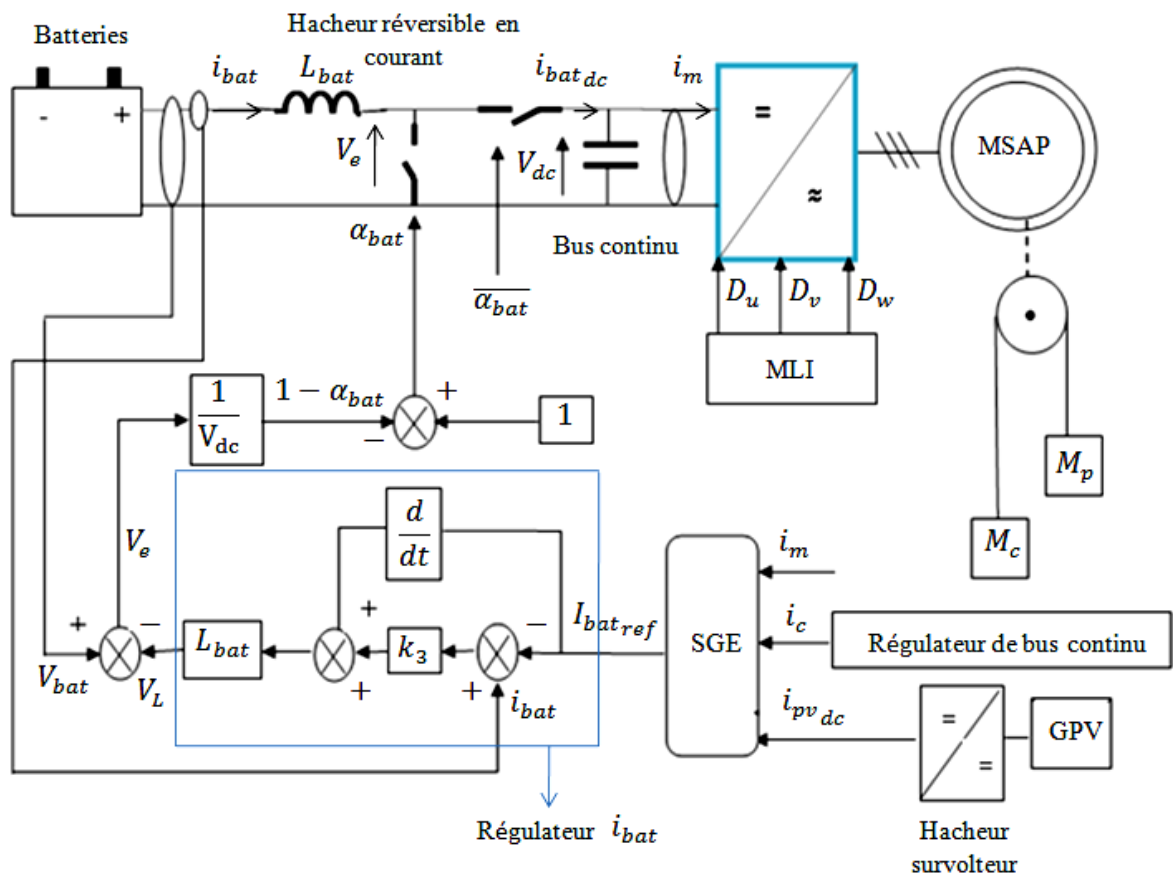


Figure (3.11): Schéma de commande de la batterie

3.4.4 Commande des Supercondensateurs

Le convertisseur statique associé aux supercondensateurs est contrôlé en courant de façon similaire que le convertisseur de la batterie (figure 3.12). L'utilisation des supercondensateurs (charge ou décharge) est contrôlé par la référence $I_{sc\ ref}$ générée par le SGE. Il est à noter que les supercondensateurs et les batteries fonctionnent en complémentarité. Cette commande est effectuée de façon analogue que les batteries.

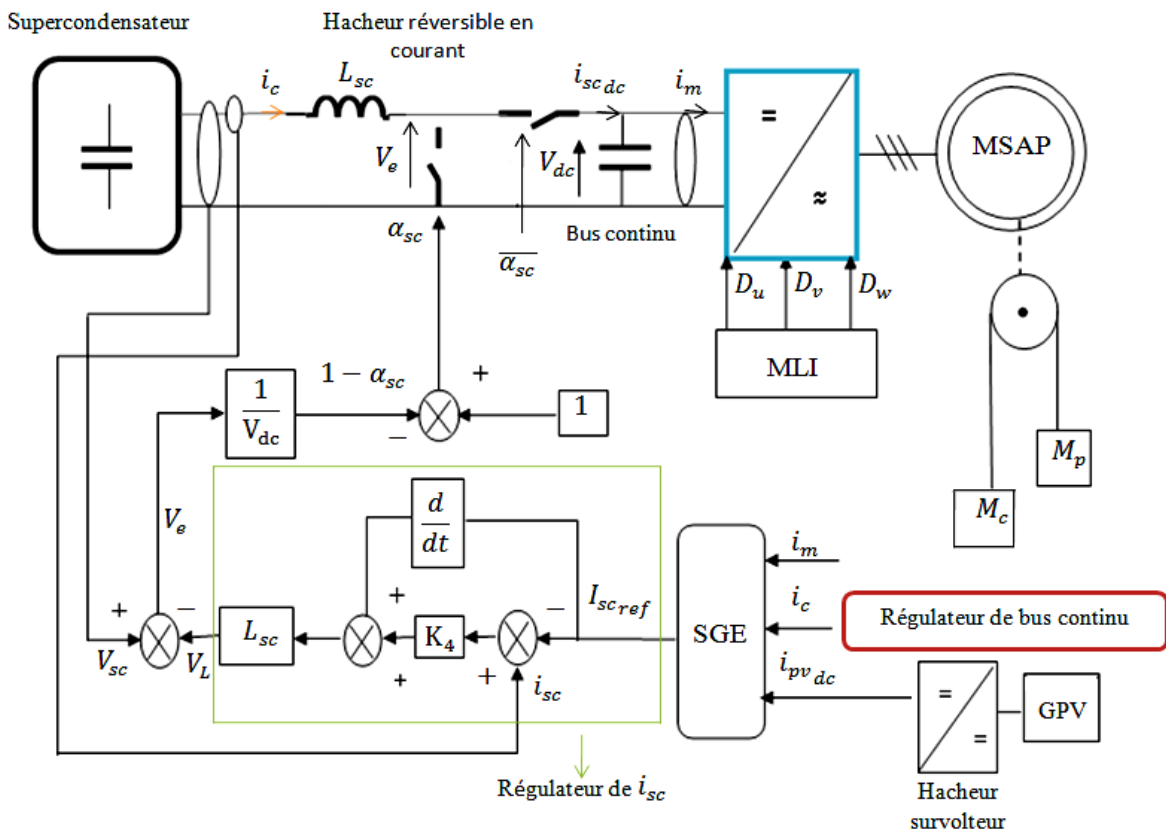


Figure (3.12): Schéma de commande de la supercapacité

3.5 Commande vectorielle en position de la MSAP

Dans cette partie, on évoque la commande de la cage de l'ascenseur via le contrôle en position de l'actionneur synchrone à aimants permanents. Pour ce faire, la commande vectorielle en courant est choisie.

La commande vectorielle porte en général sur des machines alimentées en tension et régulées en courant sur les axes d-q. Cette topologie permet une meilleure dynamique dans la commande du couple tout en évitant les inconvénients d'une alimentation en courant.

La figure (3.13) désigne la boucle de position assurant l'asservissement de la cage à l'aide d'un correcteur proportionnel dérivé (PD). Le gain K_z transforme la position angulaire θ_r en position linéaire z_c .

Le correcteur de vitesse en cascade détermine le courant de référence (i_{qs_ref}) nécessaire au contrôle de vitesse de la cage de l'ascenseur.

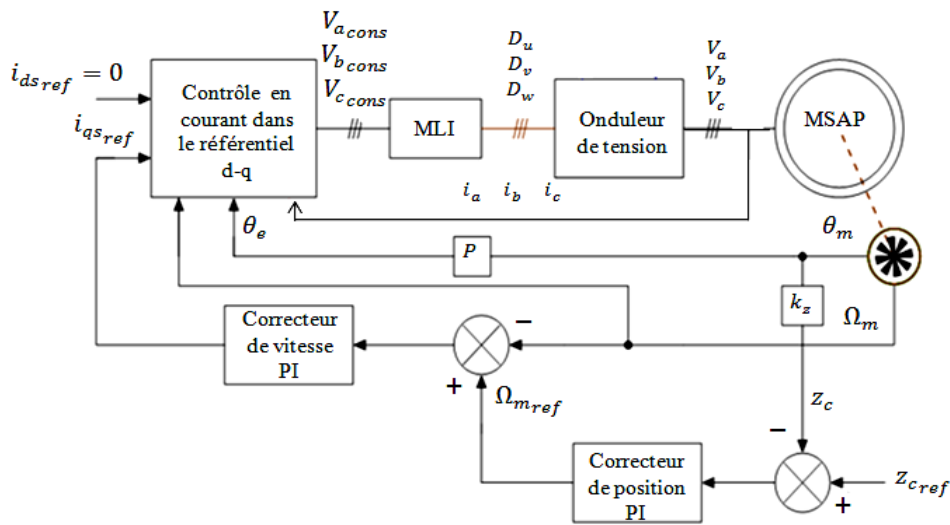


Figure (3.13): Contrôle en position du moteur

Il est limité de manière à tenir compte des caractéristiques de l'onduleur et de la surcharge de la machine. i_{qs_ref} est comparé à la valeur i_{qs} issue de la mesure des courants réels. En parallèle avec cette boucle interne, on trouve une boucle de régulation de i_{ds} . Le courant i_{ds_ref} est maintenu à zéro pour permettre la commande découplée [BEN-09]. La sortie des régulateurs de i_{ds} et i_{qs} donnent des tensions de référence V_{ds_cons} et V_{qs_cons} , et par la transformation de Park, on obtient les références de tensions V_{a_cons} , V_{b_cons} et V_{c_cons} , qui sont les tensions du contrôle de l'onduleur à commande MLI. (Voir (fig. (3.14))

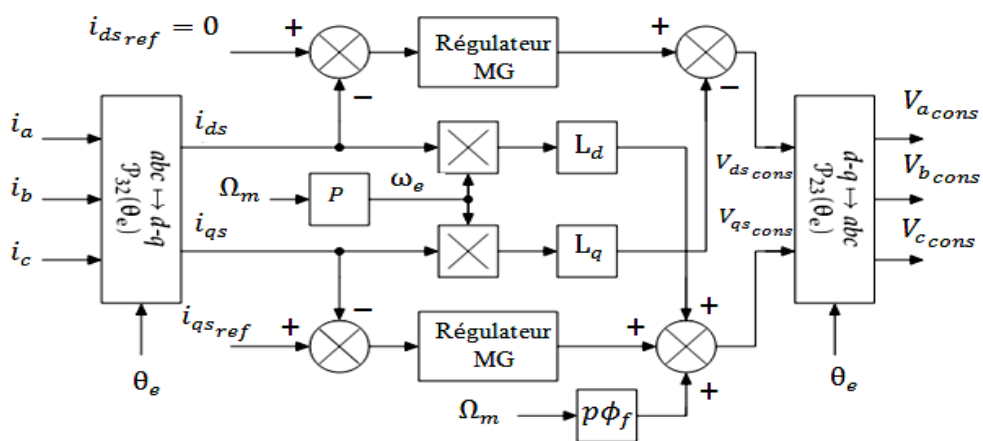


Figure 3.14: Contrôle en courant du moteur dans le référentiel d-q

3.5.1 Synthèse des différents régulateurs

3.5.1.1 Correcteur de Position

La position angulaire de la cage est donnée par :

$$\theta_m = \omega_e \cdot t \quad (3.32)$$

La transformation de la position angulaire θ_m en position linéaire z_c donne l'équation

$$z_c = \theta_m \cdot r \quad (3.33)$$

Donc :

$$z_c = \omega_e \cdot r \cdot t \quad (3.34)$$

Avec:

$$\frac{z_c}{\omega_e} = \frac{r}{p} \quad (3.35)$$

Le schéma fonctionnel du contrôle de position est donné par:

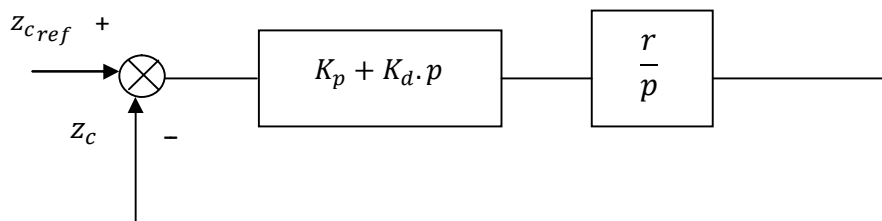


Figure (3.15):Régulateur de position

Il est à noter que l'action proportionnelle permet l'écrasement de l'erreur statique (système intégrateur), alors que l'action dérivée accélère le système en dynamique.

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$FTBO = (K_p + K_d \cdot p) \cdot \frac{r}{p} \quad (3.36)$$

La fonction de transfert en boucle fermée se détermine par :

$$FTBF = \frac{(K_p + K_d \cdot p) \cdot r}{p + (K_p + K_d \cdot p) \cdot r} \quad (3.37)$$

L'équation caractéristique se réduit alors à un système du premier ordre:

$$p + (K_p + K_d \cdot p) \cdot r = 0 \Rightarrow 1 + \frac{1 + K_d \cdot r}{K_p \cdot r} \cdot p = 1 + \tau p$$

On déduit l'équation suivante :

$$K_p = \frac{1+K_d \cdot r}{\tau \cdot r} \quad (3.38)$$

On choisissant une constante de temps en boucle fermée $\tau = 0.01$ s, les paramètres du régulateur PD sont alors : $K_p = 491.0811$ et $K_d = 10.5$.

3.5.1.2 Correcteur de vitesse

Pour la régulation de vitesse, un correcteur de type PI est choisi, où le schéma fonctionnel est donné ainsi:

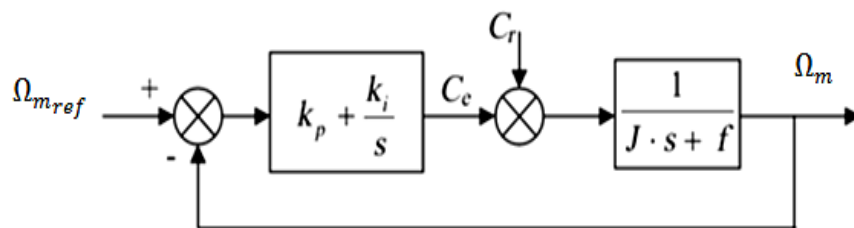


Figure (3.16): Régulation de la vitesse

Pour la déduction des paramètres du contrôleur, la boucle de vitesse doit avoir une dynamique plus rapide que la boucle de position. La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ($C_r=0$) :

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_p}{s} \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right) \cdot \frac{1}{J \cdot s + f} \quad (3.39)$$

La fonction de transfert en boucle fermée se met sous :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{K_p \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right)}{J s^2 + (f + K_p) s + K_i} \quad (3.40)$$

La $FTBF_{\Omega}$ possède une dynamique de 2^{ème} ordre. Par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre, l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$FTBF = \frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0} \right) s + 1 \quad (3.41)$$

Par identification de (3.40) et (3.41), alors :

$$\frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (3.42)$$

$$\frac{f+K_p}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (3.43)$$

Avec :

ξ : Coefficient d'amortissement.

Pour un choix du coefficient d'amortissement ξ et ω_0 on déduit K_i et K_p , ainsi :

$$K_i = J\omega_0^2$$

$$K_p = \frac{2\xi K_i}{\omega_0} - f$$

$$\xi = 0.7$$

$$K_p=0.773$$

$$K_i=173.5$$

3.5.1.3 Les régulateurs de courant id et iq

Pour la régulation des courants statoriques, la commande à structure variable d'ordre un est choisie, du fait de sa robustesse vis-à-vis des variations paramétrique et des changements des perturbations. Dans la littérature, il y a trois types de structures très répandues, la commande par contre-réaction linéaire à gains commutés, la commande par relais, et la commande équivalente. Dans notre cas, la méthode choisie est celle de la commande équivalente qui est augmentée par un terme appelé action de la commande discontinue. Dans ces conditions la commande est écrite comme suit:

$$V = V_{eq} + V_n \quad (3.44)$$

La première étape, est de définir une entrée V_{eq} , de telle façon que la trajectoire d'état reste sur la surface de commutation $S(X) = 0$. La dérivée de la surface $S(X)$ est [CHE-12]:

$$S(\dot{X}) = \frac{\partial S}{\partial X} A(X) + \frac{\partial S}{\partial X} B(X).V_{eq} + \frac{\partial S}{\partial X} B(X).V_n \quad (3.45)$$

La commande équivalente est déterminée durant la phase de glissement et la phase du régime permanent en identifiant que $S(X) = 0$, et par conséquent $S(\dot{X}) = 0$.

Dans ces conditions la solution de l'équation (3.45) et alors :

$$V_{eq} = -\left(\frac{\partial S}{\partial X} B(X)\right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial X} A(X) \quad (3.46)$$

Avec la condition : $\frac{\partial S}{\partial X} B(X) \neq 0$

La commande commutante est usuellement déterminée par l'équation suivante :

$$V_n = -K \text{sign}(s) \quad (3.47)$$

La commande V_{eq} peut être interprétée comme étant la valeur moyenne que prend la commande V lors des commutations rapides entre $V^+(V_{max})$ et $V^-(V_{max})$.

➤ Régulation du Courant ids

L'expression de la surface de glissement du courant ids est définie par :

$$S = i_{ds} - i_{dsref} \quad (3.48)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S} = \dot{i}_{ds} - \dot{i}_{dsref} \quad (3.49)$$

L'équation dynamique du courant ids se met sous :

$$\dot{i}_{ds} = \frac{1}{L_{ds}} V_{ds} - \frac{R_s}{L_{ds}} i_{ds} + \omega_e \frac{L_{qs}}{L_{ds}} i_{qs} \quad (3.50)$$

L'équation dynamique de la surface \dot{S} sera alors :

$$\dot{S} = \frac{1}{L_{ds}} V_{ds} - \frac{R_s}{L_{ds}} i_{ds} + \omega_e \frac{L_{qs}}{L_{ds}} i_{qs} - \dot{i}_{dsref} \quad (3.51)$$

Avec :

$$V_{ds} = V_{dseq} + V_n$$

Où :

$$V_n = -k_1 \text{sign}(s)$$

Alors :

$$\dot{S} = \frac{1}{L_{ds}} (V_{dseq} + V_n) - \frac{R_s}{L_{ds}} i_{ds} + \omega_e \frac{L_{qs}}{L_{ds}} i_{qs} - \dot{i}_{dsref} \quad (3.52)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on tire de l'équation précédente la grandeur de la commande équivalente V_{dseq} , en mettant $\dot{S} = 0$:

$$V_{dseq} = R_s i_{ds} - \omega_e L_{qs} i_{qs} + L_{ds} \dot{i}_{dsref} \quad (3.53)$$

➤ **Correcteur du courant i_{qs}**

De manière analogue, la tension V_{qs} est déterminée par les équations suivantes :

$$V_{qs} = V_{qseq} + V_n / V_n = -k_2 \text{sign}(s) \quad (3.54)$$

$$V_{qseq} = R_s i_{qs} + \omega_e \varphi_f + \omega_e L_{ds} i_d + L_{qs} \dot{i}_{qs_{ref}} \quad (3.55)$$

Remarque : Pour la déduction de ces commande, les quantités $i_{ds_{ref}}$ et $i_{qs_{ref}}$ doivent être continues.

3.6 Conclusion

Dans le présent chapitre, une description explicite des algorithmes de commande a été donnée. Le Système de Gestion d'Énergie permettra une permutation fiable entre les différents modes de fonctionnement. Cela permet d'assurer le bon fonctionnement du système même si une défaillance survient sur une source. De plus, les sources sont sollicitées suivant leurs caractéristiques ce qui permet de préserver leur durée de vie et de satisfaire les besoins de la charge. Pour valider les lois de commandes définies, des simulations seront effectués dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

Résultats de Simulation

4.1 Introduction

À l'aide des modèles et des lois de commande élaborés dans les chapitres précédents pour les différents éléments du système ascenseur, nous allons mener les résultats de simulation obtenus au cours de cette étude. Un des objectifs assignés à ce travail est la réalisation d'une stratégie de gestion de l'énergie décrite au chapitre 3 et aussi, la stabilité du bus à CC qui est également analysée du point de vue de la régulation de la tension.

4.2 Profil de l'éclairage, de la position de référence et de la charge

Les figures (4.1) (4.2) (4.3) représentent les profils de l'éclairage, de la position et de la masse de la cage. Pour bien distinguer les performances des différents algorithmes, toutes ces références sont choisies variables en créneaux.

- Le déplacement de la cage varie de 1.5 m à 3 m puis l'ascenseur descend à -1.5 m.

- Le profil de la masse (choisi afin de varier le couple de charge) est simulé ainsi:

De (0-3.5s) ; la masse de la charge est égale à la masse de la cage (50 kg).

De (3.5-5s) ; la masse de la charge est de 100 kg.

De (6.5-8s) ; la masse de la charge est augmentée à 150 kg.

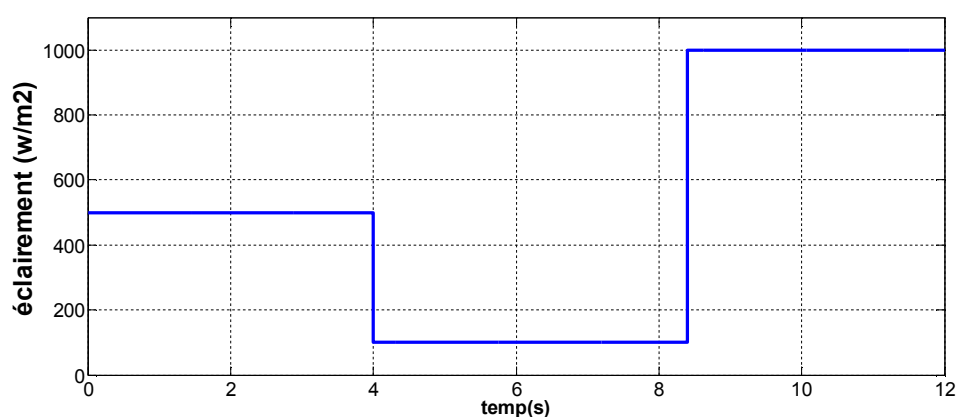


Figure (4.1) Profil de l'éclairage

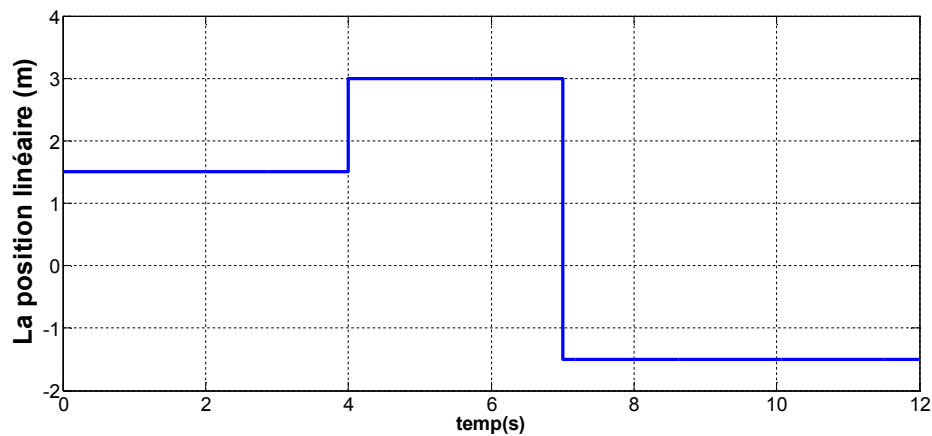


Figure (4.2) Profil de la position de référence Z_{ref}

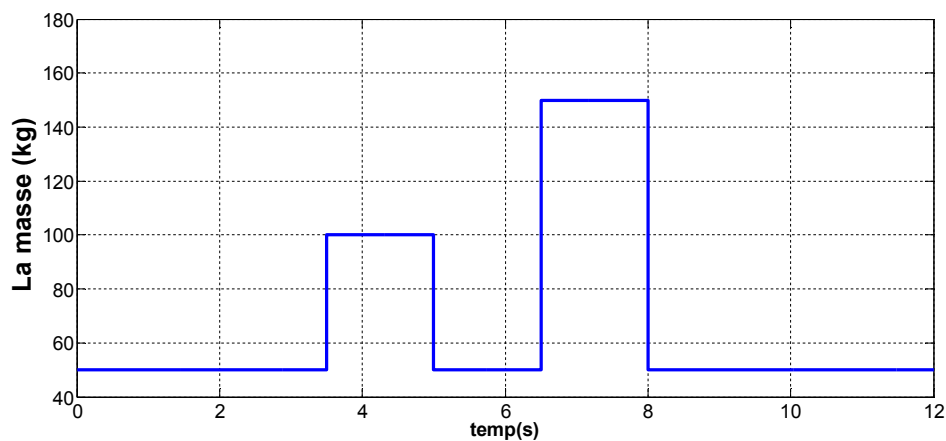


Figure (4.3) Profil de la charge : Masse

4.3 Résultats de simulation des puissances

Les figures (4.4) et (4.5), illustrent les puissances fournies /absorbées par les différents sous systèmes (GPV, batterie, supercondensateur, moteur), alors que les zooms de ces puissances sont représentés dans les figure (4.6), (4.7) et (4.8). De ces graphes, on extrait les observations suivantes :

De (0.5 – 3.5s) : la masse de la charge est égale à la masse de la cage, dont la puissance produite par le générateur photovoltaïque est supérieure à la demande de la charge. L'excès alors est utilisé pour charger les batteries et les supercondensateurs.

De (3.5 – 4s) : la masse de la charge est augmentée à 150 kg, vu que l'énergie produite par le GPV n'est pas suffisante et l'évolution de la batterie est plus

lente compte tenu du filtre passe-bas du SGE, alors le supercondensateur se décharge.

Dans les deux cas précédents le système fonctionne en mode 1.

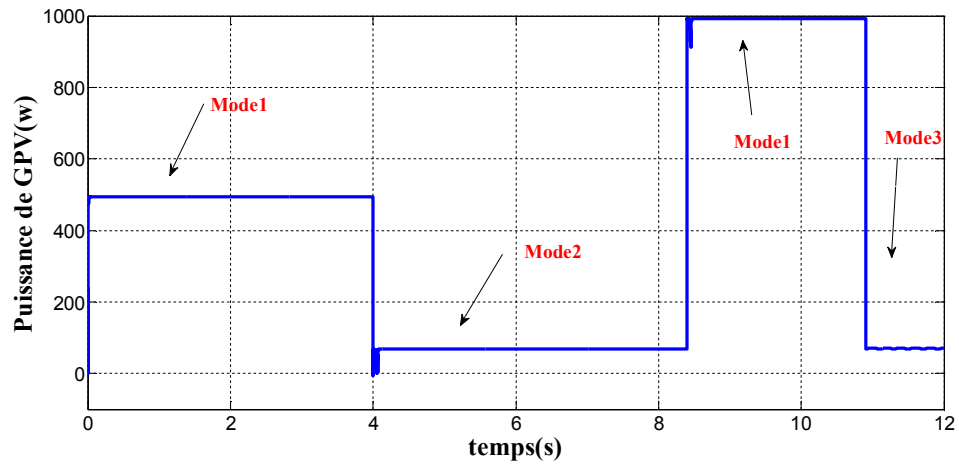
De (4 – 4.5s) : pendant cette période (régime de montée), le supercondensateur assure l'alimentation de la charge et charge la batterie. Le système fonctionne en mode 2.

De (4.5 – 5.1s) : la demande de la charge diminue d'environ 278 W, et le palier d'éclairement passe à 100W/m². Le GPV, la batterie et le supercondensateur délivrent la puissance nécessaire à la charge et le système fonctionne toujours en mode 2.

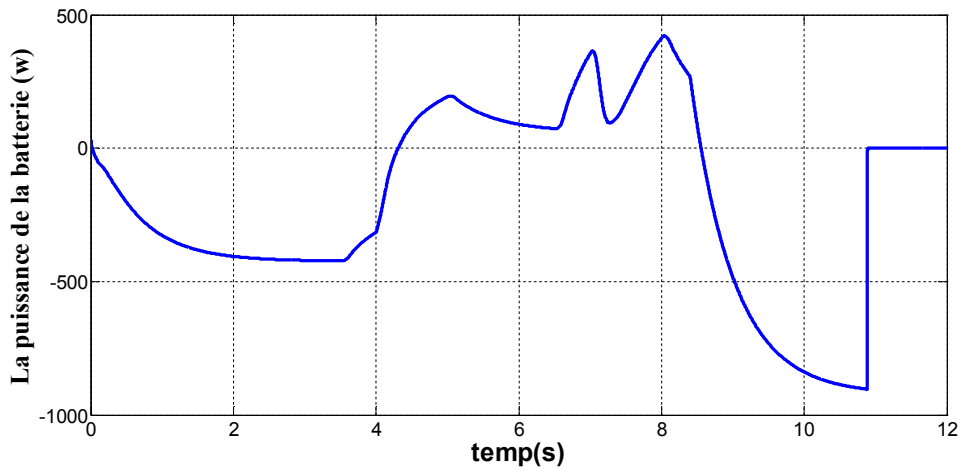
De (5.1 – 7s) : la masse de la charge varie de 50 kg à 150 kg; le GPV, les SC et la batterie assurent l'alimentation de la charge en complémentarité.

De (7 – 7.5s) : dans ce cas, le supercondensateur récupère l'énergie du moteur, et le système fonctionne en mode 2.

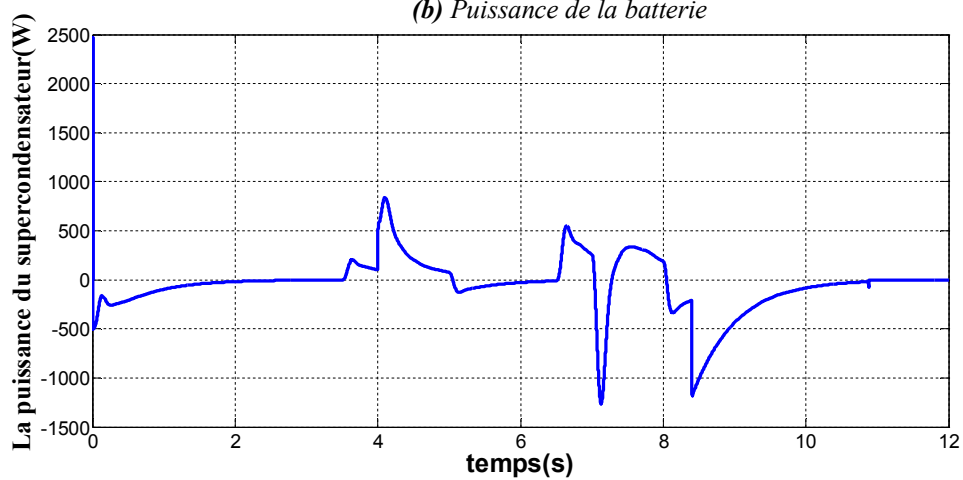
De (10.9 – 12s) : la demande de la charge augmente d'environ 69.7 W, le palier d'éclairement passe à 1000W/m² et la batterie est complètement chargée. Le système fonctionne en mode3.



(a) Puissance du générateur photovoltaïque



(b) Puissance de la batterie



(c) Puissance du supercondensateur

Figure (4.4) : Puissances des différentes Sources

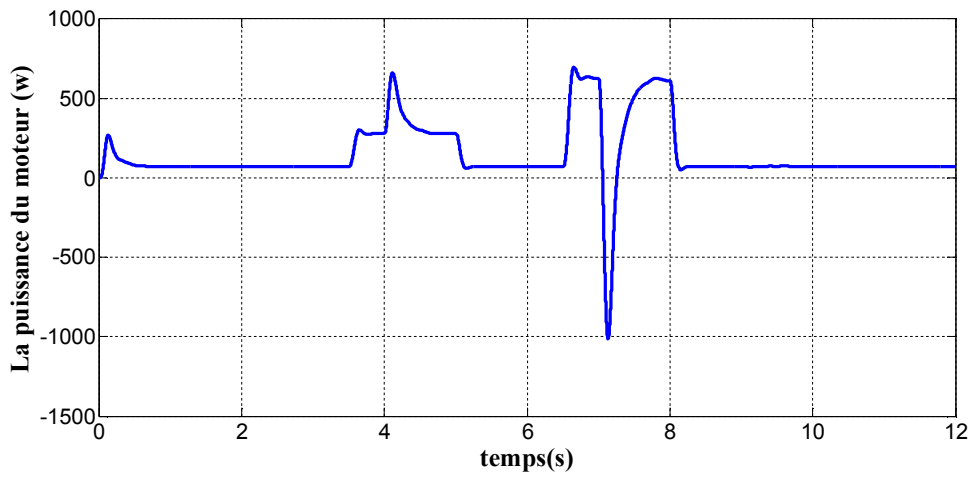


Figure (4.5) : Puissance du moteur

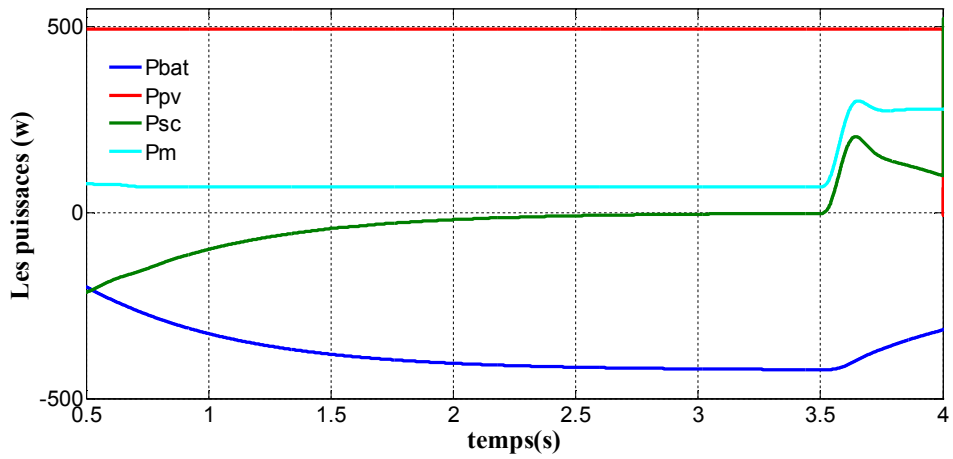


Figure (4.6) : Zoom des puissances en model

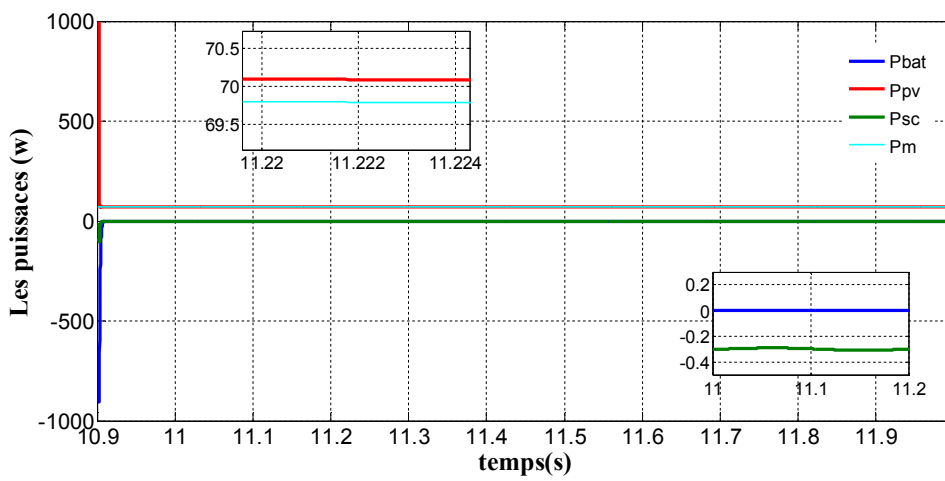
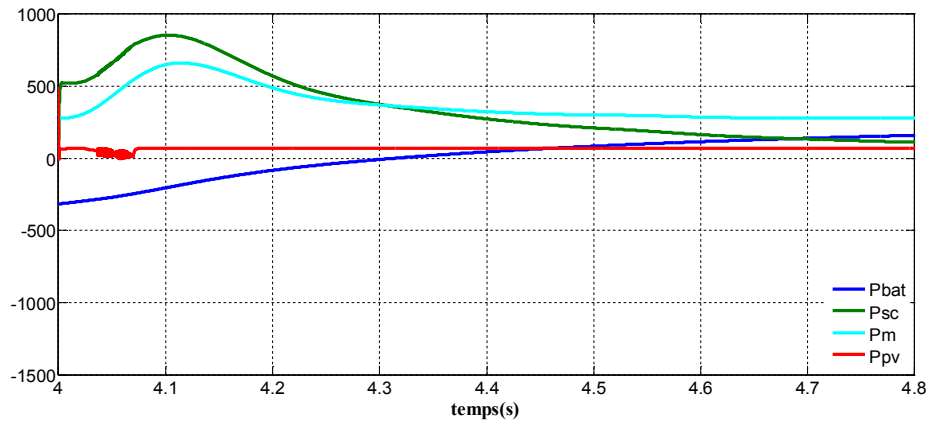
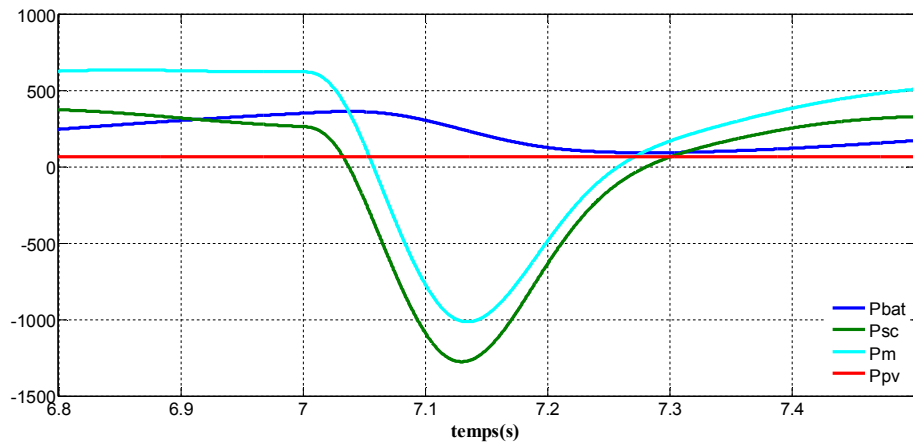


Figure (4.7) : Zoom des puissances en mode3

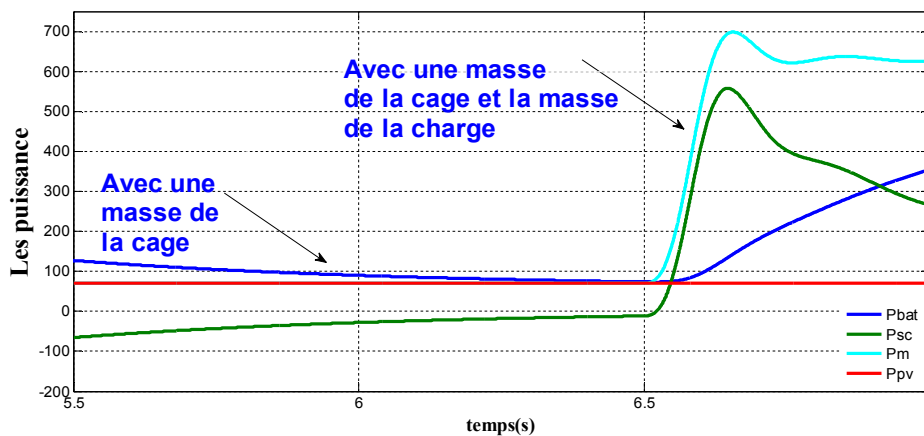


(a) Zoom des puissances en montée

Les puissances(w)



(b) Zoom des puissances en décente



(c) Zoom des puissances lors des variations de la masse

Figure (4.8) : Zooms des puissances en mode 2

4.4 Caractéristiques des courants

Les figures (4.9), (4.10), (4.11) et (4.12) montrent les allures des courants des différents sous-systèmes et leurs zooms.

De ces graphes, le système de gestion d'énergie fait évoluer le signe et l'amplitude des courants des sources d'appoints selon que le courant du moteur est en régime statique ou dynamique :

Régime statique :

De (0.5s) à (3.5s) ; le courant de la charge est constant et faible. Le GPV arrive ainsi à couvrir la demande de la charge et de charger la batterie, présentant un courant de signe négatif.

De (4.5s) à (5.3s) ; le courant du GPV diminue à 0.37A, ce courant ne couvre pas la demande de la charge. Les deux systèmes d'appoint sont actifs afin de compléter l'appel du courant du moteur.

De (9s) à (10.9s) ; le même cas de (0.5 à 3.5s) se produit.

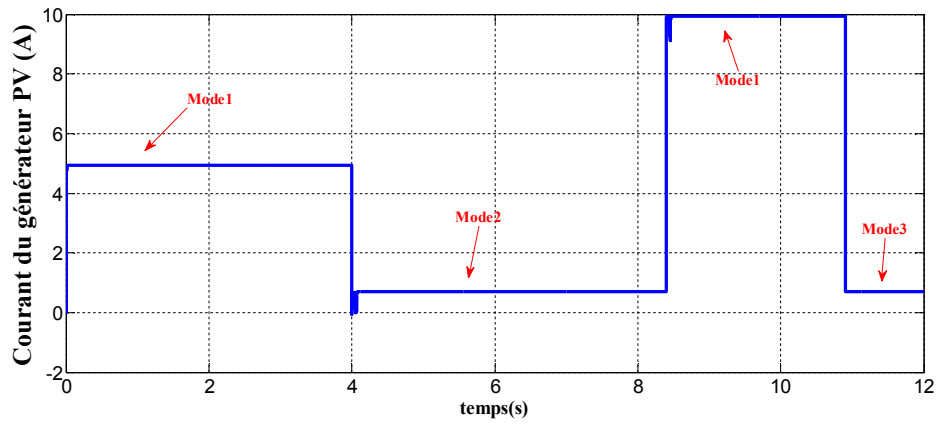
De (10.9s) à (12s) ; Dans ce cas le système fonctionne en mode 3 (mode de régulation de puissance) ; le GPV couvre la demande de la charge, alors que le système de stockage (batterie-supercapacité) est inactif, présentant des courants nuls (fig. (a, b) (4.12)).

Régime dynamique :

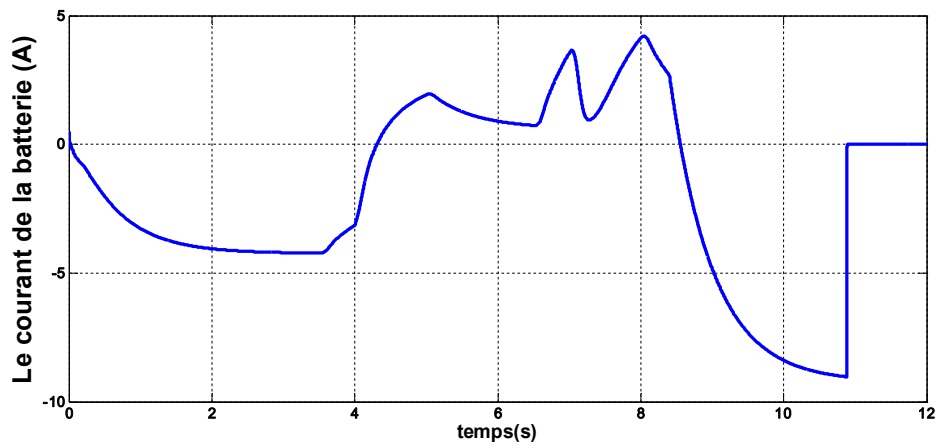
La figure (4.11) représente les zooms des courants fournis/absorbés par les différents sous systèmes (GPV, batterie, supercondensateur, moteur) en régime de montée et de descente respectivement.

En montée : le GPV et les SC fournissent des courants permettant d'alimenter le système ascenseur et de charger la batterie.

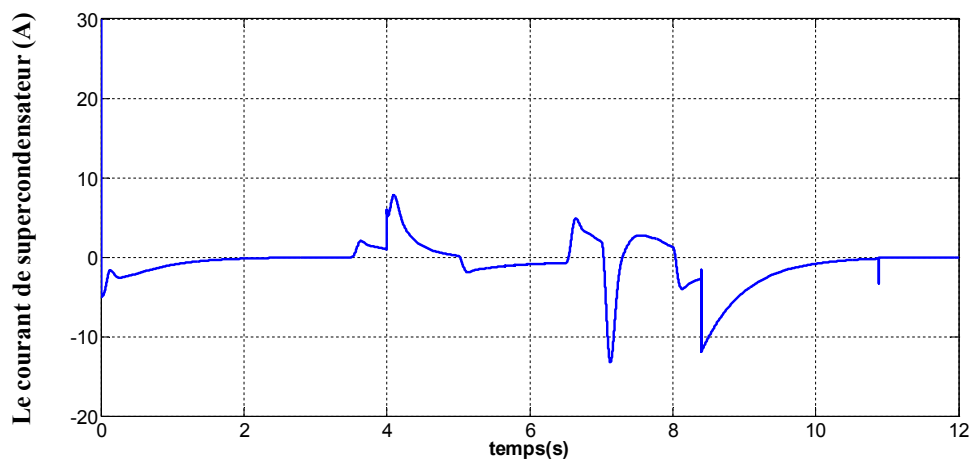
En descente : le courant des SC est négatif ; donc les SC récupèrent l'énergie du moteur et absorbent le courant fourni par le GPV.



(a) courant du GPV



(b) courant de la batterie



(c) courant du supercondensateur

Figure (4.9) : Courants de différentes sources

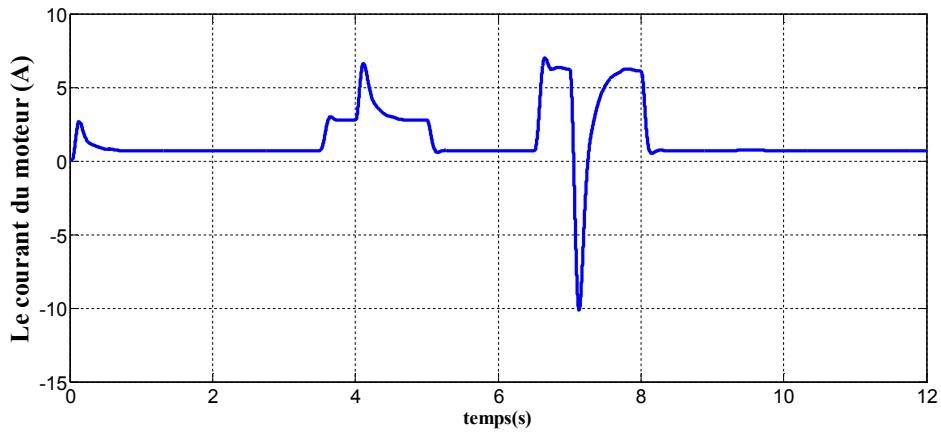
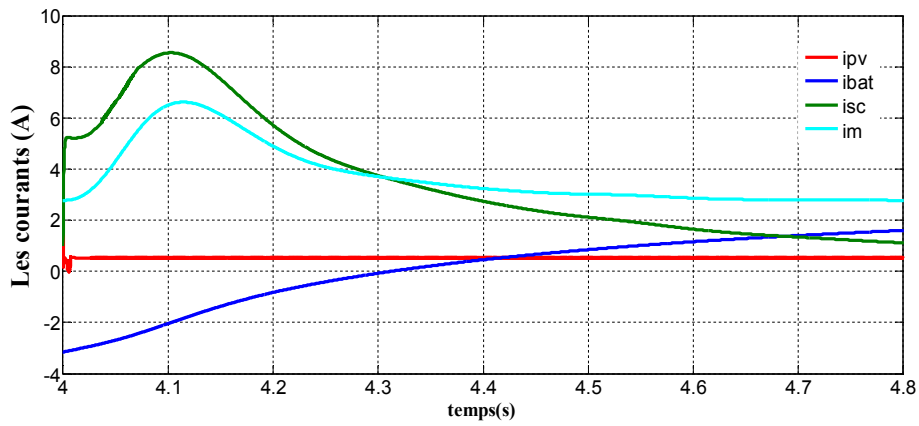
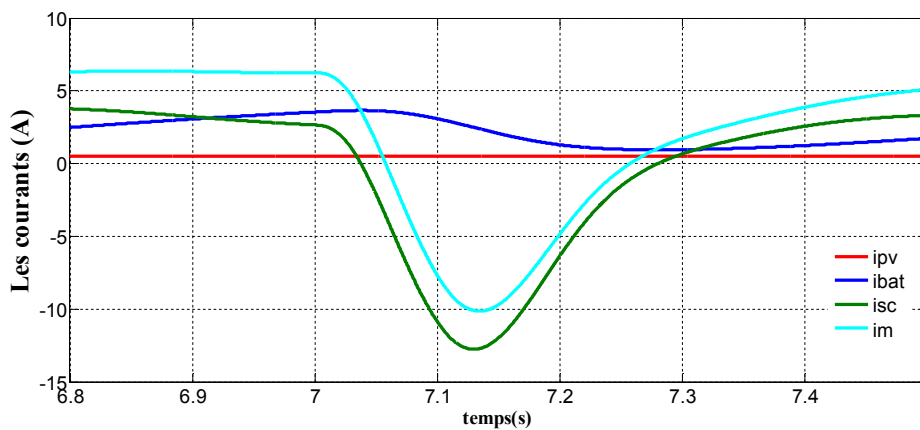


Figure (4.10) : Courant du moteur

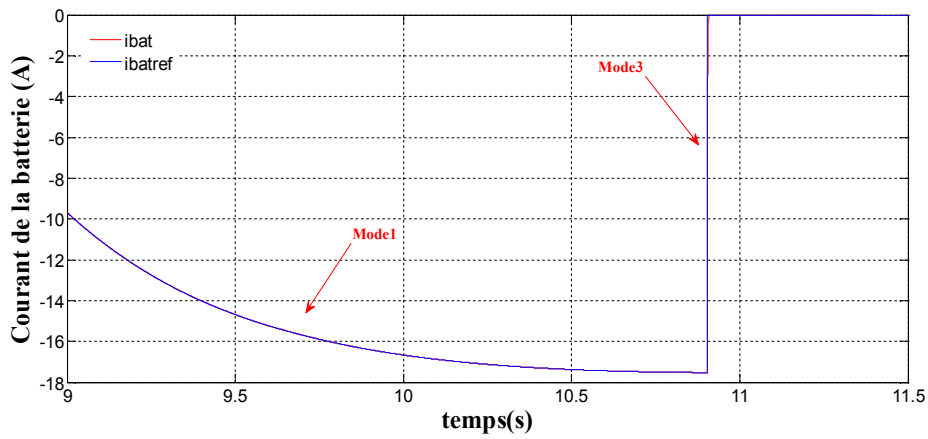


(a) Zoom des courants en mode2 (montée)

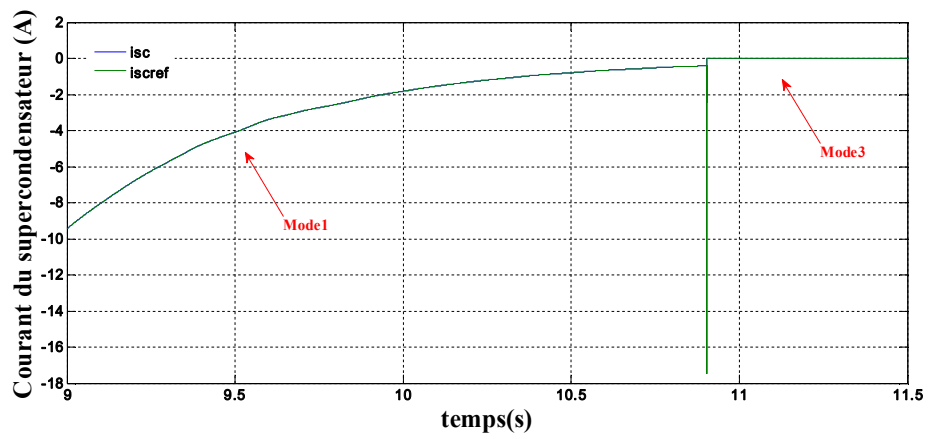


(b) Zoom des courants en mode 2 (décente)

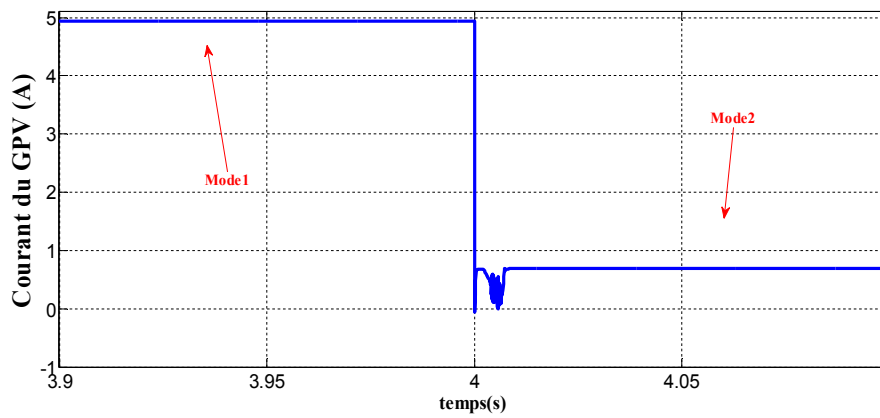
Figure (4.11) : Zooms des courants en mode 2



(a) Zoom de passage du mode 1 au mode 3 du courant de la batterie



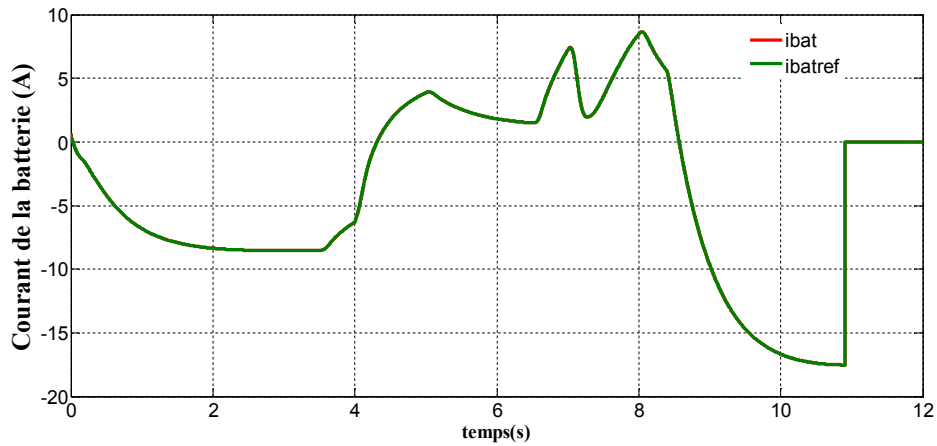
(b) Zoom de passage du mode 1 au mode 3 du courant du supercondensateur



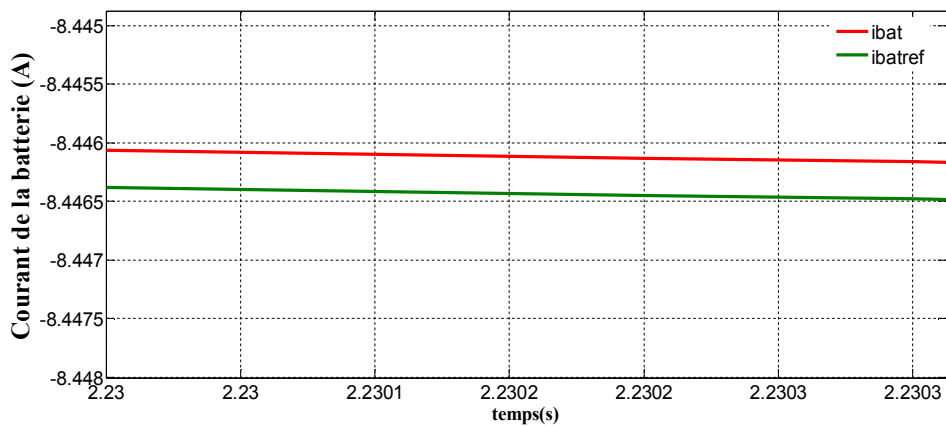
(c) Zoom de passage du mode1 au mode 2 du courant de GPV

Figure (4.12) : Zooms des courants des sources pour les différents modes

Les figures (4.13) et (4.14) présentent respectivement les courants de la batterie et des supercondensateurs avec leurs références, ainsi que leurs zooms. On peut distinguer un bon suivi des consignes des courants et une rapidité notable, ce qui prouve l'efficacité des régulateurs robustes incorporés.

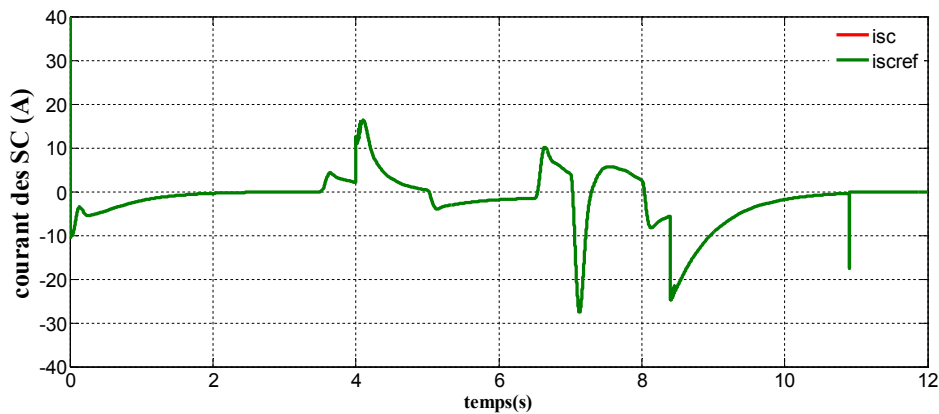


(a) courant de la batterie et sa référence

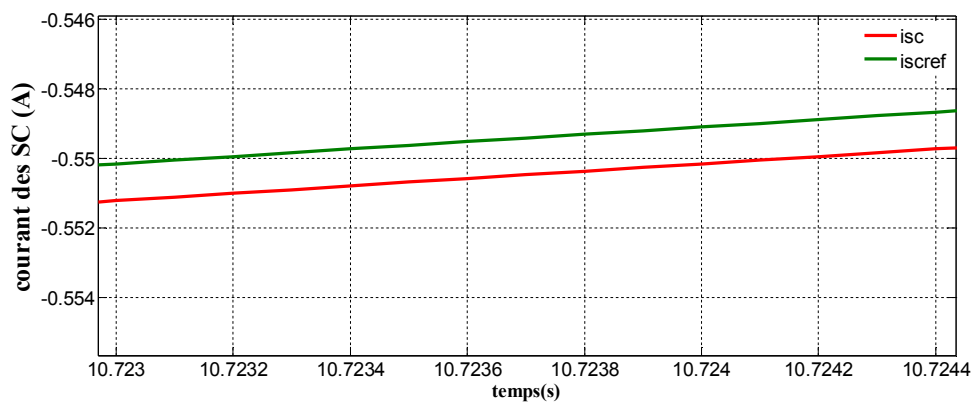


(b) Zoom du courant de la batterie

Figure (4.13) : Le courant de la batterie et son zoom



(a) Le courant des SC et sa référence



(b) Zoom du courant du supercondensateur

Figure (4.14) : Le courant des SC et son zoom

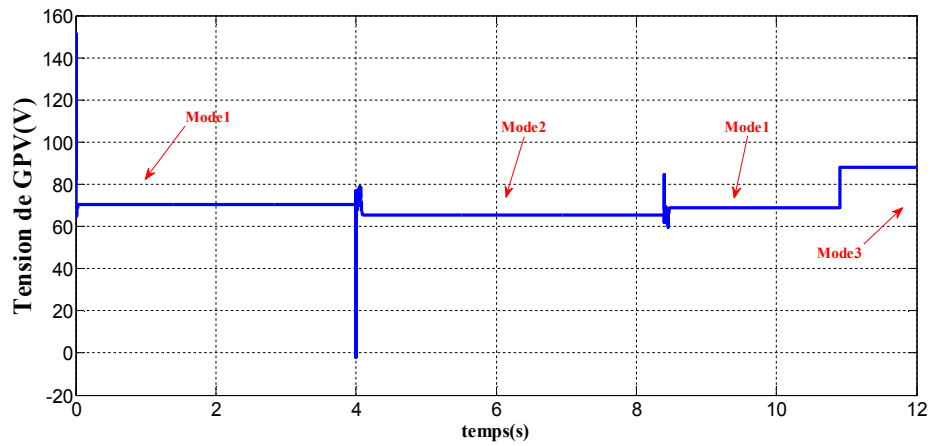
4.5 Caractéristiques des tensions

Les figures (4.15), (4.16) et (4.17) présentent respectivement les tensions du GPV, de la batterie et des SC, où on peut constater que:

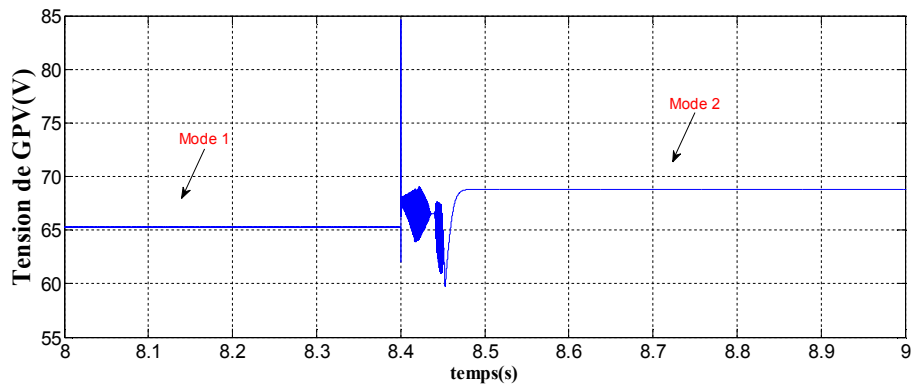
De (10.9-12s): la tension du GPV est supérieure à la tension au point optimum; ce qui signifie qu'on est en mode 3 (mode de régulation de puissance). Le point de fonctionnement doit se situer à droite du point optimum ($V_{pv} > V_{op}$). (Voir (fig. (4.15.c)). Par contre, pour les autres portions, la tension du GPV coïncide avec la valeur optimale.

D'autre part, on remarque que la tension augmente lorsque la batterie est en charge, diminue quand la batterie se décharge et reste constante lorsque le courant est nul, cela revient au fait aux directives du superviseur d'énergie.

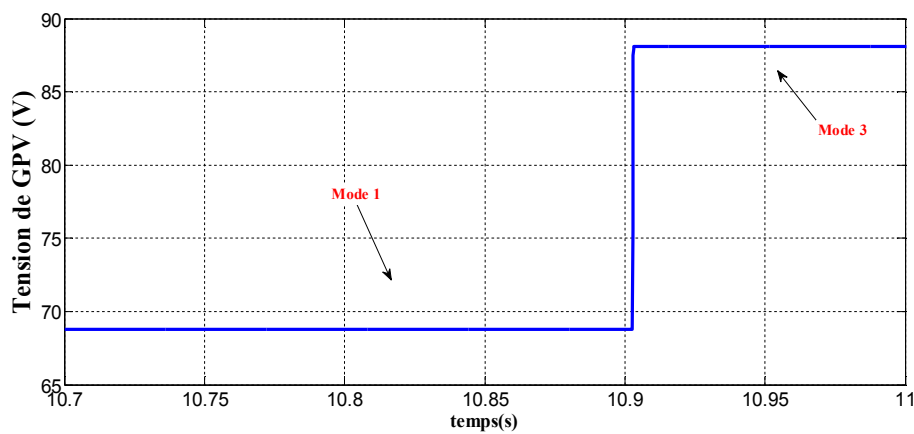
La figure (4.18) présente l'état de charge des batteries et celui des supercondensateurs respectivement. On constate bien que les états de charge des sources d'appoint augmentent en cas de charge (mode 1) et diminuent en cas de décharge.



(a) Tension du GPV

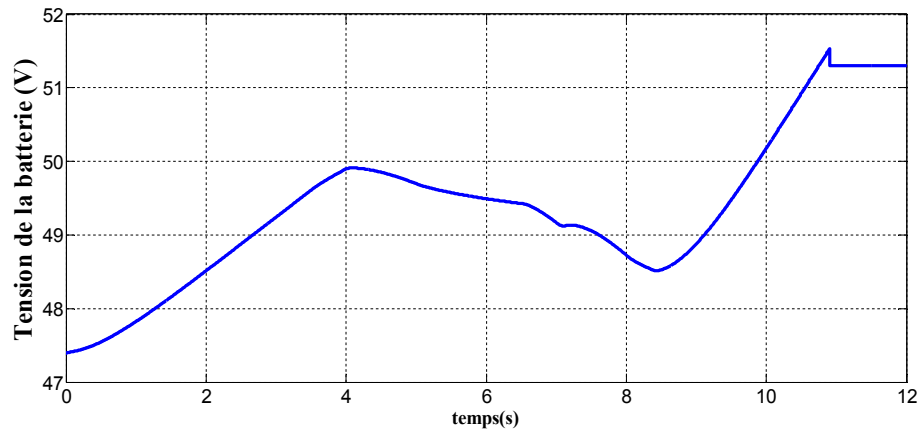


(b) Zoom de passage du mode 1 au mode 2 de la tension de GPV

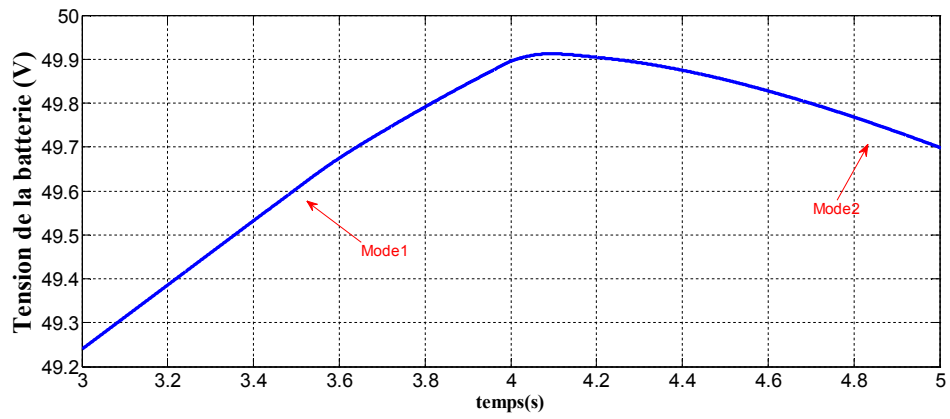


(c) Zoom de passage du mode 1 au mode 3 de la tension de GPV

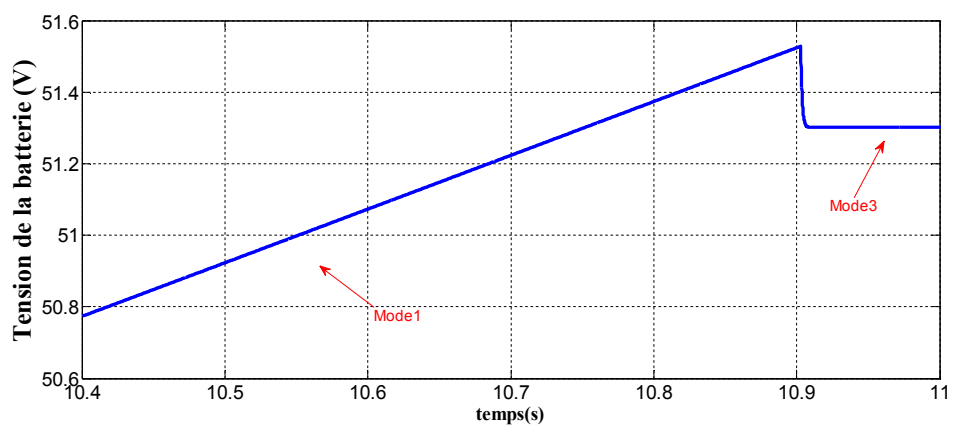
Figure (4.15) : Tension du générateur photovoltaïque et son zoom



(a) Tension de la batterie



(b) Zoom de passage du mode 1 au mode 2 de la tension de la batterie



(c) Zoom de passage de mode 1 au mode 3 de la tension de la batterie

Figure (4.16) : Tension de la batterie et ses zooms

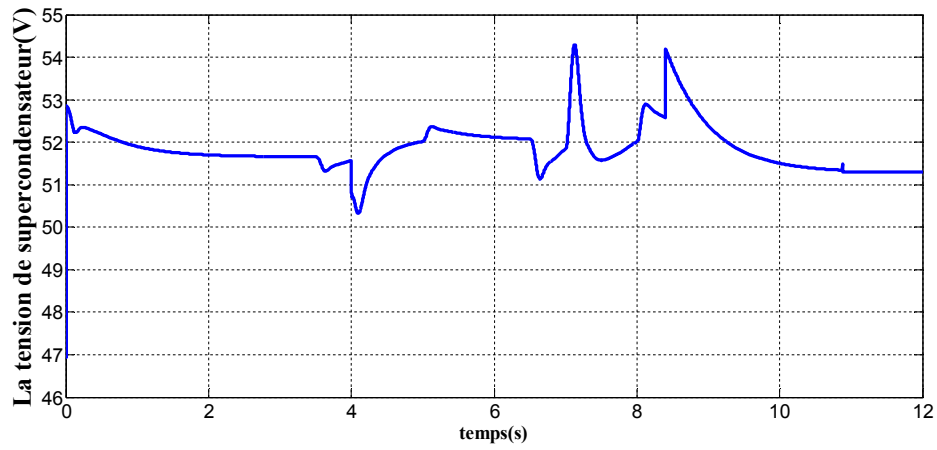
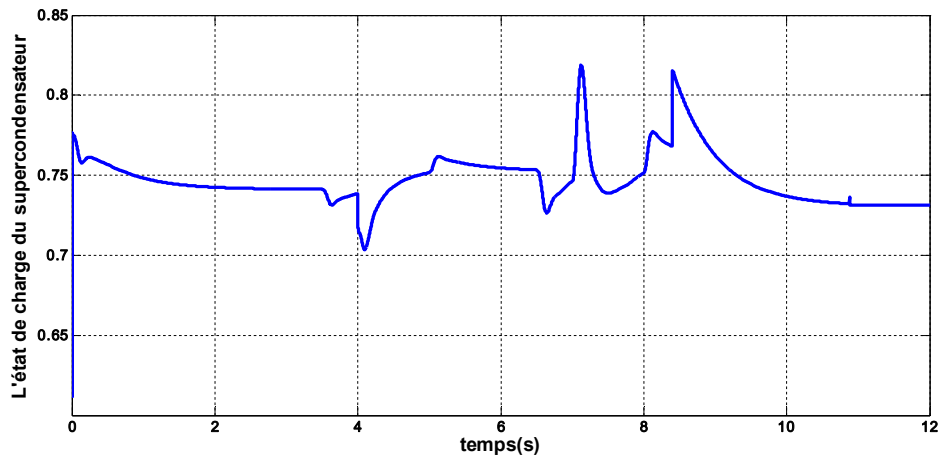
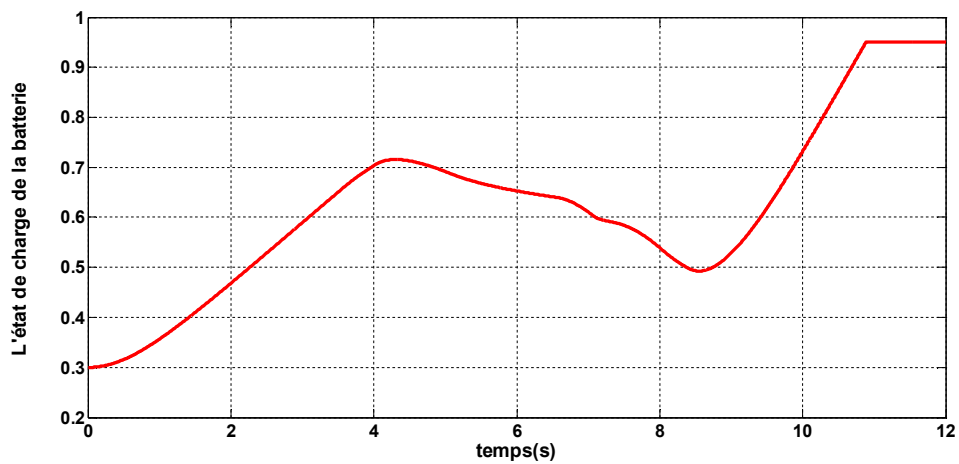


Figure (4.17) : Tension des SC



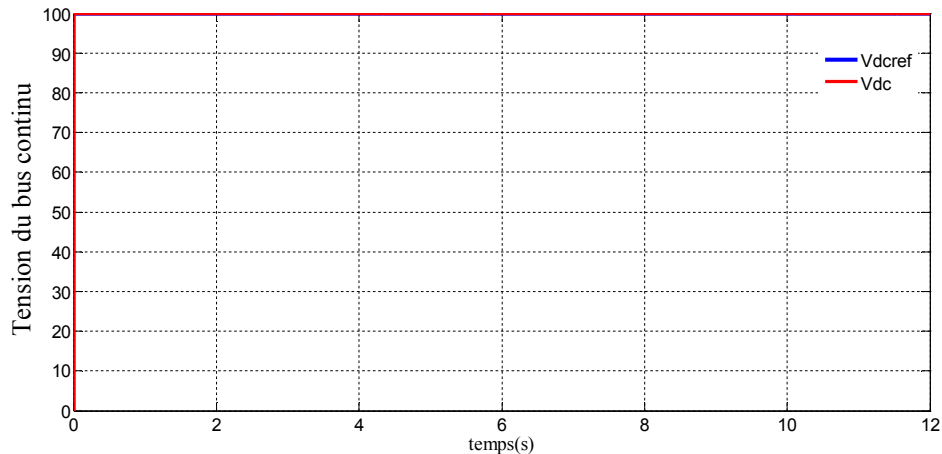
(a) SOC_{SC}



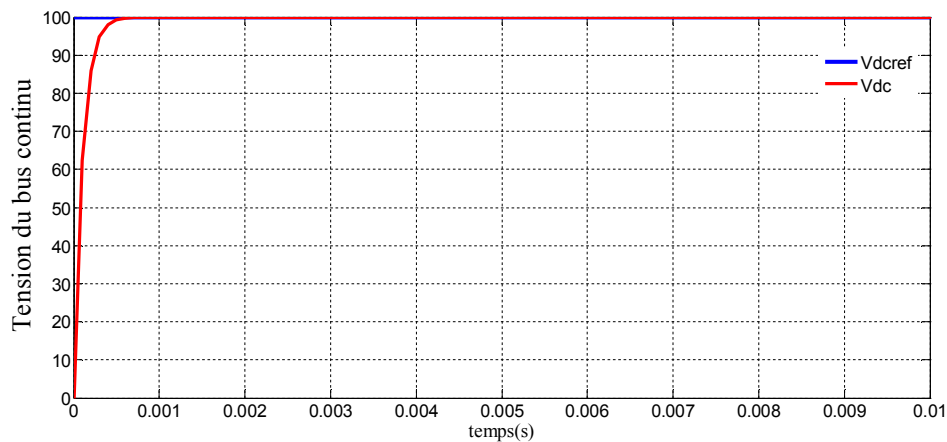
(b) SOC_{bat}

Figure (4.18) : Etat de charge des SC et de la batterie

La figure (4.19) montre les allures de la tension du bus continu et son zoom. On constate que cette tension est bien régulée et que la réponse suit sa référence sans dépassement, ni erreur statique (avec un temps de réponse de 0.00065s), ce qui prouve l'efficacité du contrôleur choisi.



(a)



(b)

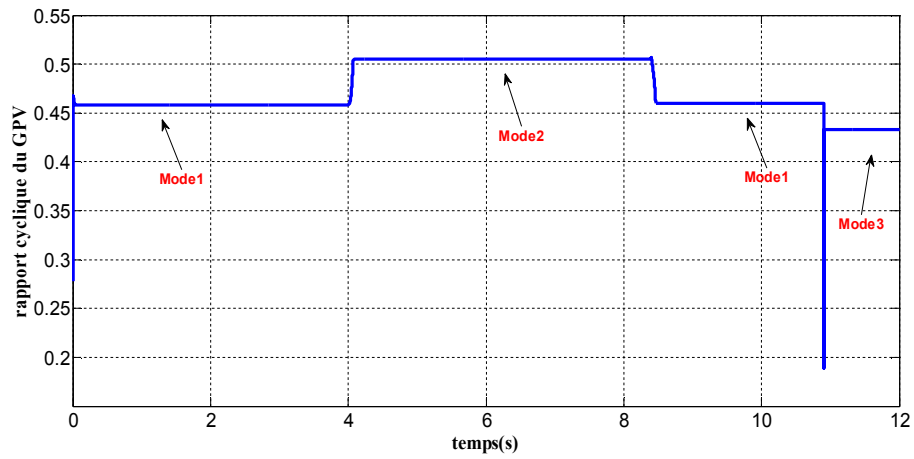
Figure (4.19): Tension du bus continu et son zoom

4.6 Caractéristiques de commande

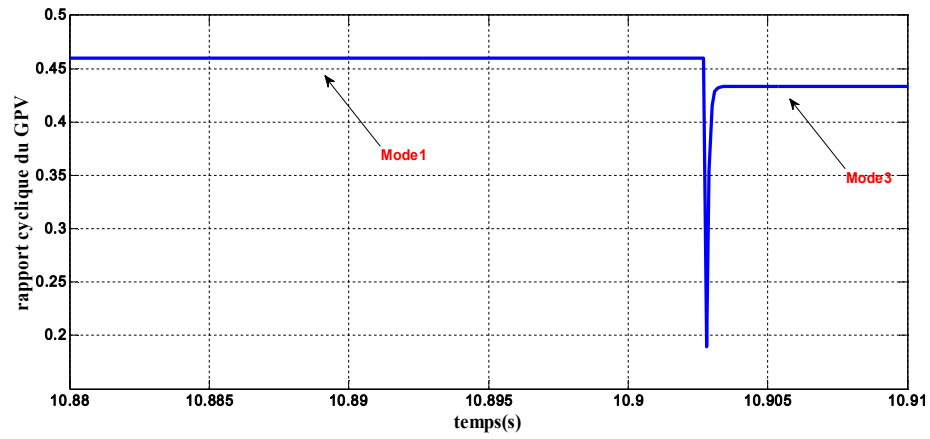
Les figures (4.20), (4.21) et (4.22), montrent les allures des rapports cycliques des différents convertisseurs statiques utilisés. On peut remarquer que :

Lors de passage du mode 1 (MPPT) en mode 3 (régulation de puissance), le rapport cyclique de l'hacheur survolteur du GPV diminue de 0.46 à 0.43 (figure (4.20.b)) et augmente de 0.45 à 0.5 lorsque le GPV passe du mode1 au mode 2 (figure

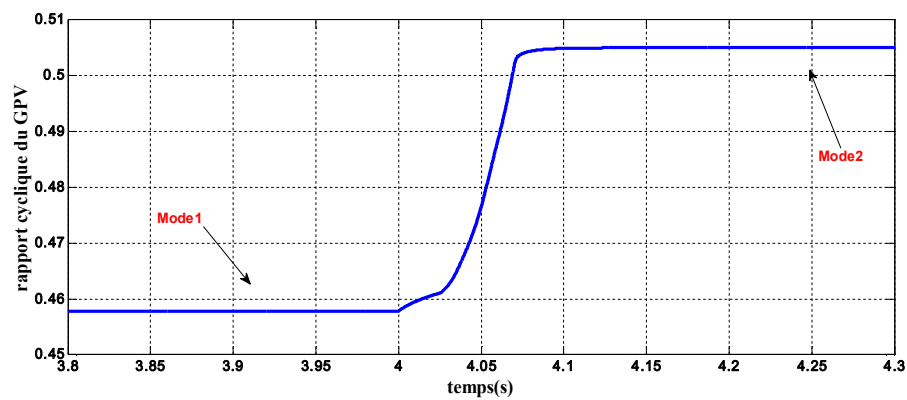
(4.20.c) ; ce qui peut être expliqué par le fait que lors du fonctionnement de l'hacheur boost en MPPT, produisant ainsi une impédance équivalente d'entrée égale à $R_{ch}(1-\alpha^2)$. De ce fait, pour passer au mode 3 (coté droit de la caractéristique I-V), l'impédance équivalente doit augmenter, ce qui revient à diminuer le rapport cyclique α . Par contre, les rapports cycliques liés aux sources secondaires varient légèrement autour de leurs valeurs moyennes (0.5). Ceci peut être expliqué par le fait que ces sources ne sont pas profondément déchargées et que la demande de la charge est modérée.



(a) Rapport cyclique de l'hacheur survolteur lié au GPV



(b) Zoom du passage du mode 1 au mode 3



(c) Zoom du passage du mode 1 au mode 2

Figure (4.20): Rapport cyclique du GPV pour les différents modes

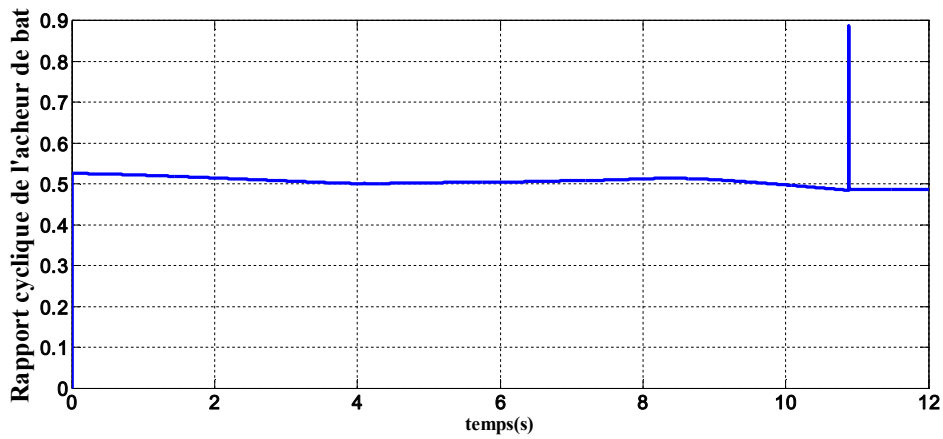


Figure (4.21) : Rapport cyclique de l'hacheur bidirectionnel lié à la batterie

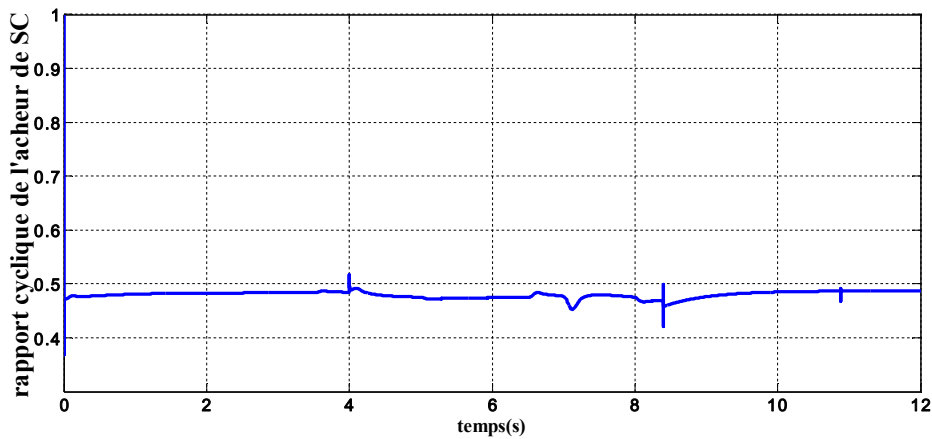


Figure (4.22) : rapport cyclique de l'hacheur bidirectionnel lié aux SC

4.7 Résultats de simulation de la MSAP

La figure (4.23) illustre la position de la cage pour des différentes consignes programmées, où on peut clairement remarquer un bon suivi des références de façon aperiodique, avec un temps de réponse de (0.5s).

La Figure (4.24) montre la réponse en vitesse de la MSAP, et cela pour une double augmentation de la charge, de 12 N.m à $t=5s$, et de 20 Nm à 6.5s. On peut constater que la vitesse suit sa référence en statique, alors qu'en dynamique, des dépassements sont constatés.

Les allures des figures (4.25), (4.26) et (4.27) montrent les performances de la commande vectorielle de la MSAP. On remarque bien que le courant i_{qs} a un signe dépendant de l'augmentation ou la diminution de la consigne de position alors que

son amplitude croit proportionnellement avec l'augmentation de la charge. La réponse des deux composantes du courant statorique montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la machine ($i_{ds}=0$). D'autre part, on remarque que la tension V_{ds} et le flux sur l'axe d sont des images du courant i_d , alors que la tension V_{qs} et le flux sur l'axe q sont images du courant i_{qs} (fig. (4.28), (4.29), (4.30), (4.31)).

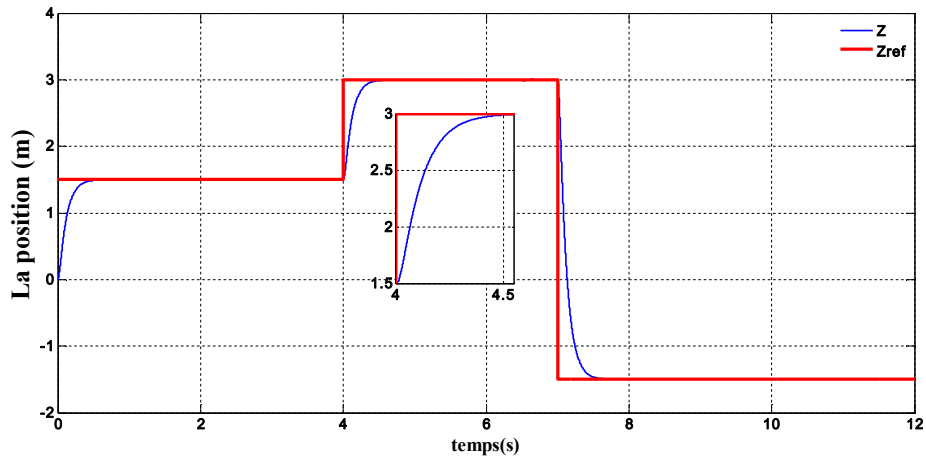


Figure (4.23) : Position et sa consigne de l'ascenseur

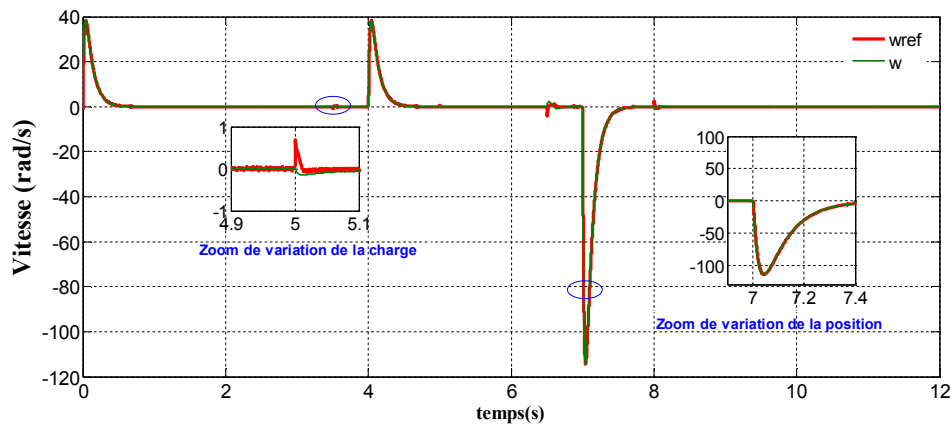


Figure (4.24) : Vitesse de rotation mécanique

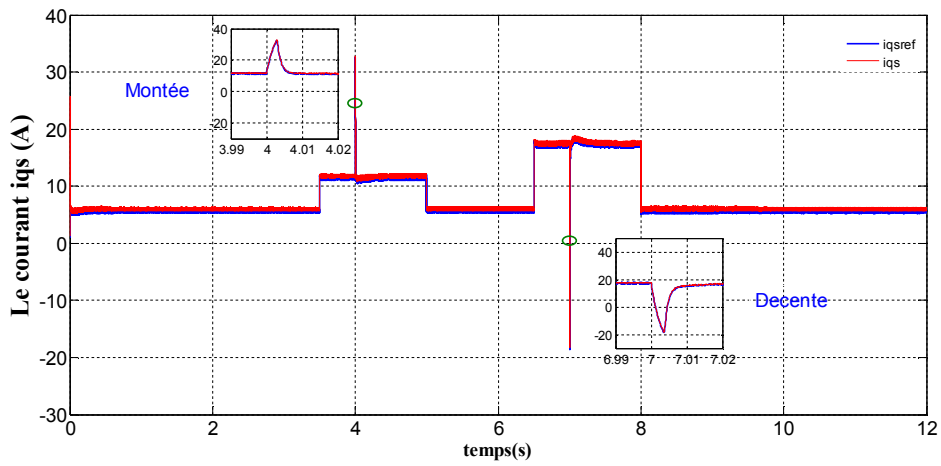


Figure (4.25) : Le courant en quadrature (i_{qs}) et sa référence

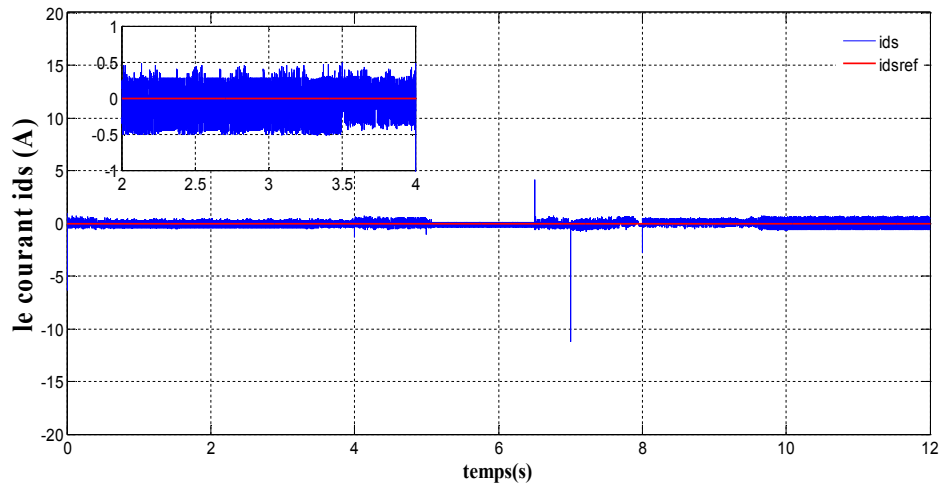


Figure (4.26) : Le courant direct (i_{ds}) et sa référence

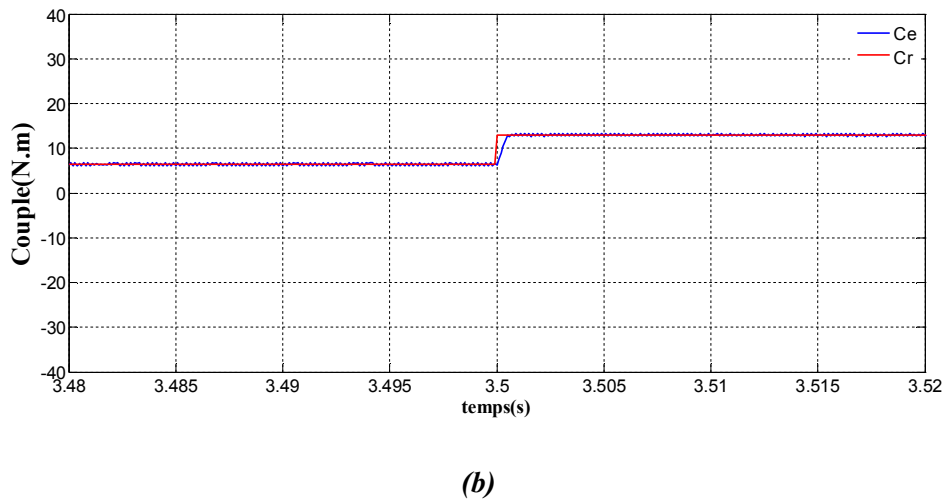
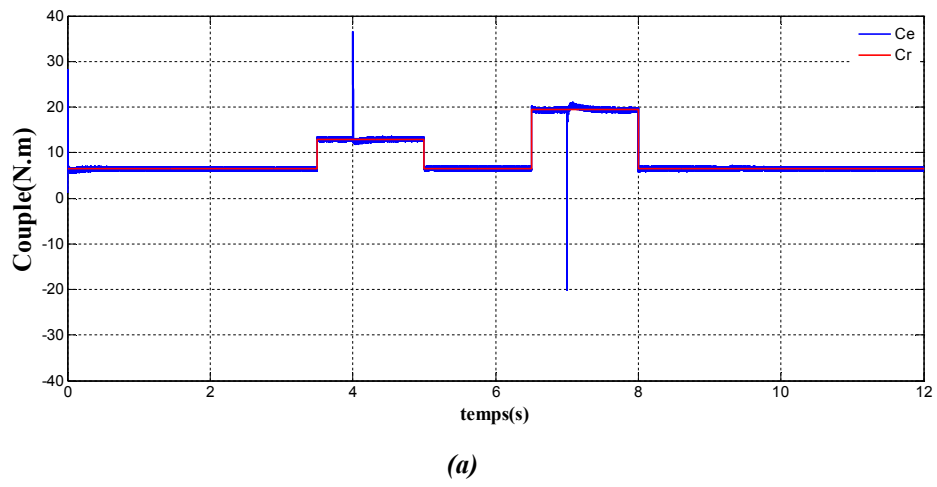


Figure (4.27) : le couple électromagnétique (C_{em}) et son zoom

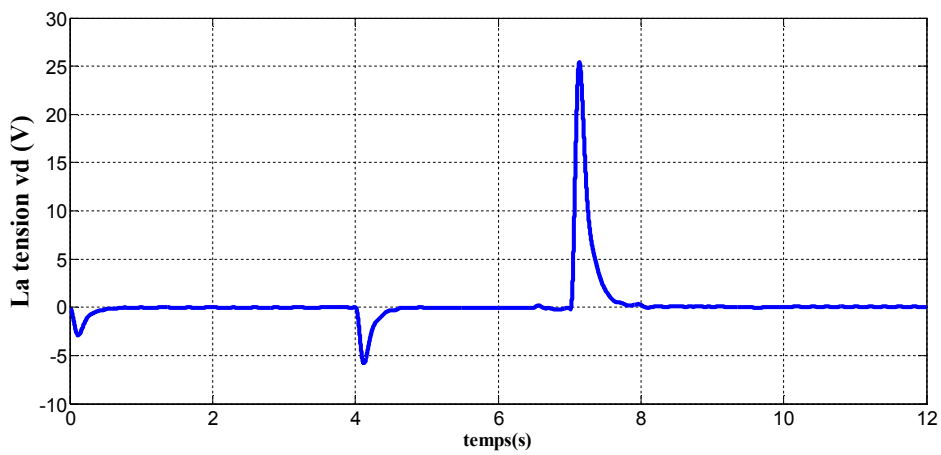


Figure (4.28) : La tension directe V_{ds}

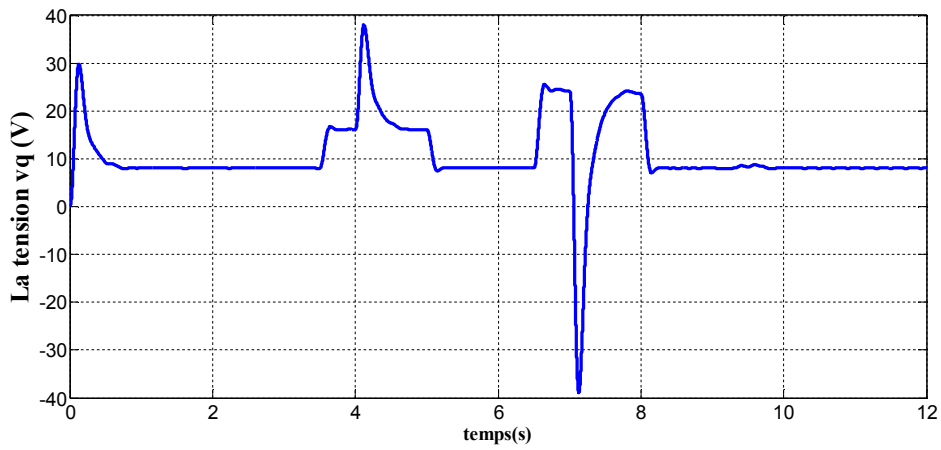


Figure (4.29) : La tension en quadrature V_{qs}

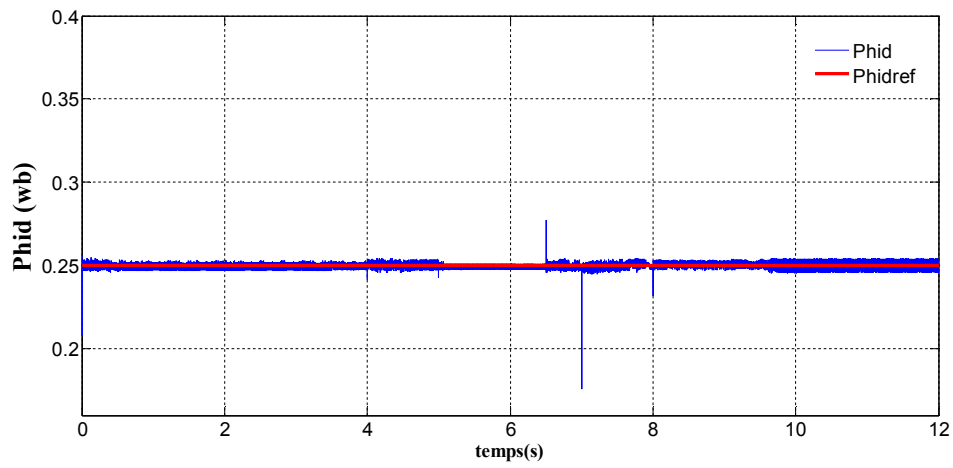


Figure (4.30) : Le flux d'axe direct (Φ_d) et sa référence (flux de l'aimant)

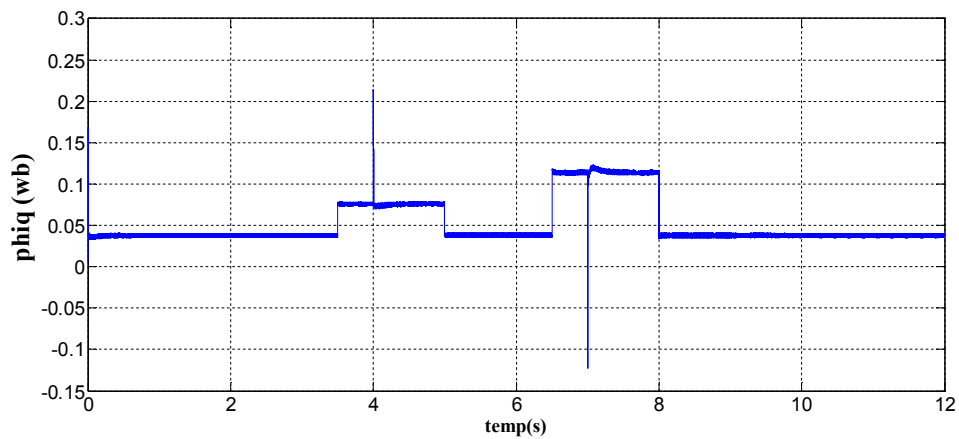


Figure (4.31) : Le flux d'axe en quadrature (Φ_q)

4.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des résultats de simulation du système ascenseur de 3 mètres de hauteur avec un profil de masse M_c . La stratégie proposée distribue la régulation de la tension du bus DC entre les différentes sources en fonction des besoins de la charge. Cela permet une gestion efficace de l'énergie et assure la continuité d'alimentation en cas de défaillance d'une source. D'une part, la méthode de la logique floue a été utilisée afin d'améliorer la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) via un hacheur Boost. D'autre part, les super condensateurs permettent de satisfaire des appels de puissance électrique très importants sur des durées de l'ordre de 1 à 10 secondes. En définitive les batteries gèrent les besoins avec une constante de temps lente.

Conclusion Générale

Pour les régions isolées, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. Dans ce contexte, l'interconnexion de plusieurs sources d'énergie renouvelable (des éoliennes, des panneaux photovoltaïques, des petites centrales hydroélectriques, etc.) dans un Système d'Energie Hybride (SEH) peut avoir une incidence profitable sur la production d'énergie électrique, en termes de coût et de disponibilité.

Le SEH dans notre travail constitué des panneaux photovoltaïques, des batteries, et des supercondensateurs alimente, via des convertisseurs de puissance, la machine synchrone à aimants permanents (entraînement direct) pour déplacer la cage de l'ascenseur, constituée par un ascenseur de 3 mètres de hauteur pouvant lever une masse maximale de 150kg.

Le principal objectif de ce mémoire était de proposer une stratégie de gestion d'énergie permettant les échanges de flux d'énergie entre les sources et la charge. Des simulations sous Matlab/Simulink de l'ensemble du sous-système sont effectuées à la quatrième partie pour valider les approches de commandes définies au chapitre 3. De ce fait, quelques conclusions ont été déduites:

- Le régulateur MPPT flou donne un suivi adéquat de la puissance maximale du générateur photovoltaïque, avec une oscillation moindre autour de sa référence et permet la poursuite du point optimum lors d'une variation brusque de l'éclairement ou de la charge.
- La simulation du régulateur par mode de glissement appliqué aux deux courants i_d , i_q offre de bonnes performances statiques et dynamiques.
- La position réelle suit la référence imposée avec une faible influence lors de la variation de la charge en régime de montée ou de descente de la cage de l'ascenseur.
- La tension du bus DC du système est bien régulée et que la réponse suit sa référence sans dépassement.

- Les régulateurs par la théorie de Lyapounov des convertisseurs de la batterie et des supercondensateurs sont démontré une robustesse notable vis-à-vis la variation des modes de fonctionnement.
- Une efficacité notable du gestionnaire d'énergie proposé permet de gérer les échanges de flux d'énergie entre les sources et la charge.

En fin, on propose quelques perspectives pour l'avenir:

- La réalisation d'un banc d'essai à partir des résultats de simulation pour compléter le travail et concrétiser ce projet sur site.
- L'utilisation de la commande par passivité et la commande plate, pour le contrôle du système.
- L'utilisation de la commande CRONE pour remplacer les régulateurs classique de type PI, appliques à la commande vectorielle du moteur synchrone.

Annexe

Annexe A : Paramètres des composants du SEH

Les paramètres de la machine synchrone à aimant permanent:

- Puissance nominale 3 kW
- Fréquence nominale 50 Hz
- Résistance de phase 1.4 Ω
- Inductance cyclique sur l'axe directe 0.0066 H
- Inductance cyclique sur l'axe transverse 0.0058 H
- Nombre de paire de pôles 3
- Amplitude de flux des aimants permanents 0.25 Wb
- Moment d'inertie 0.00176 Kg.m²
- Coefficient de frottement visqueux 0.00038818N.m/rd/s
- Rayon du pignon (r) 25.9mm

Onduleur de tension :

- F_{porteuse} 20kHz

Les paramètres de Générateur photovoltaïque :

- Puissance crête : 990 W
- Tension optimale : 68.8 V
- Courant optimum : 14.4 A
- Intensité de court-circuit : 15.3 A
- Tension en circuit ouvert : 86.4 V
- $\alpha = 0.06 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$
- $\beta = 0.4 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$

Convertisseur associé au GPV : $L_{\text{pv}} = 1\text{mH}$

Les caractéristiques de la batterie :

- La tension 48 V
- La capacité 200Ah
- r_{bat} 0.02 Ω
- n 24 cellules

Convertisseur associé: $L_{\text{bat}} = 250\mu\text{H}$

Les caractéristiques des supercondensateurs :

- Capacité totale 14.5F
- Tension nominale 60v
- Energie disponible 19575J
- R_{sc} 118.27m

Convertisseur associé : $L_{sc} = 250\mu H$

Bus continu

- C 1000 μF
- Vdc 100v

Bibliographies

Bibliographie

- [ARR-07] Mohamed ARROUF, «optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque», Thèse de doctorat de l'université mentouri de Constantine, Soutenu le 25/12/2007.
- [AYD-07] M.Y. Ayad, M. Becherif, D. Paire, A. Djerdir et A. Miraoui , « Passivity based control of hybrid power sources using fuel cell, supercapacitors, and batteries on the dc link for energy traction system», IEEE International Electric Machines & Drives Conference IEMDC '07, volume 1,2007.
- [BAG-11] Baghdadi Fazia, «Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables », Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, Soutenu le 26 /09 /2011.
- [BEC-06] M. Becherif, M.Y. Ayad et A. Miraoui, « Modeling and Passivity-Based Control of Hybrid Sources: Fuel Cell and Supercapacitors», ISA 2006, vol.3, USA, Oct 2006.
- [BEH-10] M. Becherif, M. Y. Ayad, A. Henni, and A. Aboubou , « Hybridization of Solar Panel and Batteries for Street lighting by Passivity Based Control », IEEE International Energy Conference, 2010.
- [BEL-07] Belhadj Mohammed, «Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome», Mémoire de Magister du Centre Universitaire de Bechar, 2007-2008.
- [BEL-12] Brihmat Fouzia, «L'Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien», Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Soutenu le 03/07/2012.
- [BEN-09] Benbrahim Amel, «Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrones à Aimants Permanents», Mémoire de Magister de l'Université de BATNA, Soutenu le 18 / 06 /2009.
- [BEN-11] Bendjamâa Ibrahim, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque», Mémoire de Magister de l'Université de Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.

- [BOU-07] Boukhers Djamil, «Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage», Mémoire de Magister de l'Université de Mentouri de Constantine, 28 / 11 / 2007.
- [BOU-08] Zegueb Boubaker, «Commande d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents Sans Capteur de Vitesse. Utilisation d'Un Observateur Non Linéaire», Thèse de Magister de l'Université de Batna, 30 /06 /2008.
- [BOU-11_a] F.Bouchafaa^{a*}, I.Hamzaoui^a, A.Hadjammar^a, «Fuzzy Logic Control for the tracking of maximum power point of a PV system», Energy Procedia 6 (2011) PP_633–642.
- [BOU-11_b] M.boukli-hacene Omar, «Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Mini d'un Convertisseur MPPT Pour Une Meilleure Gestion Energétique», Mémoire de Magister de l'Université de ABOU BAKR BELKAID-TLEMCEM, décembre 2011.
- [BRI-12] Brihmat Fouzia, «L'Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien», Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Soutenu le 03/07/2012.
- [CAM-07] Mamadou Baïlo CAMARA, «Supercondensateurs pour échange dynamique d'énergie à bord du véhicule électrique hybride», Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, FRANCE, Soutenu publiquement le 07 décembre 2007.
- [CAM-11] Mohamed Ansoumane CAMARA, «Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs», Thèse de doctorat de l'Université de Paris Est Créteil, soutenue publiquement le 4 juillet 2011.
- [CHE-12] Bennour Cherif, « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation», Mémoire de Magister, université de Biskra, 2012.
- [CHI-11] Said Chikha, «Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques», Mémoire de Magister de l'Université de LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, 2010/2011.
- [CHO-11] Choug Noureddine, «Etude de la Robustesse des Contrôleurs Flous d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents avec Pilotage Vectoriel»,

Mémoire de Magister de l'Université de HADJ L AK H DAR - BATN A, 2011.

- [DAN-12] Hoang Anh Dang¹, Caroline GUYON², Benoit DELINCHANT¹, Patrick BEGUERY², Frédéric WURTZ¹ «Gestion de l'énergie électrique dans l'habitat, cas du stockage électrochimique», rapport de Schneider Electric, juin 2012.
- [DIL-04] Guillaume Dillenseger, «Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours», Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, soutenue publiquement le 14 décembre 2004.
- [DIX-02] J. W. Dixon et M. Ortúzar, «Ultracapacitors dc-dc converters in regenerative braking system», IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, vol. 17, n° 8, 2002.
- [GER-02] Olivier Gergaud, «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'École Normale Supérieure de Cachan, Soutenue le 9 décembre 2002.
- [HAS-10] Yamina Hasni¹, Maher CHAABENE², «Réseau électrique hybride autonome: Supervision et gestion des sources», International Renewable Energy Congress – Sousse, Tunisia, November 5-7, 2010.
- [LAB-06] Julien Labbé, «l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, Soutenue le 21 décembre 2006.
- [LAH-07] Lahlah Salah, «Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C). », Thèse de Magistère de l'Université de BATNA, 2007.
- [LAH-09] Lahouel Dalila, «Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents», Thèse de Magister de l'Université de BATN A, Soutenu le, 01 / 07 / 2009.
- [MAK-08] Hattab Maker, «Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association Pile à Combustible et Supercondensateurs », Thèse

- de doctorat de l'Université de TECHNOLOGIE BELFORT MONTBELIARD, soutenue publiquement le 4 novembre 2008.
- [MER-09]** Asma Merdassi, «Outil d'aide à la modélisation moyenne de convertis Outil d'aide à la modélisation moyenne des convertisseurs statiques pour la simulation de systèmes mécatroniques», Thèse de doctorat de L'Institut Polytechnique de Grenoble, Soutenue le 15/10/2009.
- [OUL-07]** Mohamed A. Ould Yahya 1, A. Ould Mahmoud 1 et I. Youm 2, « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) », Revue des Energies Renouvelables, CDER, Vol. 10 N°2, 2007.
- [PAI-06]** D. Paire, M. Becherif et A. Miraoui , « Passivity-based control of hybrid sources applied to a traction system», Workshop on Hybrid and Solar Vehicles, Italy, Nov. 2006.
- [PAI-10_a]** Damien Paire, «Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides : application à un ascenseur avec récupération d'énergie», Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, soutenue le 6 décembre 2010.
- [PAI-10_b]** Damien Paire, Marcelo G. Simoes Jérémy Lagorse and Abdellatif Miraoui «A real-time sharing reference voltage for hybrid generation power system», , IEEE conférence, 2010.
- [RIF-10]** Yann Riffonneau, «gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau – Application à l'habitat », Thèse de doctorat de l'Université de JOSEPH FOURIER, soutenue le 23 octobre 2009.
- [SAD-13]** Redha Sadoun, «Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage », Thèse de doctorat de l'ECOLE CENTRALE DE LILLE, soutenue publiquement le 03/06/2013.
- [THO-05]** Phatiphat Thounthong, «Conception d'une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs», Thèse de doctorat à L'Institut National Polytechnique de Lorraine, Soutenue le 09 décembre 2005.

- [THO-07] Phatiphat Thounthong, Stéphane Raël, and Bernard Davat, «Control Strategy of Fuel Cell and Supercapacitors Association for a Distributed Generation System», IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 54, no. 6, December 2007
- [TIA-11] Tiar Mourad, «Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride », Thèse de Magister de l'Université Mohamed Khider - Biskra, Soutenue le 10 / 10 /2011.
- [VEC-05] Ionel Vechiu, «modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat de l'université du Havre, Soutenue le 15 décembre 2005.
- [ZAR-10] Zarour Laid, «Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau», Thèse de doctorat de l'Université de MENTOURI DE CONSTANTINE, soutenue publiquement le 10 / 07 / 2010.