

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP-DAKAR

N° d'ordre : 34



THESE

présentée à :

l'Ecole Supérieure Polytechnique (E.S.P.)

en vue de l'obtention
du diplôme de **DOCTEUR 3^{ème} Cycle**
Spécialité : **PHYSIQUE**

par :

KHALY TALL

**MODELISATION, METHODE DE DETERMINATION
SYSTEMATIQUE DES CORRECTEURS ET SIMULATION
D'UNE CHAINE ENERGETIQUE
CONTRIBUTION A LA REALISATION D'UNE MICRO- CENTRALE
MULTIGENERATEURS COUPLABLE SUR LE RESEAU ELECTRIQUE**

Soutenue le 20 Juin 1998 à 9 heures devant le Jury composé de :

Président :	<i>Mouhamadou Diop</i>	SALL	Professeur	ESP - UCAD
Examineurs :	<i>Mansour</i>	KANE	Professeur	FST - UCAD
	<i>Mamadou</i>	ADJ	Maître de Conférences	ESP - UCAD
	<i>Papa Alioune</i>	NDIAYE	Maître Assistant	ESP - UCAD
	<i>Sidi Mohamed</i>	FARSI	Maître Assistant	ESP - UCAD
	<i>Gustave</i>	SOW	Maître Assistant	ESP - UCAD
	<i>Grégoire</i>	SISSOKO	Professeur	FST - UCAD

AVANT - PROPOS

Le travail que nous présentons dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Énergies Renouvelables (L.E.R) de l'École Supérieure Polytechnique (ESP) , Université Cheikh Anta Diop, dirigé par Monsieur Gustave SOW, au sein du groupe de recherches Énergies - Électronique - Électronique de Puissance et Informatique Appliquée (E³PIA).

Nous tenons tout particulièrement à remercier:

- Monsieur Oumar SOCK, Directeur de l'ESP. Nous tenons à lui témoigner notre reconnaissance d'avoir répondu à toutes nos sollicitations d'ordre administratif.

- Monsieur Mouhamadou Diop SALL, Professeur à l'ESP qui, malgré ses charges multiples, nous fait l'honneur d'être le Président de ce Jury.

- Monsieur le Professeur Mansour KANE, Directeur du Centre d'Études et de Recherches sur les Énergies Renouvelables (CERER), pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant d'être membre de ce jury. Nous espérons que notre modeste travail saura retenir son attention dans le cadre des activités du CERER.

- Monsieur Grégoire SISSOKO, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD, Nous le remercions pour avoir accepté de diriger cette thèse. Sa disponibilité, sa sympathie alliées à ses qualités de Chercheur ont été des éléments déterminants dans la réalisation de ce travail.

- Monsieur Mamadou ADJ, Maître de Conférences à l'ESP. Nous lui témoignons notre reconnaissance pour avoir mis à notre disposition l'équipement de son laboratoire à notre disposition. Ses conseils et son soutien ont été bien appréciés. Nous le remercions pour avoir accepté d'être membre du jury.

- Monsieur Papa Alioune NDIAYE, Maître Assistant à l'ESP, Chef du Département Génie Électrique. Nous lui témoignons notre reconnaissance pour avoir participé à notre initiation à la recherche au sein du laboratoire. Sa cordialité et sa disponibilité ont toujours été sans réserve. Nous le remercions d'avoir accepté de siéger dans le jury.

- Mr Sidi Mohamed FARSI, Maître Assistant à l'ESP. Nous avons bien apprécié ses qualités de chercheur et sa volonté au travail. Son soutien scientifique et moral au sein du Laboratoire et du Groupe E³PIA ne nous a jamais fait défaut. Nous le remercions d'avoir accepté de participer à ce jury.

- Monsieur Gustave Sow, Maître Assistant, Responsable du L.E.R, pour ses compétences techniques dont il a su nous faire profiter. Nous lui témoignons toute notre profonde gratitude et notre reconnaissance d'avoir accepté de diriger ce travail et de nous avoir fait confiance depuis nos premiers pas dans le Laboratoire. En tant que chercheur, Mr Sow a mis à notre disposition une documentation très fournie et a aussi permis de fixer beaucoup de notions nécessaires pour mener à bien notre travail de thèse.

Nous le remercions pour sa patience, sa gentillesse et de nous avoir consacré beaucoup de son temps.

- Monsieur Siméon FONGANG, Responsable du Groupe de Formation Doctorale de l'ESP.

- Mr Ababacar Niang, pour ses contributions remarquables à nos travaux.

- Monsieur Abibou GAYE, pour avoir mis gracieusement à notre disposition une machine qui a permis de mener une bonne partie des simulations de ce mémoire. Nous le remercions de sa gentillesse et de sa disponibilité.

- Messieurs Lamine THIAW et Salif Sagana FALL, inscrits en thèse au sein du groupe, pour leur participation active dans nos travaux.

- Monsieur Claude Lishou, pour son soutien, ses encouragements et ses conseils. Nous remercions aussi Mr Ngagne Dièye pour nous avoir toujours soutenu.

- Nos collègues chercheurs du LER, Magaye Diop, Roberto Adjakou, Mbow, Talla Ndiaye, Saliou Diouf, Boubacar Niang, du LEA Vincent Sambou, Thiam, M. Faye, et du LES de la FST, A. Corréa, Dieng, A. Guèye, Habiboullah.

- Nous remercions tous les autres chercheurs qui ont su maintenir une ambiance propice à nos travaux dans l'école, en particulier Amadou T. GAYE, Kalé GUEYE, Adamou GARBA.

- Nous remercions aussi Monsieur Abibou NGOM, Maître de Conférences, Directeur des Études et à travers lui tout le personnel enseignant de l'École et tout le personnel Administratif et Technique.

- Nous ne saurions terminer sans une pensée pieuse à notre cher père disparu sans avoir assisté à l'achèvement de ce travail.

- Nous avons une pensée affectueuse à notre épouse Atta Gadge et à notre jeune fille Mame Maty.

à
ABDOU COUMBA TALL
pour son soutien
inestimable

Khaly TALL : Modélisation, Méthode de détermination systématique des correcteurs et simulation d'une chaîne énergétique

RESUME

Ce mémoire porte sur la détermination des régulateurs des systèmes à énergies renouvelables comportant des convertisseurs statiques, en vue de la mise en place d'une microcentrale multigénérateurs couplable sur le réseau.

Dans un premier temps, l'auteur fait une description des systèmes énergétiques composant la microcentrale pour dégager des points de fonctionnement autour desquels seront développés des modèles servant à la détermination des régulateurs.

Ces correcteurs sont déterminés de manière systématique en utilisant les outils classiques de l'automatique après une modélisation du système par schémas équivalents moyens. L'auteur dégage des résultats des possibilités d'étude des régulateurs des systèmes à énergie renouvelable comportant des convertisseurs statiques.

La dernière partie est consacrée à l'application des régulateurs au système de la microcentrale.

Une étude du couplage des générateurs par une batterie de condensateurs plutôt que par un système de stockage par accumulateurs est réalisée notamment l'obtention d'un fonctionnement stable grâce à l'utilisation des régulateurs.

L'auteur a aussi montré la faisabilité du couplage de la microcentrale au réseau électrique, grâce à l'asservissement de la tension de sortie de l'onduleur à une consigne qui peut être le signal du réseau électrique. Dans cette partie aussi, l'auteur donne les résultats de la simulation avec les régulateurs déterminés à partir des modèles par schéma équivalent moyen.

MOTS - CLEFS

- générateur photovoltaïque
- convertisseurs statiques
- modélisation
- simulation
- régulateurs
- optimisation

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
I : PRÉSENTATION ET DESCRIPTION DU SYSTÈME	7
I.1 LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	8
I.2 LE SYSTEME D'OPTIMISATION DU TRANSFERT D'ENERGIE	10
1.2.1 <i>REGLES DE CONNEXION</i>	<i>10</i>
1.2.2 <i>LE HACHEUR DEVOLTEUR.....</i>	<i>11</i>
1.2.2.1 <i>Constitution.</i>	<i>12</i>
1.2.2.2 <i>Fonctionnement réel du hacheur dévolteur.....</i>	<i>12</i>
1.2.3 <i>LE HACHEUR SURVOLTEUR.....</i>	<i>13</i>
1.2.3.1 <i>Constitution.</i>	<i>13</i>
1.2.3.2 <i>Fonctionnement du hacheur survolteur</i>	<i>14</i>
I.3 LE SYSTEME DE CONVERSION CONTINU - ALTERNATIF	14
1.3.1 <i>LES ONDULEURS MONOPHASES AUTONOMES</i>	<i>15</i>
1.3.1.1 <i>L'onduleur monophasé avec transformateur à point milieu</i>	<i>16</i>
1.3.1.2 <i>L'onduleur monophasé en demi - pont.....</i>	<i>16</i>
1.3.1.3 <i>L'onduleur monophasé en pont.....</i>	<i>16</i>
1.3.1.3.1. <i>Les interrupteurs électroniques.....</i>	<i>18</i>
1.3.1.3.2. <i>La commande des interrupteurs</i>	<i>19</i>
1.3.2 <i>L'ONDULEUR A COMMANDE MODULEE.....</i>	<i>21</i>
I.4 CONCLUSION.....	23
II SIMULATION DU FONCTIONNEMENT REEL DU SYSTEME.....	24
II.1 SIMULATION DU SYSTEME CONSTITUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ET DU HACHEUR DEVOLTEUR.....	25
2.1.1 <i>LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE</i>	<i>26</i>
2.1.2 <i>LE HACHEUR DEVOLTEUR ET SON FILTRE DE SORTIE.....</i>	<i>27</i>
2.1.2.1 <i>Le pont interrupteur.....</i>	<i>28</i>
2.1.2.2 <i>Le filtre de sortie.....</i>	<i>29</i>
2.1.2.3 <i>La commande du hacheur dévolteur.....</i>	<i>29</i>
2.1.3. <i>LE SYSTEME GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE - HACHEUR DEVOLTEUR</i>	<i>30</i>
II.2 MODÈLE SIMULINK DU SYSTEME CONSTITUE D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ET D'UN HACHEUR SURVOLTEUR.....	33
2.2.1 <i>LE HACHEUR SURVOLTEUR.....</i>	<i>33</i>
2.2.1.1 <i>Le pont interrupteur.....</i>	<i>34</i>
2.2.1.2 <i>La commande du pont interrupteur</i>	<i>35</i>

2.2.2 : LE SYSTEME GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ET HACHEUR SURVOLTEUR	36
II.3 MODÈLE DE SIMULATION DU SYSTEME CONSTITUE DE L'ONDULEUR ET DE LA CHARGE A TRAVERS UN TRANSFORMATEUR.....	37
2.3.1 : LE PONT ONDULEUR.....	38
2.3.2 : LOGIQUE DE FONCTIONNEMENT :	38
2.3.3 LE FILTRE A LA SORTIE DE L'ONDULEUR.....	41
2.3.4 : LA COMMANDE MLI PAR LA METHODE DE LA SOUS- OSCILLATION	41
2.3.5 LE TRANSFORMATEUR.....	42
II.4 RESULTATS DE LA SIMULATION DE L'ONDULEUR	42
2.4.1 SIMULATION AVEC LA TENSION D'ENTREE CONSTANTE	43
2.4.2 SIMULATION AVEC LA TENSION D'ENTREE VARIABLE.....	44
II.5. : CONCLUSION.....	44
III MODELISATION DES ELEMENTS DU SYSTEME.....	45
III.1 : GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE - MODELE ASYMPTOTIQUE ...	47
3.1.1. PRINCIPE ET MISE EN ŒUVRE DU MODELE ASYMPTOTIQUE :.....	48
3.1.2 EXPLOITATION DES RESULTATS	49
III.2. MODELISATION PAR SCHEMA EQUIVALENT MOYEN DES CONVERTISSEURS STATIQUES	50
3.2.1. PRINCIPE GENERAL DE LA MODELISATION.....	50
3.2.2 LE HACHEUR SERIE OU HACHEUR DEVOLTEUR.....	51
3.2.2.1 Modélisation du hacheur dévolteur	51
3.2.2.2 Association du hacheur dévolteur et du générateur photovoltaïque.....	52
3.2.2.2.1 Mise en équations du système.	52
3.2.2.2.2 Linéarisation des équations	54
3.2.2.2.3 Ecriture matricielle des équations d'état	55
3.2.3 LE HACHEUR PARALLELE OU HACHEUR SURVOLTEUR.....	56
3.2.3.1 Modélisation du hacheur survolteur.....	56
3.2.3.2 Association du hacheur survolteur et du générateur photovoltaïque.....	57
3.2.3.2.1 Mise en équations du système.	58
3.2.3.2.2 Ecriture matricielle des équations d'état	59
3.2.4 MODELISATION DE L'ONDULEUR MONOPHASE.....	59
3.2.4.1 Schéma équivalent moyen de l'onduleur, mise en équation	59
3.2.4.2 Linéarisation des équations.....	62
3.2.4.3 Ecriture matricielle des équations d'état	63

III.3 SIMULATION DES MODELES PAR SCHEMA EQUIVALENT MOYEN.....	63
3.3.1 FONCTIONNEMENT DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE AVEC HACHEUR DEVOLTEUR.....	63
3.3.1.1 Exploitation des résultats.....	64
3.3.1.2. Comparaison avec les résultats du système réel.....	66
3.3.2. FONCTIONNEMENT DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE AVEC HACHEUR SURVOLTEUR.....	66
3.3.2.1. Exploitation des résultats.....	66
IV. ETUDE DES REGULATEURS - OPTIMISATION DU TRANSFERT D'ENERGIE	69
IV.1 : ETUDE DES REGULATEURS DES GENERATEURS.....	69
4.1.1 : PRINCIPE DE LA DETERMINATION DES CORRECTEURS.....	70
4.1.2 : CORRECTEUR DU SOUS - SYSTEME AVEC HACHEUR DEVOLTEUR.....	72
4.1.3 CORRECTEUR DU SOUS SYSTEME AVEC HACHEUR SURVOLTEUR...	75
4.1.4 CONCLUSION	84
IV.2 COUPLAGE DES TROIS GENERATEURS.....	79
4.2.1 PERTURBATION DE LA CHARGE.	80
4.2.2 PERTURBATION DE L'ENSOLEILLEMENT.	86
4.2.2.1 Régime transitoire.....	88
4.2.2.2 Régime permanent	88
4.2.2.3 Conclusion.....	89
V. ETUDE DES REGULATEURS - APPLICATION A LA MICROCENTRALE	91
V.1 : ASSERVISSEMENT DE LA TENSION DE SORTIE DE L'ONDULEUR ..	91
5.1.1 ETUDE EN BOUCLE OUVERTE.....	92
5.1.1.1 Perturbation de la charge	93
5.1.1.2 : Perturbations de la tension d'entrée	94
5.1.2 : FONCTIONNEMENT EN BOUCLE FERMEE.....	96
5.1.2.1 : Recherche des coefficients du correcteur de l'onduleur	96
5.1.2.2 : Fonctionnement avec le régulateur	97
V.2 : COUPLAGE DE L'ONDULEUR AUX GENERATEURS.....	99
5.2.1. ROLE DU CONDENSATEUR DU NOEUD CONTINU.....	99
5.2.2 CONCLUSION	102
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	105

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1.1 : Synoptique générale de la Microcentrale</i>	7
<i>Figure 1.2 : Modèle d'un générateur photovoltaïque idéal</i>	8
<i>Figure 1.3 : Caractéristiques du générateur photovoltaïque</i>	9
<i>Figure 1.4 : Caractéristiques du générateur photovoltaïque</i>	9
<i>Figure 1.5 : Schéma de principe du générateur photovoltaïque à transfert optimisé</i>	12
<i>Figure 1.6 : schéma du hacheur dévolteur</i>	12
<i>Figure 1.7 : Formes d'onde des grandeurs du hacheur dévolteur</i>	13
<i>Figure 1.8 : Schéma du hacheur survolteur</i>	14
<i>Figure 1.9 : Formes d'onde des signaux du hacheur survolteur</i>	14
<i>Figure 1.10: Schéma de l'onduleur push-pull</i>	17
<i>Figure 1.11 : Onduleur en demi - pont</i>	17
<i>Figure 1.12 : Onduleur en pont complet</i>	18
<i>Figure 1.13 : Schéma d'un Darlington</i>	19
<i>Figure 1.14 : Chronogramme de tension et du courant de sortie</i>	19
<i>Figure 1.15 : Chronogrammes de fonctionnement de la commande décalée ou 120°</i>	21
<i>Figure 1.16 : Représentation schématique de la méthode de la sous - oscillation</i>	22
<i>Figure 1.17 : Principe de fonctionnement de la méthode de la sous - oscillation</i> ...	22
<i>Figure 1.18 : Principe de détermination des instants de commutation</i>	23
<i>Figure 2.1 : Système constitué du générateur et du hacheur dévolteur</i>	25
<i>Figure 2.2 : générateur photovoltaïque sur charge résistive</i>	26
<i>Figure 2.3 : Modèle du générateur photovoltaïque</i>	26
<i>Figure 2.4 : Caractéristiques du générateur photovoltaïque</i>	27
<i>Figure 2.5 : Schéma du hacheur dévolteur</i>	27
<i>Figure 2.6 : Modèle du hacheur dévolteur</i>	28
<i>Figure 2.7 : Séquences de fonctionnement du hacheur dévolteur</i>	28
<i>Figure 2.8 : Modèle du pont interrupteurs</i>	28
<i>Figure 2.9 : Filtre de sortie du hacheur dévolteur</i>	29
<i>Figure 2.10 : Modèle du filtre</i>	29
<i>Figure 2.11 : Modèle de la commande du hacheur dévolteur</i>	30
<i>Figure 2.12 : Référence de la commande</i>	30

Figure 2.13 : Modèle du générateur photovoltaïque et hacheur dévolteur.....	30
Figure 2.14 : Etablissement pour un rapport cyclique de 0.658.....	31
Figure 2.15 : Réponse de la tension V_P du générateur photovoltaïque à une variation du rapport cyclique autour de V_{popt}	32
Figure 2.16 : Modèle du hacheur survolteur.....	33
Figure 2.17 : Hacheur survolteur et Générateur photovoltaïque.....	33
Figure 2.18 : Séquences de fonctionnement du hacheur survolteur.....	34
Figure 2.19 : Modèle du hacheur survolteur : filtre et pont interrupteur.....	34
Figure 2.20 : Modèle du hacheur survolteur alimenté par le générateur photovoltaïque.....	35
Figure 2.21 : Etablissement pour un rapport cyclique optimal du hacheur survolteur.....	35
Figure 2.22 : Réponse autour de V_{popt} la tension V_P du générateur photovoltaïque à une variation du rapport cyclique.....	36
Figure 2.23: L'onduleur monophasé sur charge résistive.....	37
Figure 2.24 : Schéma de l'onduleur avec le modèle de la partie linéaire.....	41
Figure 2.25 : Pont interrupteur de l'onduleur.....	37
Figure 2.26 : Modèle de l'onduleur monophasé sur charge résistive.....	38
Figure 2.27 : Séquences de fonctionnement de l'onduleur.....	39
Figure 2.28: Modèle du pont interrupteur de l'onduleur.....	40
Figure 2.29 : Modèle du filtre de l'onduleur.....	41
Figure 2.30 : Commandes de l'onduleur.....	41
Figure 2.31 : Le transformateur monophasé.....	42
Figure 2.32 : Modèle du transformateur monophasé.....	42
Figure 2.33 : Tension de sortie de l'onduleur de tension.....	43
Figure 2.34 : Tension de sortie de l'onduleur en boucle ouverte après une perturbation de la charge.....	43
Figure 2.35 : Tension de sortie en boucle ouverte lorsque la tension d'entrée est variable.....	44
Figure 3.1 : Générateur Photovoltaïque avec un hacheur dévolteur.....	47
Figure 3.2 : Modèle asymptotique du Générateur photovoltaïque pour le hacheur dévolteur.....	48
Figure 3.3 : Modèle asymptotique du Générateur photovoltaïque pour le hacheur survolteur.....	49
Figure 3.4 : Le hacheur dévolteur.....	51

Figure 3.5 : Première configuration.....	51
Figure 3.6 : Deuxième configuration.....	52
Figure 3.7 : Schéma équivalent moyen du hacheur dévolteur.....	52
figure 3.8 : Modèle par schéma équivalent moyen du hacheur dévolteur	52
Figure 3.9 : Le hacheur survolteur	56
Figure 3.10 : Première configuration	56
Figure 3.11 : Deuxième configuration	57
Figure 3.12 : Schéma équivalent moyen du hacheur survolteur.....	57
Figure 3.13 : Schéma équivalent moyen du hacheur survolteur avec le générateur photovoltaïque	58
Figure 3.14 : Schéma de principe de l'onduleur monophasé.....	59
Figure 3.15 : Première configuration de l'onduleur monophasé.....	60
Figure 3.16 : Deuxième configuration de l'onduleur monophasé.....	60
Figure 3.17 : Troisième configuration de l'onduleur monophasé.....	60
Figure 3.18 : Troisième configuration de l'onduleur monophasé.....	60
Figure 3.19 : Schéma équivalent moyen de l'onduleur monophasé	61
Figure 3.20 : Modèle de l'onduleur pendant une demi alternance	62
Figure 3.21 : Réponse de la tension V_p du générateur photovoltaïque à un échelon de rapport cyclique.....	65
Figure 3.22. Lieu d'Evans du système Hacheur dévolteur et Générateur photovoltaïque	65
Figure 3.23 : Réponse de la tension V_p du générateur photovoltaïque à un échelon de rapport cyclique.....	67
Figure 3.24. Lieu d'Evans du système Hacheur survolteur et Générateur photovoltaïque	67
Figure 4.1 : Pôles dominants.....	71
Figure 4.2 : Organigramme de recherche du correcteur.....	71
Figure 4.3 : Réponse du système suite à une perturbation de la charge	73
Figure 4.4 : Réponse du système suite à une perturbation d'ensoleillement en échelon.....	75
Figure 4.5 : Augmentation relative de la charge de 28 %.....	76
Figure 4.6 : Diminution relative de la charge de 13 %.....	77
Figure 4.7 : Diminution du courant de court - circuit de 2A	77
Figure 4.9 : Diminution du courant de court - circuit de 5A	78
Figure 4.10 : Réponse du système à une augmentation de la charge de 8 %.....	81
Figure 4.11 : Réponse du système à une diminution de la charge de 8 %.....	82

<i>Figure 4.12 : Réponse du système à une diminution de la charge de 15 %</i>	83
<i>Figure 4.13 : Réponse du système à une augmentation de la charge de 15 %</i>	84
<i>Figure 4.14 : Diminution du courant de court-circuit de GPV avec HD de 2 A</i>	86
<i>Figure 4.15 : Diminution du courant de court-circuit de GPV avec HS de 2 A</i>	87
<i>Figure 5.1 : Formes d'ondes des grandeurs de l'onduleur</i>	93
<i>Figure 5.2 : Augmentation relative de la charge de l'onduleur de 35 %</i>	93
<i>Figure 5.3 : Diminution relative de la charge de l'onduleur de 35 %</i>	93
<i>Figure 5.4 : Tension de sortie de l'onduleur après une perturbation de la tension d'entrée</i> ..	95
<i>Figure 5.5 : Elaboration de la référence de la commande de l'onduleur</i>	95
<i>Figure 5.6 : Variation de la tension de sortie suite à une variation sinusoïdale de la tension d'entrée</i>	9
<i>Figure 5.7 : Loi de variation du coefficient proportionnel du correcteur</i>	97
<i>Figure 5.8 : Tension de sortie lorsque la tension d'entrée varie</i>	98
<i>Figure 5.9 : Modèle de la centrale multigénérateurs</i>	99
<i>Figure 5.10: Tensions du système après une diminution de la charge de 18 %</i>	101
<i>Figure 5.11: courants du système après une diminution de la charge de 18 %</i>	101
<i>Figure 5.12: Tensions du système après une augmentation de la charge de 18 %</i>	102

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

Avertissement : Dans la liste ci-après, « resp. » est mis pour « Respectueusement » qui sera utilisé à répétition.

1- ABREVIATIONS

B.F, B.O	: resp. boucle fermée, boucle ouverte
cde_HS, cde_HD	: resp. commande du hacheur survolteur et du hacheur dévolteur
D, D _s , D _p , D _i	: resp. diode, diode en série, diode en parallèle, diode d'indice i
G P V	: générateur photovoltaïque
G P V _{hd}	: G P V alimentant le H D
G P V _{sur}	: G P V alimentant le H S
HD	: hacheur dévolteur
HS	: hacheur survolteur
MLI	: modulation de largeur d'impulsions
P	: correcteur Proportionnel
PI	: correcteur Proportionnel et Intégral
R, L, C	: resp. inductance, résistance, condensateur
ref_HS, ref_HD	: resp. bloc d'élaboration de la référence de la commande du H S et du H D
Réf.	: référence
Tr	: transistor

2- SYMBOLES

$\alpha, \Lambda, \lambda, \gamma, \mathfrak{R}$: rapport cyclique
$\alpha_{opt}, \alpha_{xopt}$: rapport cyclique au point de fonctionnement optimal
ΔI	: ondulation de courant
ΔI_L	: resp. variation du courant dans l'inductance
ΔU	: ondulation de tension
δ	: partie réelle d'un pôle ou d'un zéro
ψ	: déphasage
τ	: constante de temps
ζ	: facteur de forme de la caractéristique du générateur photovoltaïque
ω	: pulsation
ω_o	: pulsation propre
ω_n	: pulsation naturelle
A	: matrice d'état d'un système
B	: matrice d'entrée d'un système
C	: matrice de sortie d'un système
C_s, C_d	: condensateur du filtre resp. du hacheur survolteur, du hacheur dévolteur
C_{ps}, C_{pd}	: Condensateur du filtre du g p v alimentant resp. du h s, du h d
C_{hs}	: condensateur du filtre du hacheur survolteur
C_{hd}	: condensateur du filtre du hacheur dévolteur
C_e, C_s	: resp. condensateur d'entrée, condensateur de sortie
D	: matrice de passage d'un système
F, F ₀	: fréquence
i, v	: resp. courant variable, tension variable
I, V	: resp. Courant continu, tension continue
I_D	: courant dans la diode
I_L, i_L	: courant dans la bobine resp. continu, variable
I_M	: courant maximum

I_{os}, I_{oe}	: resp. courant de sortie et d'entrée de l'onduleur
I_p, i_p	: courant du générateur photovoltaïque resp. continu, variable
I_{po}	: courant du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement
I_{pd}, I_{ps}	: courant du g p v alimentant resp. le h d et le h s
I_{pop}, I_{opt}	: courant du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement optimal
I_s, i_s	: courant de sortie resp. continu, variable
K_p	: gain proportionnel
K_i	: gain intégral
L_s, L_d	: Inductance du filtre resp. du hacheur survolteur, du hacheur dévolteur
m, k	: rapport de transformation du transformateur
m_1	: indice de modulation
n_1	: nombre de spires au primaire
n_2	: nombre de spires au secondaire
P	: puissance
p	: puissance instantanée, pôle d'un système
r	: coefficient de réglage
R_c, R_L	: résistance de charge
R_{chs}, R_{chd}	: résistance de charge du hacheur resp. survolteur, dévolteur
R_{opt}	: résistance donnant le point de fonctionnement optimal
s	: opérateur de Laplace
T, T_0	: période
t	: temps
V_D, v_D	: tension aux bornes d'une diode resp. continue, variable
V_e, v_e	: tension d'entrée resp. continue, variable
V_m	: amplitude du signal sinusoïdal
V_o	: tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque
V_o	: tension au point de fonctionnement
V_{os}, V_{oe}	: resp. tension de sortie et d'entrée de l'onduleur
V_{pd}, V_{ps}	: resp. tension du g p v alimentant resp. le h d et le h s
V_p	: tension du générateur photovoltaïque
V_{po}	: tension du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement
V_{pop}, V_{opt}	: tension du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement optimal
V_s, v_s	: tension de sortie resp. continue, variable
V_{sc}	: amplitude du signal en dent de scie.
V_T	: tension aux bornes du transistor
z	: zéro d'un système

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les énergies renouvelables apparaissent de nos jours comme une des solutions aux problèmes d'énergie des pays en voie de développement. Leur compétitivité dans les zones à accès difficiles non connectées au réseau électrique a été décrite par plusieurs auteurs et démontrée par la pratique sur le terrain [1].

Pour un pays comme le Sénégal, la satisfaction des besoins énergétiques est presque exclusivement dépendante des importations de pétrole.

D'autre part, l'importance de la consommation de combustible ligneux conduit à la surexploitation des réserves forestières naturelles, déjà fortement dégradées par les phénomènes structurels et conjoncturels : besoins en terres agricoles, permanence des méthodes culturales désormais non adaptées, surpâturage, sécheresse.

Ces différents facteurs imposent aujourd'hui la poursuite des efforts de redéploiement énergétique pour assurer la diversification des sources d'énergie.

Aujourd'hui, face aux multiples difficultés que rencontrent les sociétés nationales de distribution d'énergie électrique, l'utilisation de générateurs à énergie renouvelable en milieu urbain ou dans les zones desservies par le réseau de distribution, permet de palier les insuffisances de la production d'énergie électrique.

La solution classique du groupe électrogène peut être envisagée lorsque la puissance à installer dépasse les 10 kVA. En dessous de cette valeur et surtout pour la satisfaction des besoins de l'éclairage et des appareils audiovisuels, l'énergie solaire photovoltaïque reste très compétitive.

Pour contourner la difficulté liée au coût élevé de l'investissement, la solution est à l'installation modulaire du générateur en fonction des moyens du moment. Dès lors, dans les zones où le réseau existe déjà, l'acquéreur du générateur doit-il réaliser un réseau annexe ou coupler son générateur au réseau.

La première solution est simple à réaliser mais dès qu'il y a un excédent d'énergie au niveau du générateur, il n'y a pas de possibilité de la consommer. Il s'avère alors important de

fournir cette énergie à d'autres consommateurs par l'intermédiaire du réseau de distribution. L'excédent d'énergie sera injecté dans le réseau et permettra au propriétaire, au besoin, de faire des compensations avec la société de distribution.

Une vulgarisation des énergies renouvelables passe nécessairement par son utilisation en milieu urbain ou dans les zones où existe déjà le réseau. Dans le but de maîtriser cette technique, et aussi de profiter des avantages de cette deuxième solution, nous avons cherché à étudier les possibilités de couplage du générateur photovoltaïque avec le réseau de distribution de l'énergie électrique. Cela contribue également aux travaux déjà réalisés pour le développement d'une microcentrale multigénérateurs éolien et photovoltaïque au niveau du Laboratoire des Energies Renouvelables de l'Ecole Supérieure Polytechnique (E.S.P.), au sein de son groupe de recherche E³PIA.

De plus, le couplage de générateurs photovoltaïques avec le réseau, s'il est maîtrisé permettra d'élargir significativement le marché des énergies renouvelables. Ainsi, une baisse substantielle du coût de l'investissement peut être envisagée dans les 20 premières années du XXI^{ème} siècle [2].

Le travail que nous présentons est une simulation à la suite d'une modélisation de cette microcentrale multigénérateurs sans stockage électrochimique. Il se pose dès lors le problème de la stabilité du système. En effet, l'interaction entre les différents générateurs est plus complexe lorsqu'il n'y a pas d'accumulateurs pour stabiliser la tension au niveau du nœud continu d'interconnexion. Le couplage est alors réalisé par un filtre capacitif ce qui introduit au moins un degré d'instabilité. Au niveau des convertisseurs, leur fonctionnement en commutation impose l'utilisation de filtre à leur sortie.

Le couplage de ces différentes sources d'énergie finie avec le réseau (source infinie) se fait par l'intermédiaire de convertisseurs statiques et pose des problèmes de stabilité [3]. Ces problèmes de stabilité s'accroissent avec le nombre de filtres capacitif ou inductif à insérer dans la chaîne énergétique. La gestion de l'échange d'énergies entre les différentes sources est très complexe car le bilan énergétique instantané entre sources et charges doit toujours être équilibré.

Tous ces problèmes nécessitent une étude de la stabilité du système afin de déterminer les dispositifs de compensation et de régulation à insérer pour un bon fonctionnement. Pour ce

faire, nous allons utiliser les moyens de l'automatique pour étudier le lieu des pôles et déterminer les régulateurs nécessaires.

Pour valider ces fonctionnements optimisés de cet ensemble, il est nécessaire de déterminer un modèle que nous simulerons de manière numérique. La simulation numérique est un moyen très puissant pour vérifier la validité de la conception d'un système automatique et du dimensionnement de son système de réglage [4]. Elle nous permet le calcul de l'allure temporelle des phénomènes transitoires sur ordinateur afin d'analyser le comportement des différents éléments du système ainsi que l'influence des éléments structurels sur le comportement global du système..

Dans ce rapport, nous présentons dans un premier temps le système à étudier. Cette partie est une mise en place de modèles permettant de simuler le fonctionnement réel du système. Les résultats permettront de déterminer les points de fonctionnement autour desquels nous étudierons les variations de grandeurs afin de déterminer les modèles par schéma équivalent moyen des différents constituants de la centrale.

Ces modèles par schéma équivalent moyen étudiés et déterminés au chapitre trois devront permettre une détermination systématique et de manière plus aisée les correcteurs nécessaires à la régulation du système.

Au chapitre quatre, nous étudions l'optimisation du transfert d'énergie des générateurs au noeud continu. Cette optimisation nécessite un fonctionnement du système en boucle fermée ce qui constitue le noeud de cette partie. Les résultats de ce chapitre introduiront l'étude du couplage de l'onduleur au noeud continu.

Nous présentons au dernier chapitre l'étude de la faisabilité du couplage du noeud continu par un condensateur plutôt que par des batteries électrochimiques.

Les systèmes d'alimentation autonome à énergies renouvelable ont besoin d'un système de stockage pour subvenir aux besoins de la charge aux moments de faible ensoleillement ou pour stabiliser le fonctionnement du système. De nos jours, ces systèmes sont essentiellement constitués d'accumulateurs au plomb avec de l'acide [5].

Une unité de stockage constitue dans un système photovoltaïque un des maillons faibles. Elle contribue à réduire les performances du système [6]. La technique pour la réalisation de l'égalisation et la gestion des cycles de charge et de décharge tout en équilibrant la

température, n'est pas aisée. Dans la plupart des installations, ces contraintes ne sont pas tenues en compte. Une bonne gestion de l'état de charge des batteries nécessite une mesure de la tension, du courant et de la température des batteries.

Aussi, nous avons voulu chercher à réaliser le couplage du noeud continu par un condensateur lorsque le système peut être connecté au réseau de distribution. Le dernier chapitre nous permettra d'étudier la possibilité de ce couplage. Il s'agit d'étudier la stabilité de fonctionnement avec un tel couplage.

Nous terminerons en dégagant les conclusions de cette étude. Des perspectives seront aussi présentées.

CHAPITRE I

PRESENTATION ET DESCRIPTION DU DISPOSITIF

CHAPITRE I-

PRÉSENTATION ET DESCRIPTION DU SYSTÈME

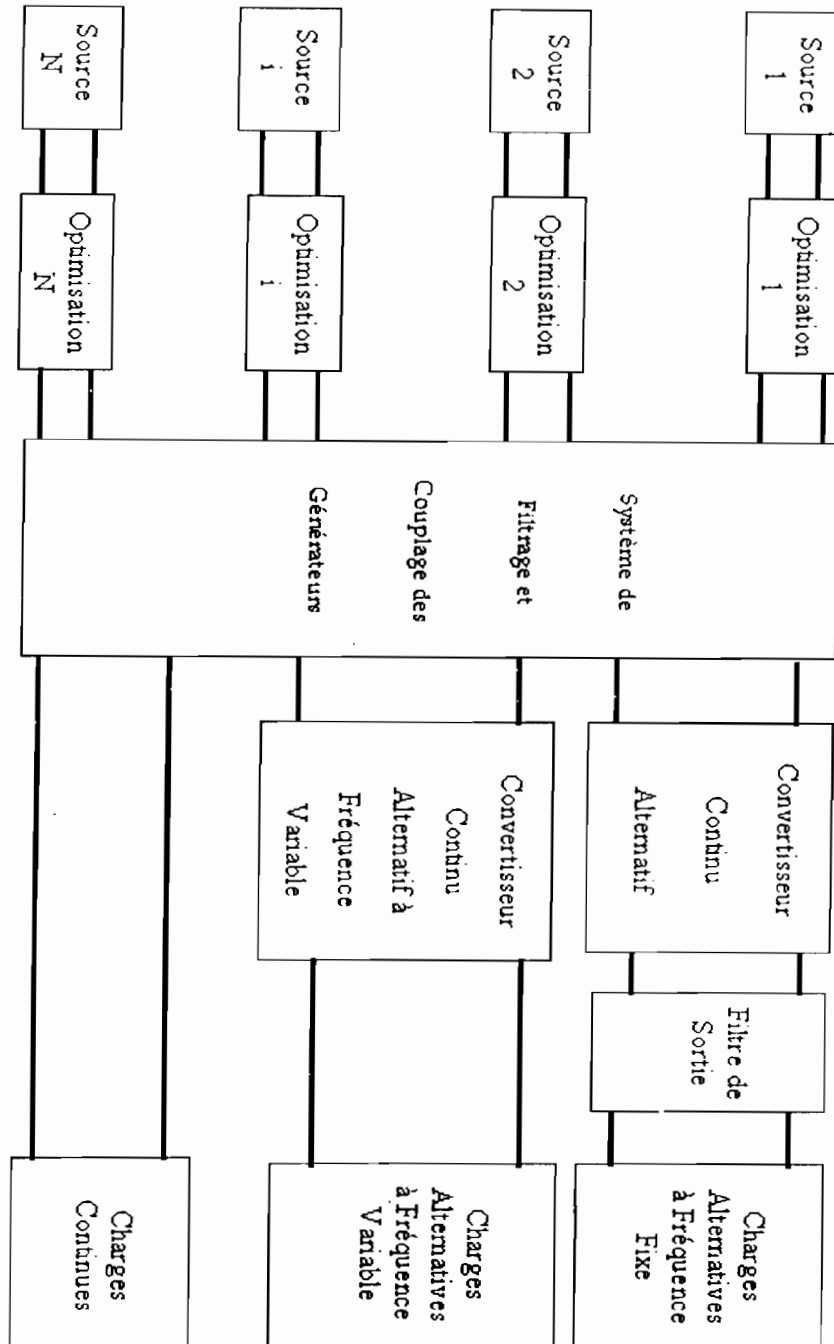


Figure 1.1 : Synoptique générale de la Microcentrale

Le système dont une partie fait l'objet de notre étude se compose d'un ensemble de générateurs à énergie renouvelable, alimentant des charges continues ou alternatives.

Lorsqu'il s'agit de charges alternatives, des systèmes de conversion continu - alternatif sont alors insérés entre les charges et les sources. De plus il faut aussi insérer des filtres à l'entrée comme à la sortie de ces convertisseurs (Figure 1.1).

La microcentrale comprendra plusieurs générateurs qui peuvent être de type différent. Les charges aussi sont des systèmes classiques et peuvent être à courant continu ou alternatif.

Pour permettre leur inter-couplage, les sorties des différents générateurs devront être du point de vue tension, compatibles. Cette compatibilité des grandeurs est réalisée grâce à l'insertion de hacheurs dévolteurs ou / et survolteurs, suivant les caractéristiques du système, à la sortie des générateurs.

1.1 LE GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Il est constitué d'un ensemble de modules couplés en série et en parallèle pour fournir une tension et un courant donnés. La tension de couplage des modules est la tension de circuit ouvert V_0 et l'ensoleillement fixe le courant de court-circuit I_{CC} . Ce courant varie au cours de la journée et constitue donc un paramètre de la caractéristique du générateur photovoltaïque.

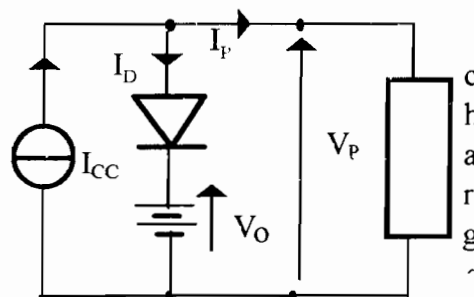


Figure 1.2 : Modèle d'un générateur photovoltaïque idéal

Caractéristique $I_P(V_P)$ d'un générateur photovoltaïque réel

Le courant que fournit la cellule est donné par la formule :

$$I_P = I_{CC} \left(1 - \exp \left[\chi \left(\frac{V_P}{V_0} - 1 \right) \right] \right)$$

χ : facteur de forme de la caractéristique

I_P : courant du générateur photovoltaïque

V_P : tension du générateur photovoltaïque

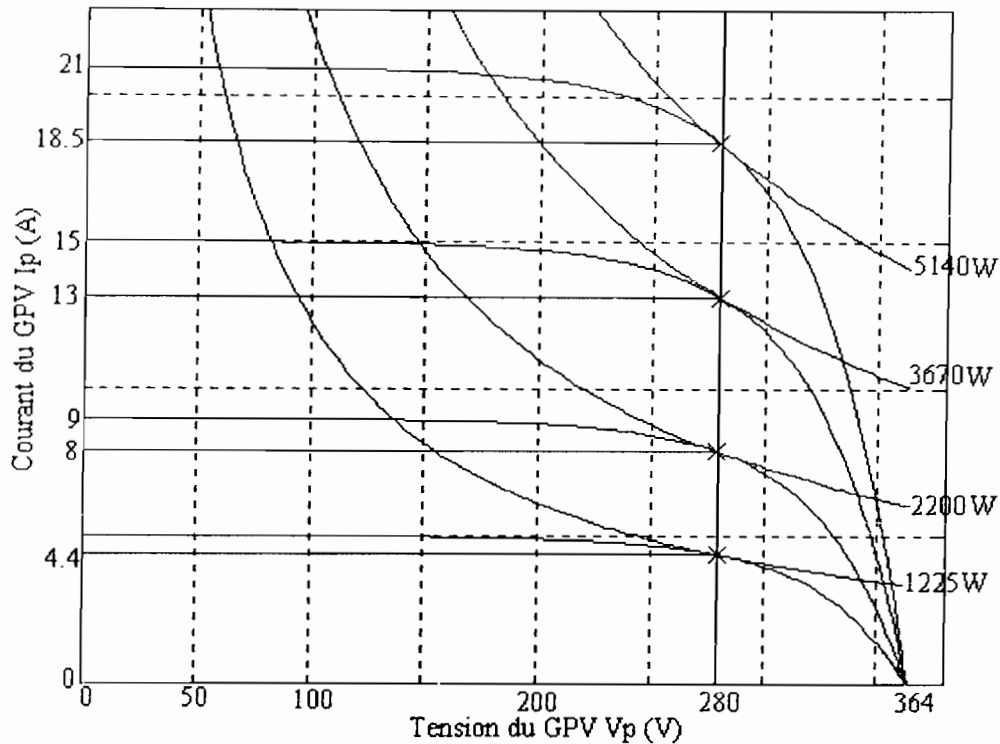


Figure 1.3 : Caractéristiques du générateur photovoltaïque

Cette caractéristique du modèle est tracée, sur la figure 1.3, en fonction de l'ensoleillement. Nous y avons aussi représenté les courbes d'équipuissance.

Cette caractéristique présente trois zones distinctes de fonctionnement (Figure 1.4.a) :

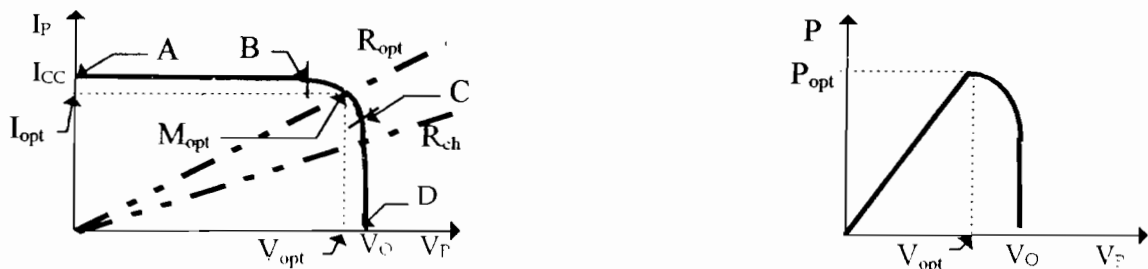


Figure 1.4.a) Courant fonction de la tension Figure 1.4.b) Puissance fonction de la tension

Figure 1.4 : Caractéristiques du générateur photovoltaïque

Zone AB : le courant I_p varie très peu avec la tension, le courant peut être considéré comme constant et la tension variable. La cellule se comporte donc comme une source de courant.

Zone CD : la tension varie très peu avec le courant. La cellule se comporte comme une source de tension.

Zone BC : la tension et le courant varient fortement. Nous n'avons ni une source de tension, ni une source de courant.

Lorsque nous connectons une charge R_{ch} au générateur photovoltaïque, nous pouvons tracer sur cette caractéristique les droites de charge en fonction de la résistance de charge R_{ch} . L'intersection de cette droite de charge avec la caractéristique détermine le point de

fonctionnement. La puissance électrique délivrée par le générateur photovoltaïque dépend du point de fonctionnement et passe par un maximum pour un point $M_{\text{pop}} (V_{\text{pop}}, I_{\text{pop}})$ donné. Le générateur photovoltaïque délivre donc sa puissance maximale si le point de fonctionnement est au point M_{pop} . Ce point optimal ne peut être obtenu, pour une charge quelconque, que grâce à une adaptation de la charge vue par le générateur photovoltaïque. Le point de fonctionnement optimal se trouve dans le coude de la caractéristique du générateur photovoltaïque.

Ce fait constitue une difficulté dans l'étude que nous allons mener. Aussi, chercherons-nous un modèle linéaire par morceau. Ce modèle est le modèle asymptotique qui est une approximation de la courbe réelle par des droites, le nombre de droites dépendant de la précision souhaitée.

1.2 LE SYSTEME D'OPTIMISATION DU TRANSFERT D'ENERGIE

Il est composé de convertisseurs statiques réalisant la conversion continu - continu et de filtres pour la tension et le courant de sortie de ces convertisseurs. La modification des grandeurs continues est réalisée par un hacheur.

Suivant les amplitudes des grandeurs d'entrée et de sortie du hacheur, nous utiliserons deux types de ces convertisseurs :

- * Hacheur dévolteur qui permet d'abaisser la tension d'entrée au niveau de la sortie ;
- * Hacheur survolteur qui permet d'élever la tension de d'entrée lorsqu'elle est inférieure à la tension de sortie.

Le fonctionnement des hacheurs est basé sur la commutation forcée du courant entre deux voies. La durée de cette commutation dépendra beaucoup de l'inductance qui est sur les branches des interrupteurs [7]. Nous travaillerons à des fréquences élevées pour arriver à réduire l'encombrement des inductances.

La commutation du courant entraîne alors des connexions entre circuits d'où la nécessité de suivre certaines règles pour un bon fonctionnement du hacheur.

1.2.1 REGLES DE CONNEXION

Les circuits que nous utilisons sont constitués en général d'inductances, de condensateurs pour réaliser le filtrage des signaux.

Une inductance joue le rôle d'une source de courant en instantané. Le courant ne peut subir de discontinuité dans une inductance. Il est alors une variable d'état du circuit.

Un condensateur joue le rôle d'une source de tension en instantanée car la différence de potentiel à ses bornes ne peut subir de discontinuité. La tension aux bornes d'un condensateur est aussi une variable d'état du système.

Le fonctionnement du convertisseur statique doit donc respecter ces conditions de continuité du courant dans une bobine et de la tension aux bornes d'une capacité.

D'autres règles seront aussi respectées par le fonctionnement du hacheur notamment :

- une source de tension ne peut être mise en court-circuit et ne doit non plus être connectée directement à une autre source de tension.
- une source de courant ne peut être mise en circuit ouvert et ne doit non plus être connectée directement à une autre source de courant.

Ces règles vont conduire à des séquences de fonctionnement qui seront utilisées pour la modélisation par schéma équivalent moyen des hacheurs.

1.2.2 LE HACHEUR DEVOLTEUR

C'est un hacheur à liaison directe ne nécessitant aucun élément de stockage d'énergie entre la source et le récepteur. Nous l'utilisons pour réduire la valeur moyenne de la tension d'entrée au niveau de la sortie. En régime permanent ces deux grandeurs sont dans un rapport

$$\alpha \text{ tel que } \alpha = \frac{V_s}{V_e} \text{ ou } \alpha = \frac{I_e}{I_s} \text{ et que } 0 \leq \alpha \leq 1.$$

L'objectif visé ainsi est donc, en agissant sur le rapport cyclique, arriver à adapter la charge vue par le générateur photovoltaïque à la charge optimale. Le principe de fonctionnement des hacheurs est basé sur la fermeture de l'interrupteur principal pendant une durée de la période et de son ouverture pendant l'autre partie de la période.

Le travail dans cette partie consiste donc à déterminer la commande des interrupteurs pour obtenir à chaque instant le transfert maximum d'énergie du générateur photovoltaïque à la charge. Il s'agira alors de réaliser un asservissement de la tension de sortie du générateur photovoltaïque à la tension optimale V_{popt} en fonction de l'éclairement (Figure 1.5).

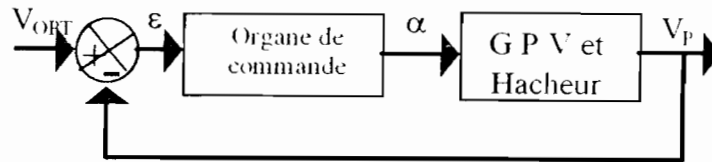


Figure 1.5 : Schéma de principe du générateur photovoltaïque à transfert optimisé

Cet objectif ne peut être atteint facilement que si le système peut être représenté par un modèle mathématique pour lequel on pourra étudier ses performances et éventuellement les améliorer par des correcteurs

1.2.2.1 Constitution.

Il se compose d'un interrupteur principal commandable à l'amorçage et au blocage (Transistor) et d'un interrupteur pour la roue libre constitué d'une diode. Le transistor reçoit la commande qui impose le rapport cyclique α . Ce pont interrupteur est suivi d'un filtre L-C avant la charge (Figure 1.6).

Le filtre utilisé n'étant pas parfait, il permet de réduire les ondulations de tension et de courant. Nous obtenons les formes d'onde de la figure 1.7.b.

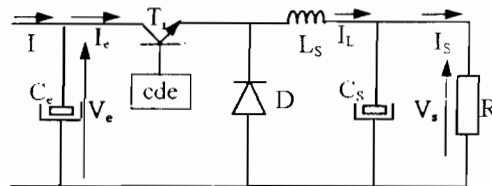


Figure 1.6 : schéma du hacheur dévolteur

La source à l'entrée doit se comporter comme un générateur de tension. Pour ce faire, nous intercalons entre le hacheur et la source, un condensateur C_e .

Ce système se justifie d'autant plus que le générateur photovoltaïque a un comportement variable en fonction de la tension. Pour lui conférer un comportement de source de tension, nous plaçons à sa sortie une capacité qui permet ainsi de réduire les variations de la tension.

1.2.2.2 Fonctionnement réel du hacheur dévolteur

Un fonctionnement avec les éléments composant le hacheur donne des formes rectangulaires aux signaux tension et courant (Figure 1.7.a).

Cependant le récepteur qui est équivalent à une source de courant ne peut avoir une inductance infinie. Cette imperfection de l'inductance entraîne une ondulation du courant non

nulle dans la charge. Il s'avère donc nécessaire de mettre à la sortie un filtre pour réduire ces ondulations à un taux souhaité.

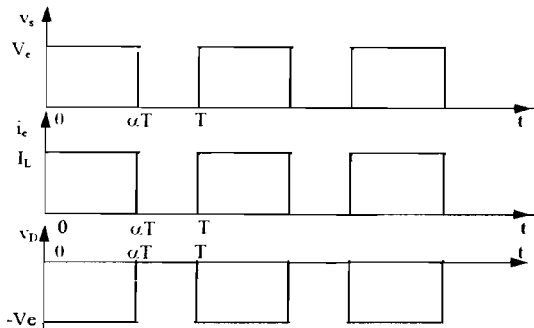


Figure 1.7.a : Fonctionnement idéal

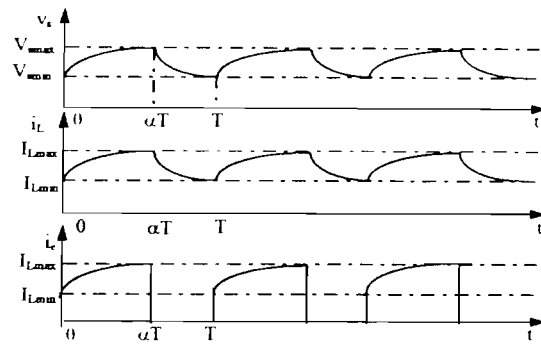


Figure 1.7.b : Fonctionnement réel

Figure 1.7 : Formes d'onde des grandeurs du hacheur dévolteur

A la valeur donnée de la puissance P et de la tension U de sortie, correspond une résistance R_C et cela permet de déterminer l'ondulation maximale en fonction des éléments du circuit. En effet, l'ondulation est maximale pour un rapport cyclique égal à $1/2$. Si T est la période du signal de modulation, nous aurons $\Delta I_{L\max} = \frac{I_{L\max} T}{4R_c C}$ et $\Delta V_{s\max} = \frac{\Delta I_{L\max} T}{8C}$.

Ces deux expressions sont utilisées pour déterminer les valeurs des éléments du filtre de sortie du hacheur.

A l'entrée du hacheur, nous avons aussi placé un filtre capacitif pour découpler le fonctionnement instantané du convertisseur statique et le générateur photovoltaïque. Cette association générateur photovoltaïque, condensateur et convertisseur statique a un fonctionnement de type source de tension en instantané.

1.2.3 LE HACHEUR SURVOLTEUR

La tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

Comme le hacheur dévolteur, il permet d'adapter la tension d'un récepteur à la tension d'un générateur lorsque cette dernière est plus faible.

Son principe de fonctionnement est basé sur la fermeture et l'ouverture des interrupteurs le composant.

1.2.3.1 Constitution.

Il se compose d'un interrupteur à amorçage et blocage commandés T_r (transistor) et d'un interrupteur secondaire D (diode) (Figure 1.8).

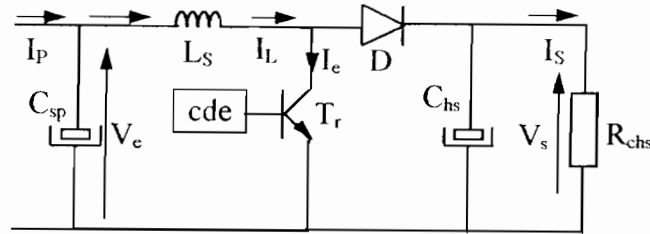


Figure 1.8 : Schéma du hacheur survolteur

Si nous notons αT la durée de fermeture de T_r et $(1-\alpha)T$ la durée d'ouverture, nous pouvons écrire le rapport de la tension de sortie à la tension d'entrée par $\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha}$ ou aussi

$$\frac{I_L}{I_S} = \frac{1}{1-\alpha}$$

1.2.3.2 Fonctionnement du hacheur survolteur

Son principe de fonctionnement est similaire à celui du hacheur dévolteur et les mêmes remarques sur la correction des formes d'onde à l'entrée comme à la sortie sont nécessaires.

Les formes d'onde du fonctionnement réel sont données sur la figure 1.9.

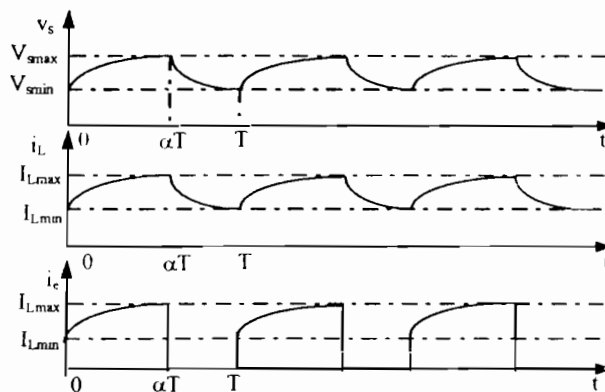


Figure 1.9 : Formes d'onde des signaux du hacheur survolteur

I.3 LE SYSTEME DE CONVERSION CONTINU - ALTERNATIF

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui établissent un échange d'énergie électrique entre deux sources à caractéristiques respectivement continue et alternative.

Il est constitué d'un assemblage d'interrupteurs statiques. Il agit, grâce à une commande appropriée, sur la forme du vecteur "tension - courant".

L'objectif est de créer à partir d'une source d'entrée de tension continue V_0 ou de courant continu I_0 une source de tension u alternative ou de courant i alternatif de période T_0 (fréquence f_0) et à valeur efficace de la composante fondamentale U_1 ou I_1 réglable.

En effet, pour le couplage avec le réseau, il nous faut rendre compatible l'énergie continue délivrée par le générateur photovoltaïque à l'énergie alternative sinusoïdale du réseau de distribution.

Les grandeurs alternatives u et i ainsi élaborées ne peuvent prendre qu'un nombre restreint de valeurs discrètes, proportionnelles respectivement à V_0 et I_0 , séparées par des discontinuités dont la position dans une période est choisie pour conférer à leur spectre d'amplitude des propriétés de qualité souhaitée [8].

L'onduleur est constitué de deux parties essentielles pour son fonctionnement :

- la partie commande : c'est l'électronique "petits signaux" qui permet de fixer les caractéristiques de la partie puissance. Elle peut être très simple (alimentation sous onde rectangulaire) mais aussi très complexe (obtention d'une onde sinusoïdale) lorsqu'il s'agit d'alimenter des appareils très sensibles aux harmoniques des ondes. Toutes ces performances sont obtenues grâce aux progrès sur les semi-conducteurs de puissance.

- la partie puissance ou électronique des courants forts : il s'agit de modifier les ondes des signaux de puissance très élevées par le jeu de commutations. Il y a donc nécessité de maîtriser l'ouverture et la fermeture des circuits de courants. Cette partie dépend fortement de la commande. Les performances souhaitées (suppression d'harmoniques, onde sinusoïdale, etc.) sont imposées par la commande.

Les convertisseurs "continu - alternatif", appelés aussi onduleurs peuvent être :

- assistés ou résonants : ils sont alors reliés au réseau ou à une charge qui lui impose sa fréquence de fonctionnement
- autonomes : ils fonctionnent à commutation forcée ; c'est la commande des interrupteurs qui impose la fréquence des grandeurs alternatives. Ils dépendent de la nature de la source et du récepteur entre lesquels il est monté.

C'est ce premier type d'onduleur que nous utiliserons pour le couplage avec le réseau.

1.3.1 LES ONDULEURS MONOPHASES AUTONOMES

Deux types d'onduleurs seront utilisés dans la réalisation de la centrale. Ce sont l'onduleur monophasé en tension et l'onduleur de courant ou commutateur de courant.

- l'onduleur monophasé en tension qui est alimenté par une source de tension continue, c'est-à-dire par une source d'impédance interne négligeable dont la tension U n'est pas affectée par

les variations du courant I qui la traverse [7]. Il existe trois types d'onduleur monophasé : l'onduleur monophasé avec transformateur à point milieu, l'onduleur à pont capacitif et l'onduleur à pont complet.

- l'onduleur de courant sera utilisé pour le couplage avec le réseau. En effet, il se prête plus aisément à une commande par le réseau car étant un onduleur assisté.

1.3.1.1 L'onduleur monophasé avec transformateur à point milieu

Il comprend deux interrupteurs à commandes complémentées pour éviter la mise en court-circuit de la source de tension ou l'ouverture du circuit de courant, mais nécessitent un transformateur à point milieu (Figure 1.10.a). Les interrupteurs sont bidirectionnels en courant et sont composés d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

La tension à la sortie est formée de créneaux ce qui correspond au fondamental et aux harmoniques impairs de son développement en série de Fourier si l'entrée est constituée d'une source de tension continue constante et le courant de sortie sinusoïdal (Figure 1.10.b).

L'onduleur à transformateur à point milieu est le plus souvent utilisé lorsque la tension d'entrée n'est pas très importante [7]. Il permet d'élever la tension de sortie.

La tension de sortie contient tous les harmoniques impairs en plus du fondamental.

$$v_s = \frac{4}{\pi} \frac{2n_2}{n_1} V_e \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right)$$

Ceci sera très gênant pour le filtrage de cette onde.

1.3.1.2 L'onduleur monophasé en demi - pont

Il est constitué de deux interrupteurs à semi-conducteurs et d'un pont capacitif à l'entrée de l'onduleur (Figure 1.11.a). Les interrupteurs doivent avoir une commande complémentaire. Pour des tensions d'entrée importantes et un courant faible, il est alors plus indiqué, car la réalisation du diviseur capacitif est moins onéreuse.

Il permet de « doubler » le courant d'entrée (Figure 1.11.b).

1.3.1.3 L'onduleur monophasé en pont

Il comprend quatre interrupteurs électroniques commandés. Cette commande doit permettre d'éviter la mise en court-circuit de la source de tension et aussi l'ouverture de la source de courant. Aussi, les interrupteurs K_1 et K'_1 ont des commandes complémentées, il en est de même des interrupteurs K_2 et K'_2 .

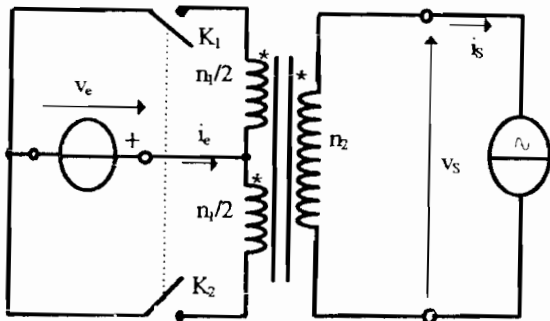


Figure 1.10.a : Structure de l'onduleur

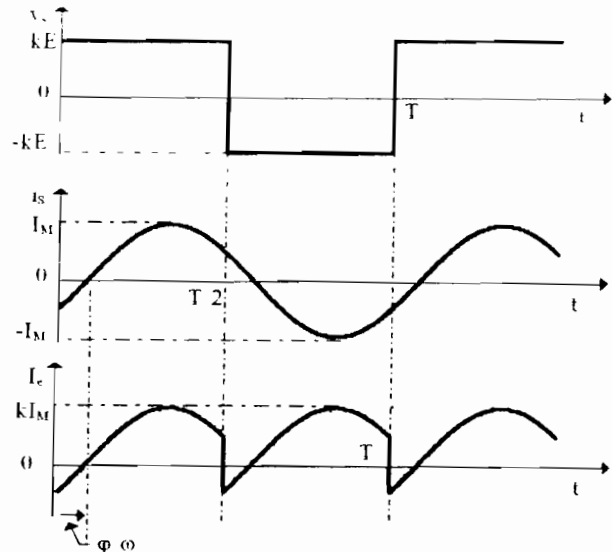


Figure 1.10.b : Formes d'ondes des signaux

Figure 1.10 : Schéma de l'onduleur push-pull

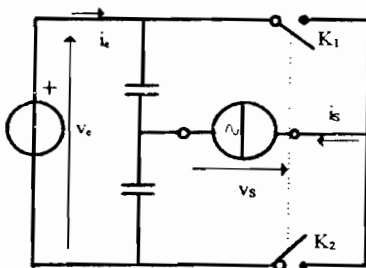


Figure 1.11.a : Structure de l'onduleur

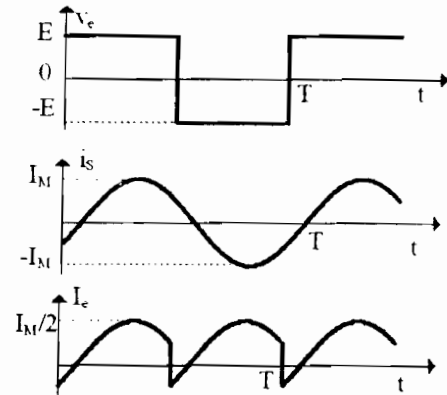


Figure 1.11.b : Formes d'ondes des signaux

Figure 1.11 : Onduleur en demi - pont

La commande d'interrupteurs des deux branches du pont peut ne pas être forcément simultanée. Un décalage de la commande des deux jeux d'interrupteurs fait apparaître un intervalle où la tension est nulle ce qui n'existe pas pour les onduleurs à deux interrupteurs. Cette structure offre des possibilités de commande très intéressantes et qui sont utilisées pour réaliser des ondes de sortie se rapprochant davantage de la sinusoïde.

C'est cette structure d'onduleur qui sera principalement utilisée pour réaliser l'alimentation des charges alternatives de la microcentrale.

La synthèse des interrupteurs de l'onduleur donne le schéma de la figure 1.12.a.

1.3.1.3.1 Les interrupteurs électroniques

Chaque interrupteur constitue une cellule de commutation et est composé d'un interrupteur à amorçage et blocage commandés et d'une diode en antiparallèle [9]. Cette configuration de l'interrupteur lui permet d'être bidirectionnel en courant (Figure 1.12.b).

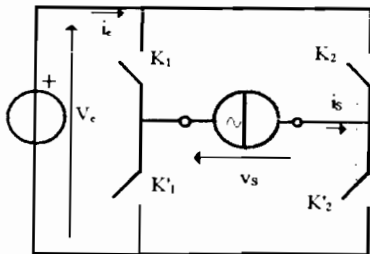
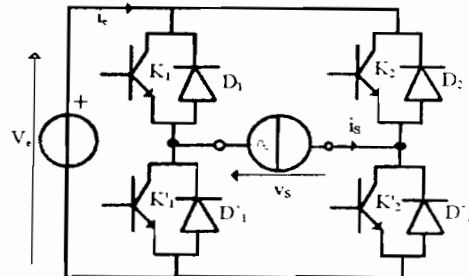


Figure 1.12.a : Schéma de principe



b : Schéma structurel avec les interrupteurs

Figure 1.12 : Onduleur en pont complet

Les qualités demandées à la cellule de commutation sont :

- faibles pertes de commutation,
- chute de tension directe faible de même que le courant de fuite à l'état bloqué,
- temps de commutation courts,
- haute tenue à l'échauffement (montage et refroidissement aisés).

De ces qualités dépendent la fiabilité et le rendement du convertisseur, d'où l'importance du choix du type d'interrupteur. Les principaux interrupteurs sont :

- les transistors de puissance bipolaires qui présentent l'inconvénient d'avoir une amplification en courant assez faible d'où son utilisation dans des montages Darlington (Figure 1.13.a). Son circuit de commande est complexe ;
- les transistors de puissance unipolaires MOSFET (Figure 1.13.b) avec sa cellule de protection comprenant une diode série D_s neutralisant l'action de la diode parasite D_i , une diode roue libre D_p . La haute impédance d'entrée permet une commande simplifiée ;
- Le transistor IGBT : « Insulated Gate Bipolar Transistor » (Figure 1.13.c) qui possède lui - aussi une haute impédance d'entrée (donc commande simplifiée) alliée à une tension de blocage élevée comme le transistor bipolaire et un temps d'amorçage très court ;
- Le thyristor à blocage commandé GTO « Gate Turn Off » (Figure 1.13.d) réservé spécialement aux entraînements de très grande puissance (plusieurs MW) ;
- Les thyristors à grille de commande MOS qui sont des composants modernes aussi rapides que l'IGBT avec l'avantage d'une chute de tension directe faible [10].

1.3.1.3.2 La commande des interrupteurs

Plusieurs types de commande s'offrent à nous pour réaliser la conversion "continu - alternatif". Cependant nous cherchons à approcher une onde sinusoïdale à la sortie de l'onduleur.

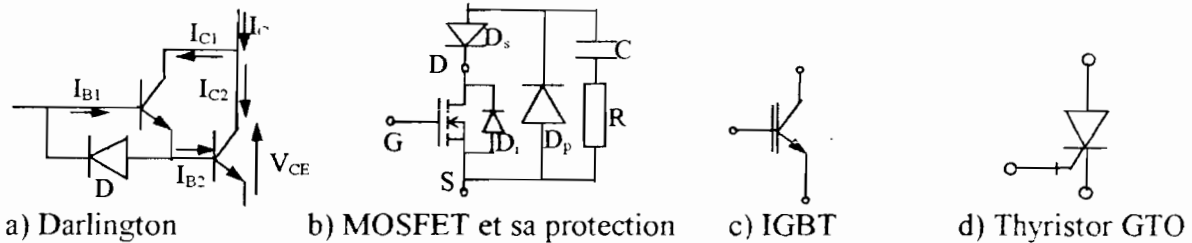


Figure 1.13 : Schéma d'un Darlington

Commande adjacente ou commande 180 °

Les interrupteurs sont commandés pendant une demi - période en conduction.

Lorsque K_1 et K'_2 conduisent, la tension v_s est égale à la tension V_e et $I_e = i_s$.

Lorsque le courant dans ces deux transistors s'annule pour changer de sens, les transistors se bloquent et les diodes D'_1 et D_2 assurent la phase de récupération d'énergie. A cet instant la tension v_s est égale à $-V_e$. Dès que le courant s'annule dans les diodes et tend à changer de sens, K_2 et K'_1 se mettent à conduire.

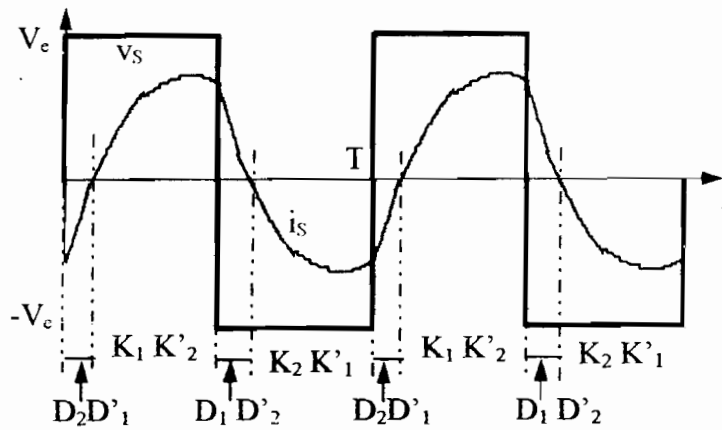


Figure 1.14 : Chronogramme de tension et du courant de sortie

La tension moyenne et efficace aux bornes de la charge est de la forme :

$$V_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T v_s(t) dt = 0 \text{ et } V_{seff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v_s(t)]^2 dt} = V_e$$

Le courant i_s varie avec une forme exponentielle lorsque la charge est une source de courant constituée d'une bobine L sur une charge résistive R , nous avons l'expression :

$$v_s(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t)$$

Commande décalée ou commande 120°

Les interrupteurs K_1 et K'_2 ne sont plus commandés en même temps, mais débutent leur conduction avec un décalage de 60° . Il en est de même des interrupteurs K_2 et K'_1 .

Le fonctionnement de l'onduleur est donné sur la figure 1.15.

En supposant une conduction continue de la charge, nous pouvons déterminer les expressions de certaines grandeurs.

La tension efficace V_{seff} est donnée par $V_{\text{seff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v_s(t)]^2 dt}$ avec

$$v_s = \begin{cases} V_e & \text{pour } t_1 \leq t \leq t_2 \\ -V_e & \text{pour } t_3 \leq t \leq t_4 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

$$V_{\text{seff}} = V_e \sqrt{1 - \frac{2\gamma}{T}}$$

Pour le développement en série de Fourier, en prenant l'origine des temps en $t_2 + \gamma/2$, nous avons une fonction impaire et les coefficients du développement deviennent :

$$b_{nf} = \frac{2V_e}{n\pi} \left(-\cos n\pi + \cos \frac{n\gamma\omega}{2} \right)$$

et l'expression du fondamental est donnée par

$$V_{s1} = \frac{2V_e}{\pi} \left(1 + \cos \frac{\gamma\omega}{2} \right) \sin \omega t$$

De la même manière, on détermine la valeur maximale I_{s0} du courant de sortie pour une conduction continue de la charge.

$$I_{s0} = \frac{V_e}{R_C} * \frac{1 - \exp\left(-\frac{T-2\gamma}{2\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}$$

Le décalage γ intervient dans les expressions des grandeurs tension et courant, d'où une possibilité de commande avec γ .

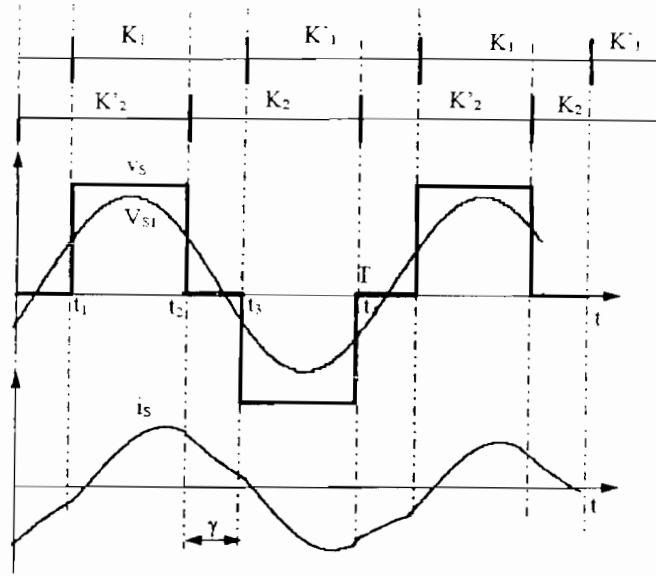


Figure 1.15 : Chronogrammes de fonctionnement de la commande décalée ou 120°

1.3.2 L'ONDULEUR A COMMANDE MODULEE

Pour les besoins de la microcentrale, l'onduleur à utiliser sera à commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (M.L.I).

Cette technique de la Modulation de Largeur d'Impulsions génère des grandeurs alternatives v et i qui ne peuvent prendre qu'un nombre restreint de valeurs discrètes, proportionnelles aux grandeurs d'entrées de l'onduleur. Ces valeurs sont séparées par des discontinuités dont la position dans la période est choisie pour conférer à leur spectre d'amplitude des propriétés de qualité désirée [8].

L'objectif visé par cette étude est d'assurer le réglage de la valeur efficace du fondamental de l'onde de tension et d'éliminer les harmoniques gênants ou de les repousser à des fréquences très élevées pour être filtrés. Plusieurs méthodes permettent d'arriver à ce résultat mais la plupart dérive de la méthode de modulation sinusoïdale (appelée méthode de sous-oscillation) dont elles cherchent à améliorer les performances.

La méthode de la sous-oscillation

C'est la méthode de MLI à porteuse triangulaire et de référence sinusoïdale, l'une des techniques les plus utilisées, aussi bien en analogique qu'en numérique. La figure 1.16 donne la représentation schématique de la méthode. Le trigger de Schmitt a pour rôle de prévenir les commutations multiples du bras d'onduleur lorsque la vitesse de variation de la tension de consigne dépasse celle de la rampe. Il peut être supprimé si cette vitesse est contrôlée [10].

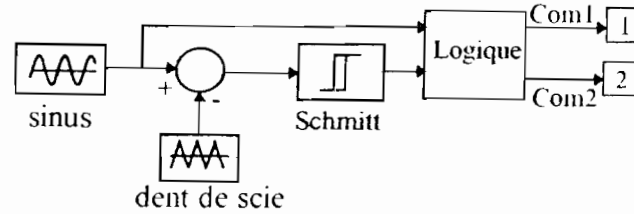


Figure 1.16 : Représentation schématique de la méthode de la sous - oscillation

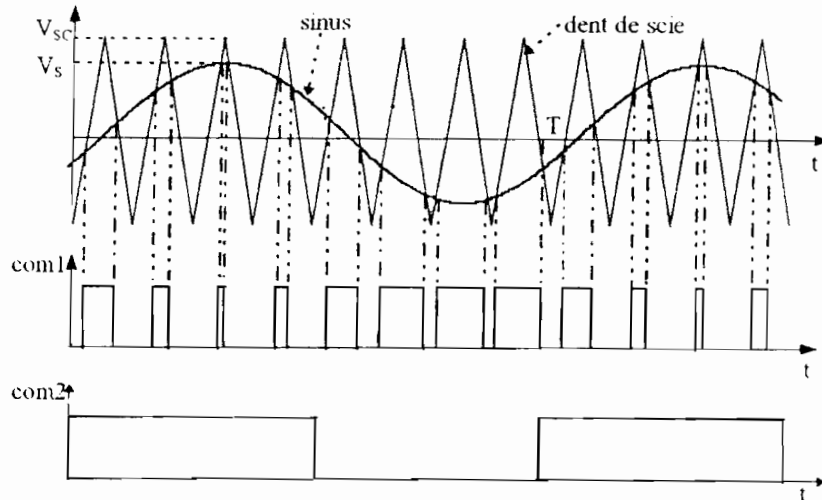


Figure 1.17 : Principe de fonctionnement de la méthode de la sous - oscillation

La figure 1.17 donne le principe de fonctionnement de la méthode et la figure 1.18 le principe de détermination des instants de commutation.

Pour garantir une commande linéaire de l'amplitude de l'onde fondamentale, il faut respecter la relation $V_{smax} \leq V_{scmax}$.

Dans le cas d'une réalisation numérique, trois techniques d'échantillonnage sont souvent utilisées : les échantillonnages de type naturel, régulier symétrique et régulier asymétrique.

Cette technique de la sous - oscillation a un inconvénient : la source de courant est mal utilisée. En effet, l'index de modulation ou le coefficient de réglage de la tension noté

$r = \frac{V_s}{V_{sc}}$ est maximum pour $V_s = 0.5 * V_{sc}$ si on désire fonctionner en zone de linéarité.

Cette limitation de l'index de modulation introduit une limitation de la puissance de sortie de l'onduleur par rapport à la puissance disponible au niveau de la source de courant. Il faut dans ce cas bien dimensionner la source d'alimentation. C'est une situation très gênante dans le cas des sources à puissance finie comme un générateur photovoltaïque.

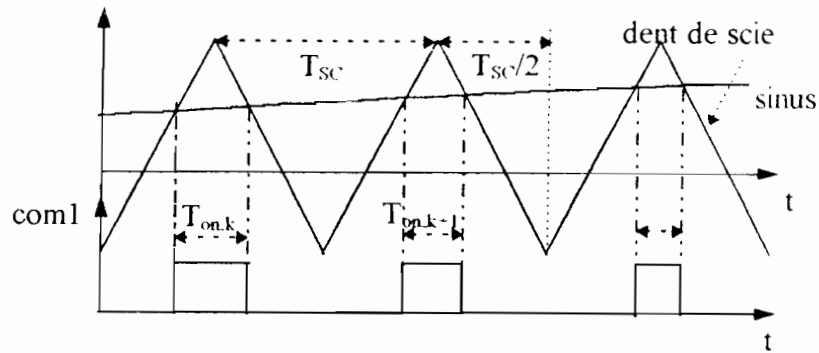


Figure 1.18 : Principe de détermination des instants de commutation

Une correction de ce cas est une modification de la méthode de sous - oscillation. Cette méthode consiste à ajouter des harmoniques de séquence 0 au signal de référence. Les distorsions que cela introduit au niveau du signal de référence ne sont pas transférées au courant de charge. Cette procédure augmente le coefficient de réglage. Par exemple :

- si on ajoute le 3^{ème} harmonique dans une proportion de 25 %, on obtient $r_{\max} = 0.882$.

- si on ajoute un signal rectangulaire de fréquence triple de celle du fondamental, on obtient le coefficient de réglage $r_{\max} = 0.907$.

I.4 CONCLUSION

Nous venons de présenter dans ce chapitre les principaux éléments constituant la centrale que nous nous proposons d'étudier.

Pour les hacheurs utilisés pour l'optimisation du transfert d'énergie, nous utiliserons les deux types de hacheurs. Nous disposons de trois générateurs photovoltaïques dont deux seront optimisés avec un hacheur dévolteur et le dernier avec un hacheur survolteur.

Pour l'onduleur, c'est un dispositif à pont complet avec des interrupteurs bidirectionnels qui sera utilisé pour la conversion des ondes continues en une onde alternative. Ce dispositif, se prêtant davantage à des techniques de commande, sera utilisé avec une modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) par la méthode de la sous-oscillation.

Le prochain chapitre traitera le fonctionnement réel de certains éléments du système. Cela permettra de dégager des points de fonctionnement autour desquels, après linéarisation, la modélisation par schéma équivalent moyen sera étudiée. Les résultats permettront de procéder à une comparaison avec le comportement du système réel.

CHAPITRE II

SIMULATION DU FONCTIONNEMENT REEL

DU SYSTEME

CHAPITRE II-

SIMULATION DU FONCTIONNEMENT REEL DU SYSTEME

Cette partie concerne surtout la modélisation du système par topologie variable. En effet, nous considérons que les semi-conducteurs sont parfaits et disparaissent ainsi des branches sur lesquelles ils se trouvent dans la mise en équation. Ceci donne des configurations différentes en fonction de l'état des semi-conducteurs d'où la notion de topologie variable [11][12][13].

Les composants autres que les semi-conducteurs sont alors simulés de façon classique avec le logiciel Matlab with SIMULINK [14], à partir des équations définissant le fonctionnement du système.

II.1 SIMULATION DU SYSTEME CONSTITUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ET DU HACHEUR DEVOLTEUR

Le système (Figure 2.1) sera décomposé en deux parties principales : le générateur photovoltaïque et le hacheur dévolteur avec son filtre de sortie. Chaque partie sera modélisée pour donner le fonctionnement réel. Nous cherchons ainsi à obtenir un modèle qui puisse traduire le plus fidèlement possible le fonctionnement de chaque partie à tout instant de la simulation.

Comme défini précédemment, c'est le hacheur qui induit la modélisation par topologie variable. Il est par conséquent nécessaire de faire une modélisation séparée du générateur photovoltaïque et du convertisseur statique. Les modèles pourront être connectés pour la simulation du système global.

Dans cette partie, nous allons donner les modèles des différents éléments notamment le générateur photovoltaïque, le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et l'onduleur.

Les modèles que nous présentons ici sont surtout destinés à une simulation sous Matlab with Simulink [15]. Les résultats seront utilisés par la suite par les modèles par schéma équivalent moyen du système. En effet, la traduction du modèle par topologie variable par des relations mathématiques est très complexe.

Or nous cherchons à utiliser les outils de l'automatique pour déterminer les correcteurs et régulateurs du système. Nous devons donc avoir des modèles mathématiques qui seront obtenus grâce à la modélisation par schéma équivalent moyen. Cette partie sera présentée au chapitre suivant.

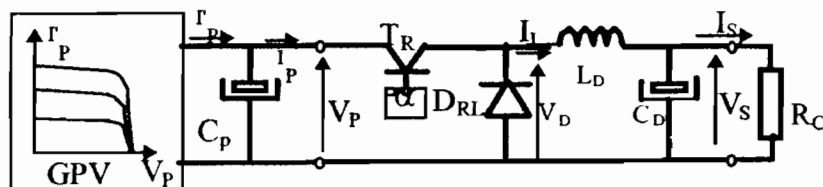


Figure 2.1 : Système constitué du générateur et du hacheur dévolteur

2.1.1 LE GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Son fonctionnement est décrit par une relation entre le courant photocréé et la tension du générateur photovoltaïque.

$$I_P = I_{CC} \left(1 - \exp \left[\chi \left(\frac{V_P}{V_0} - 1 \right) \right] \right) \quad (2.1)$$

L'objectif sera donc de traduire cette relation et d'obtenir les caractéristiques du générateur photovoltaïque en fonction des différents paramètres le constituant.

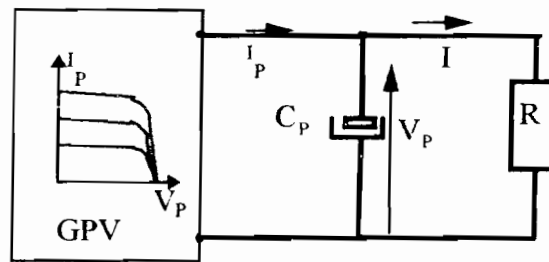


Figure 2.2 : générateur photovoltaïque sur charge résistive

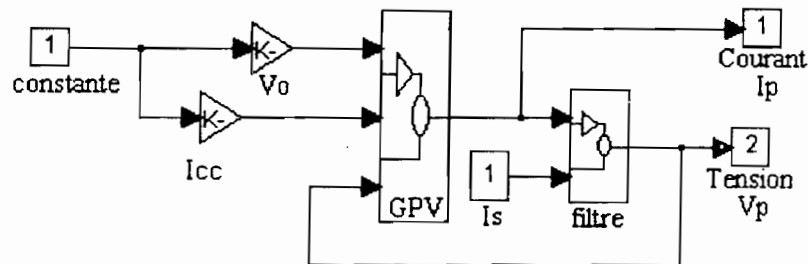


Figure 2.3 : Modèle du générateur photovoltaïque

Le modèle du générateur photovoltaïque est présenté sur la figure 2.3. Il dépend de l'ensoleillement dont son image est donnée par I_{CC} , de la tension de couplage des modules V_0 et de la charge. Il délivre la tension V_P à ses bornes et un courant I_P à la charge.

Les résultats de la simulation de ce modèle sont donnés sur les figures (Figure 2.4).

Pour vérifier le bon fonctionnement du modèle, nous avons fait fonctionner le générateur photovoltaïque sous différentes conditions notamment (Figure 2.4) :

- pour différents ensoleillements,
- différentes charges.

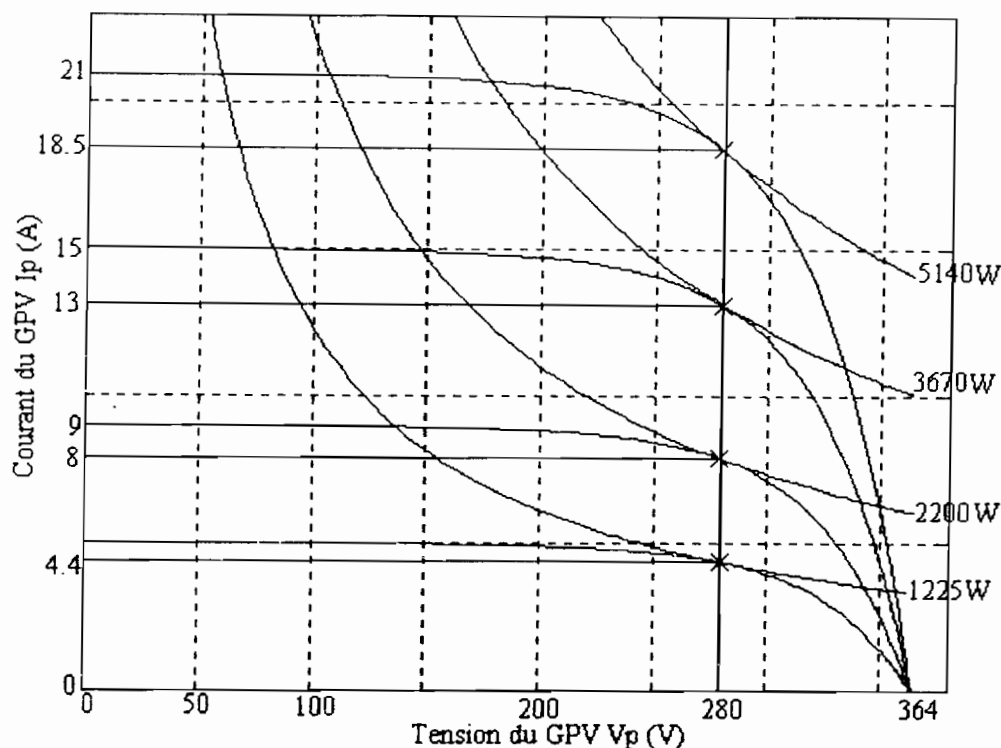


Figure 2.4 : Caractéristiques du générateur photovoltaïque

Nous avons tracé les caractéristiques $I_p(V_p)$ avec les courbes d'équipuissance. Cela nous a permis de déterminer les tensions optimales et les courants optimaux du générateur pour différents ensoleillements.

En conclusion, nous avons la confirmation que la tension optimale est presque constante en fonction de l'ensoleillement. Ceci nous permet dans les applications suivantes, d'utiliser cette tension pour la régulation du générateur photovoltaïque couplé au hacheur dévolteur.

2.1.2 LE HACHEUR DEVOLTEUR ET SON FILTRE DE SORTIE.

Il est utilisé pour l'optimisation du transfert d'énergie entre le générateur photovoltaïque et la charge (Figure 2.5). Pour ce faire, à partir de la tension du générateur photovoltaïque, une comparaison est faite avec la tension du fonctionnement optimale pour élaborer la commande de l'interrupteur principal.

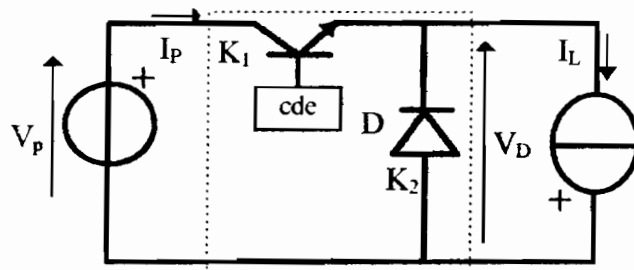


Figure 2.5 : Schéma du hacheur dévolteur

Il est donc constitué de trois parties principales qui sont le pont des interrupteurs qui est la partie non linéaire, le filtre de sortie qui est la partie linéaire et la commande des interrupteurs (Figure 2.6).

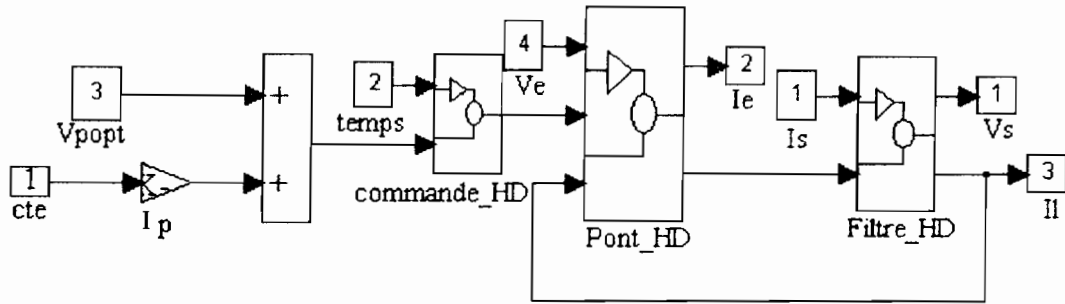


Figure 2.6 : Modèle du hacheur dévolteur

L'optimisation du transfert d'énergie consiste à présenter au générateur photovoltaïque une charge correspondant à sa charge optimale. Pour ce faire, une consigne correspondant à la tension optimale du générateur photovoltaïque est comparée à la tension du générateur photovoltaïque à chaque instant et le résultat est utilisé pour la régulation du transfert d'énergie.

2.1.2.1 Le pont interrupteur

Il est le noeud du problème. Le circuit est régulièrement modifié par le jeu des commutations entre les interrupteurs. Ces derniers sont supposés parfaits donc la commutation est instantanée.

Le fonctionnement est déterminé par la succession de deux séquences en conduction continue (Figure 2.7) qui sont gérées par la commande. Chaque séquence correspond à un certain état des interrupteurs. Lorsqu'une séquence est choisie, le hacheur dévolteur se ramène à un circuit électrique classique et les équations décrivant le fonctionnement sont linéaires.

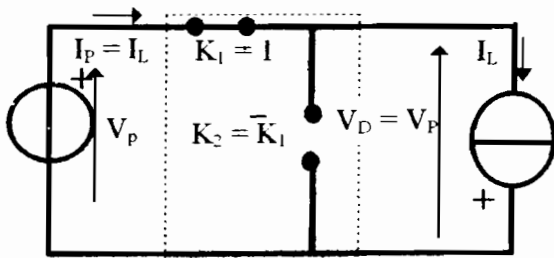


Figure 2.7 a : séquence 1 (seq1)

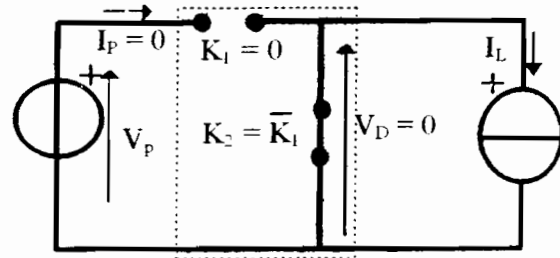


Figure 2.7 b : séquence 2 (seq2)

Figure 2.7 : Séquences de fonctionnement du hacheur dévolteur

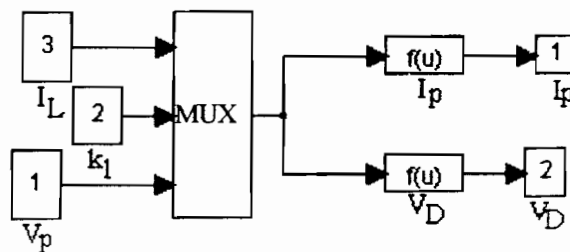


Figure 2.8 : Modèle du pont interrupteurs

2.1.2.2 Le filtre de sortie

Il est constitué par une self de lissage du courant et d'un condensateur pour le filtrage de la tension aux bornes de la charge (Figure 2.9). Il constitue la partie linéaire du système.

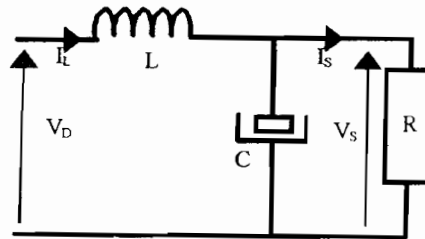


Figure 2.9 : Filtre de sortie du hacheur dévolteur

Il est régi par les équations suivantes :

$$\frac{\Delta V_S}{\Delta t} = \frac{1}{C}(I_L - I_S)$$

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{1}{L}(V_D - V_S)$$

Ce système d'équations étant linéaire, leur résolution au cours de la simulation est aisée.

Pour ce faire, nous considérons que V_D et I_S sont des entrées. La tension à la sortie du pont des interrupteurs est connue à chaque instant, ce qui permet de l'utiliser comme entrée pour le filtre. De même, le courant absorbé par la charge R est aussi connu. Il est alors pris comme variable d'entrée du filtre.

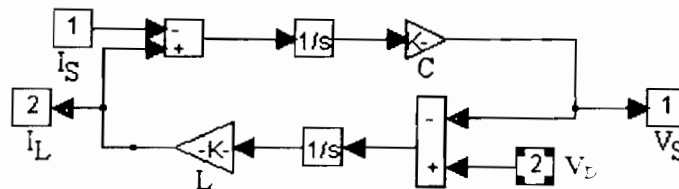


Figure 2.10 : Modèle du filtre

Les variables de sortie sont la tension V_S et le courant I_L . Ces deux grandeurs sont également des variables d'état du système.

2.1.2.3 La commande du hacheur dévolteur

La commande sera définie par une variable binaire k_1 avec $k_1 \in \{0;1\}$. En effet, nous supposons que les interrupteurs sont parfaits et que les commutations sont instantanées. Ceci nous permet de dire que les interrupteurs auront seulement deux états de fonctionnement : ouvert ou fermé.

Les séquences de fonctionnement sont alors définies par :

$$\text{seq1} : V_D = k_1 V_p \text{ et } I_p = k_1 I_L, \text{ avec } k_1 = 1$$

seq2 : $V_D = k_1 V_p$ et $I_p = k_1 I_L$ avec $k_1 = 0$

Le modèle traduisant ce fonctionnement est ainsi donné par la figure 2.11 :

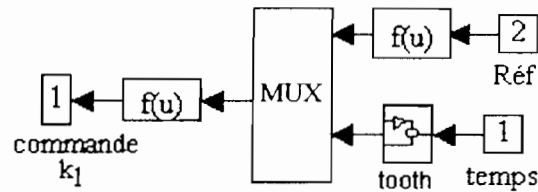


Figure 2.11 : Modèle de la commande du hacheur dévolteur

La commande est le résultat de la comparaison d'une référence (Réf), (Figure 2.12) à un signal en dent de scie (tooth), (Figure 2.11) de fréquence fixant la fréquence de fonctionnement du hacheur.

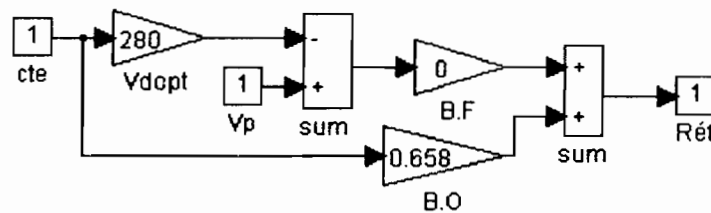


Figure 2.12 : Référence de la commande

Le modèle de la référence inclut aussi la possibilité de simuler le fonctionnement en boucle ouverte (B.O) ou en boucle fermée (B.F). Nous avons introduit un coefficient qui sélectionne le type de simulation voulue.

2.1.3 LE SYSTEME GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE - HACHEUR DEVOLTEUR

Le système complet est donc constitué du générateur photovoltaïque et du hacheur dévolteur sur charge résistive. La simulation de ce système est basée sur le modèle SIMULINK (figure 2.13).

Le modèle permet à partir de certains paramètres (ensoleillement, tension de couplage du générateur photovoltaïque) et des valeurs des éléments le composant, de donner les tensions V_p du générateur photovoltaïque et V_s du hacheur dévolteur et les courants I_p du générateur photovoltaïque et I_L dans la bobine du filtre du hacheur dévolteur.

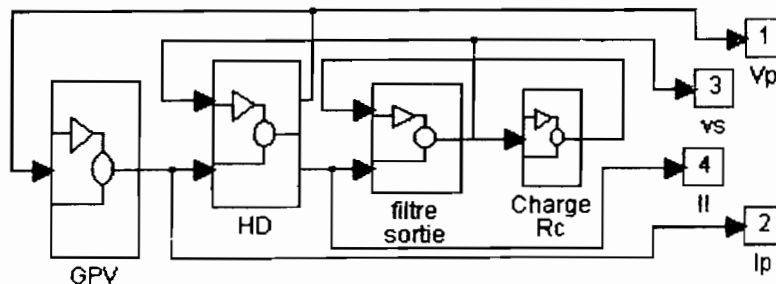


Figure 2.13 : Modèle du générateur photovoltaïque et hacheur dévolteur

Les grandeurs observées :

Pour le suivi de la simulation, plusieurs variables sont observées. Ces variables permettent surtout de déterminer le rapport cyclique et leur forme.

Rapport cyclique α :

Il est déterminé par le rapport de la tension de sortie à la tension d'entrée ou aussi du rapport du courant d'entrée au courant de sortie. Aussi, une observation dynamique est réalisée et permet de disposer des grandeurs ci-dessus énumérées.

Régime dynamique

Les courbes donnant le fonctionnement du système sont données sur les figures 2.14, 2.15.

Nous avons deux types de fonctionnement :

- fonctionnement en grandes variations,
- fonctionnement en faibles variations.
- fonctionnement en grandes variations.

Ce type de fonctionnement se produit surtout lors de la mise sous tension du système au régime de fonctionnement optimale. Le rapport cyclique optimal est imposé et le système converge vers ce régime en boucle ouverte.

La forme du signal se rapproche de celle d'un système du premier ordre car les oscillations ne sont pas autour de la valeur finale mais se font pendant que l'amplitude augmente.

Fonctionnement aux faibles variations :

Ce sont les cas où après l'établissement, nous perturbons le système. Nous cherchons ici à étudier le système autour d'un point de fonctionnement donc voir son comportement après des perturbations.

La forme des courbes est presque la même que pour les grandes variations.

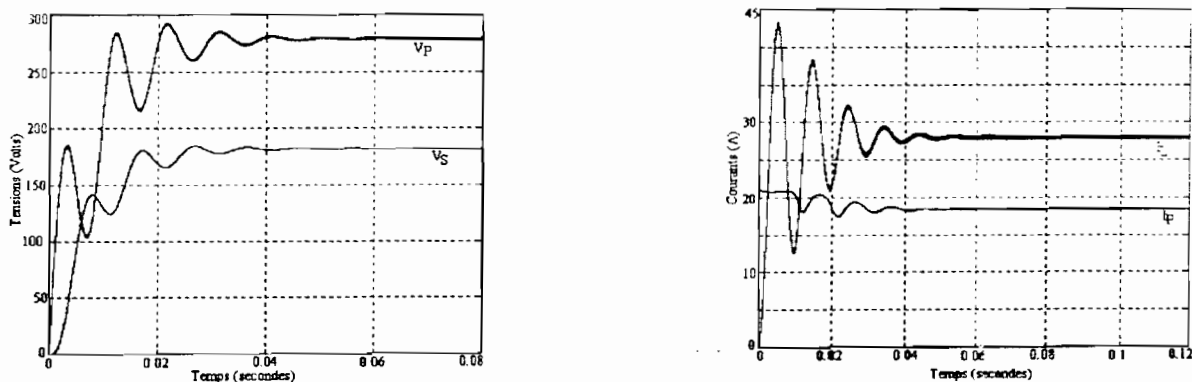


Figure 2.14 : Etablissement pour un rapport cyclique de 0.658

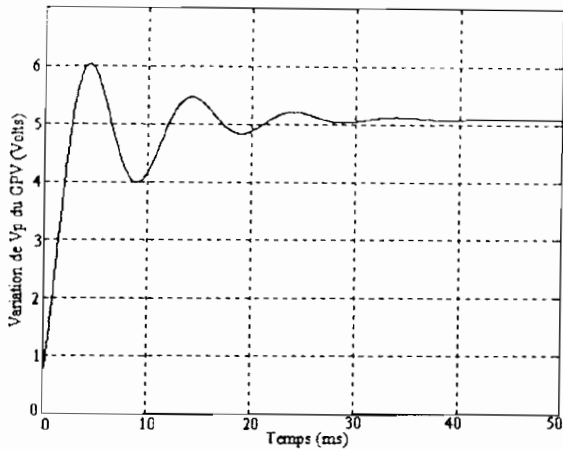
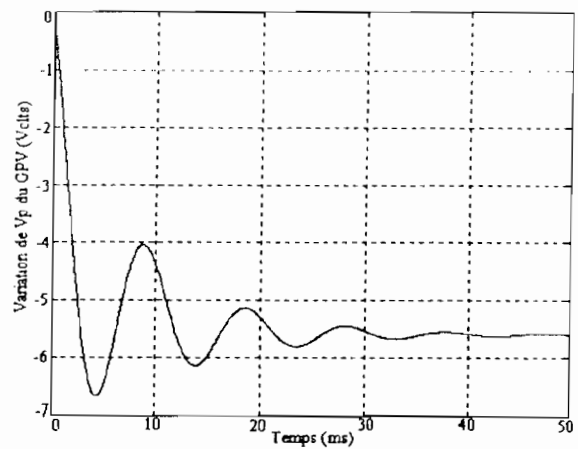
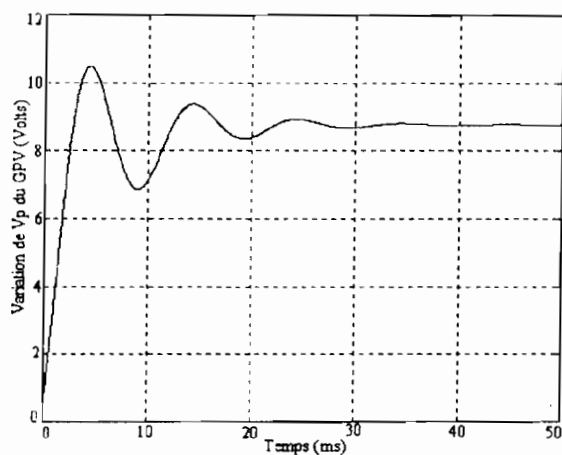
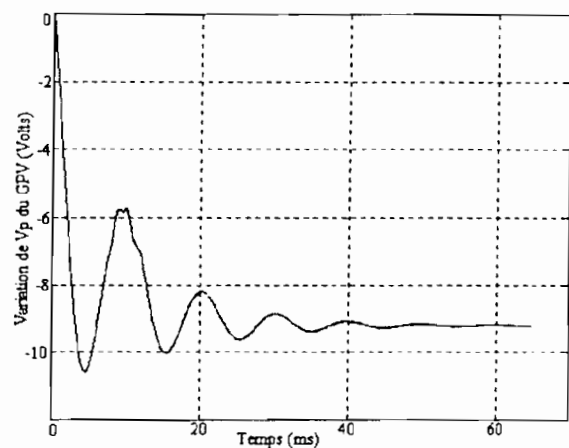
2.15.a) $\alpha_{opt} - 0.01$ 2.15.b) $\alpha_{opt} + 0.01$ 2.15.c) $\alpha_{opt} - 0.02$ 2.15.d) $\alpha_{opt} + 0.02$

Figure 2.15 : Réponse de la tension V_P du générateur photovoltaïque à une variation du rapport cyclique autour de V_{popt}

Le régime statique :

Au régime permanent, nous constatons que le système se stabilise autour des valeurs désirées. Le rapport cyclique est celui imposé par la commande de même que la tension d'entrée est la tension optimale du générateur photovoltaïque et la tension de sortie est bien égale à la tension du noeud continu désirée.

Les courants aussi suivent bien la tendance.

Conclusion :

L'erreur au régime permanent est très faible. Le régime transitoire est constitué d'oscillations qui s'éteignent au bout de 40 ms.

Il est à remarquer que le courant dans la bobine subit de fortes variations ce qui nous renseigne sur le dimensionnement des interrupteurs à utiliser.

II.2 MODÈLE SIMULINK DU SYSTEME CONSTITUE D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ET D'UN HACHEUR SURVOLTEUR

L'utilisation d'un hacheur survolteur est nécessaire lorsque la tension du générateur photovoltaïque est inférieure à la tension du noeud continu. Ce cas existe bien dans notre système d'où cette partie.

Pour cette étude, nous nous limitons seulement à l'étude du hacheur et nous terminerons par le couplage du hacheur survolteur et du générateur photovoltaïque.

2.2.1 LE HACHEUR SURVOLTEUR

Il est constitué d'une partie non linéaire constituée du pont interrupteur, de la commande de ce pont et d'une partie linéaire représentée par le filtre de sortie et la charge (Figure 2.16).

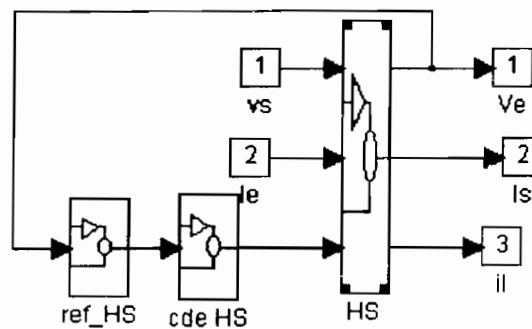


Figure 2.16 : Modèle du hacheur survolteur

La bobine placée à l'entrée du hacheur transforme le générateur photovoltaïque en une source de courant tandis que le condensateur de filtrage de la tension de sortie donne à cette dernière le comportement d'une source de tension (Figure 2.17).

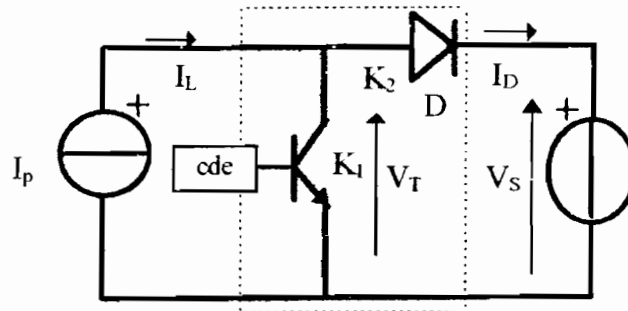


Figure 2.17 : Hacheur survolteur et Générateur photovoltaïque

2.2.1.1 Le pont interrupteur

Il est la partie non linéaire du système. Son fonctionnement en conduction continue donne deux configurations au système (Figure 2.18)

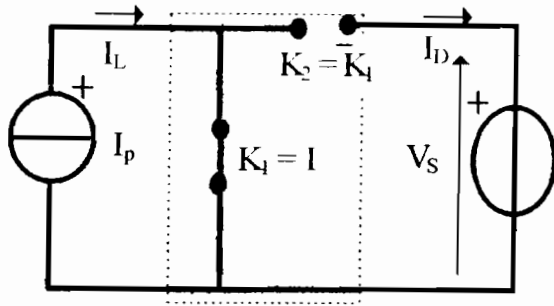


Figure 2.18.a : séquence 1 (seq1)

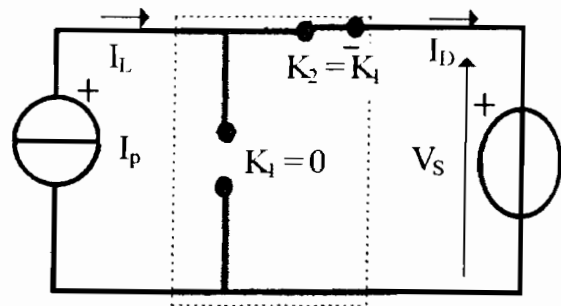


Figure 2.18.b : séquence 2 (seq2)

Figure 2.18 : Séquences de fonctionnement du hacheur survolteur

La première séquence est définie par la fermeture de l'interrupteur commandé et l'ouverture de la diode. C'est une séquence où la charge est découplée du générateur photovoltaïque.

La deuxième séquence est l'alimentation de la charge. Son modèle de simulation est donné sur la figure 2.19.

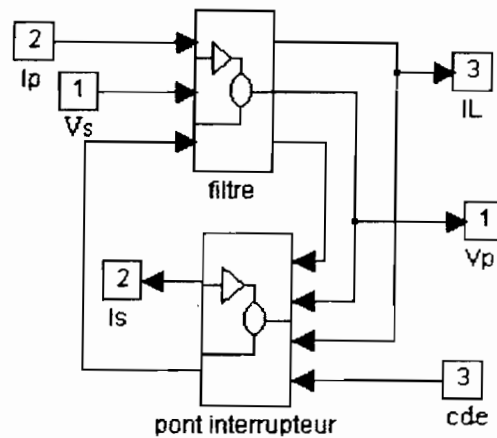


Figure 2.19 : Modèle du hacheur survolteur : filtre et pont interrupteur

2.2.1.2 La commande du pont interrupteur

Cette commande agence les deux séquences de fonctionnement. Elle est définie par une variable binaire K_i , $i \in \{1,2\}$ et tel que $K_1 = \overline{K_2}$

$K_1 = 0$ est la séquence d'alimentation de la charge. Nous avons alors :

$$V_T = V_s \text{ et } I_D = I_L \text{ soit } V_T(1 - K_1)V_s \text{ et } I_D(1 - K_1)I_L$$

$K_1 = 1$ est la phase de déconnexion de la charge. Nous avons alors :

$$V_T = 0 \text{ et } I_D = 0 \text{ soit } V_T(1 - K_1)V_s \text{ et } I_D(1 - K_1)I_L$$

Nous pouvons ainsi regrouper sous une seule formule le fonctionnement du pont interrupteur en posant :

$$V_T(1 - K_1)V_s$$

$$I_D(1 - K_1)I_L$$

A partir de ces relations, nous avons réalisé le modèle de simulation (Figure 2.19) qui délivre la tension V_S aux bornes du condensateur de sortie du hacheur survolteur, le courant dans la bobine I_L .

2.2.2 LE SYSTEME GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ET HACHEUR SURVOLTEUR

Le modèle du système complet est donné sur la figure 2.20.

Les paramètres observables sont la tension V_P et le courant I_P du générateur photovoltaïque, la tension V_S aux bornes du condensateur de sortie et le courant I_L de la bobine.

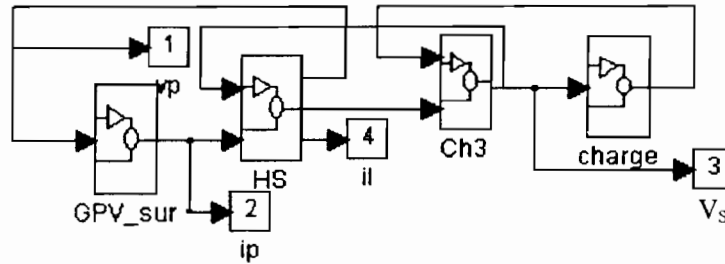


Figure 2.20 Modèle du hacheur survolteur alimenté par le générateur photovoltaïque

Les résultats de la simulation en boucle ouverte sont donnés sur les figures 2.21 et 2.22.

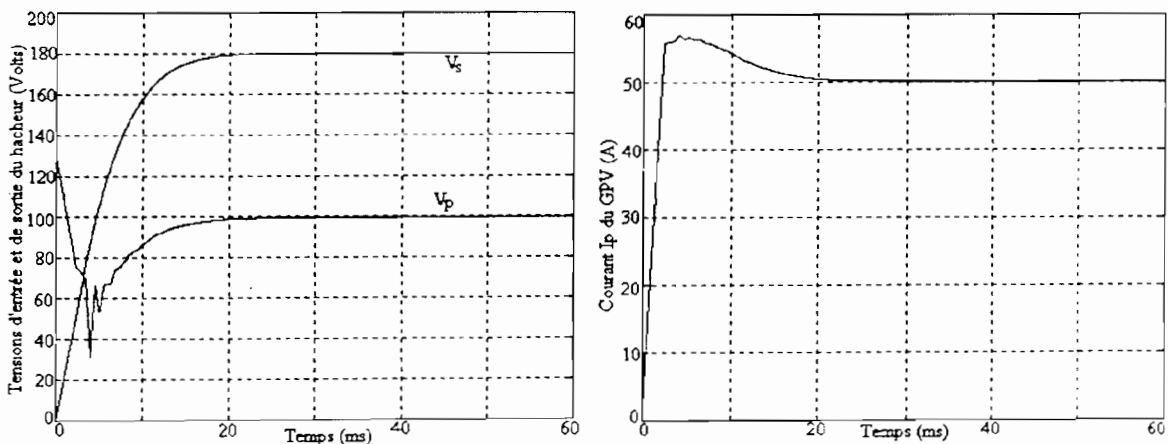


Figure 2.21 : Etablissement pour un rapport cyclique optimal du hacheur survolteur

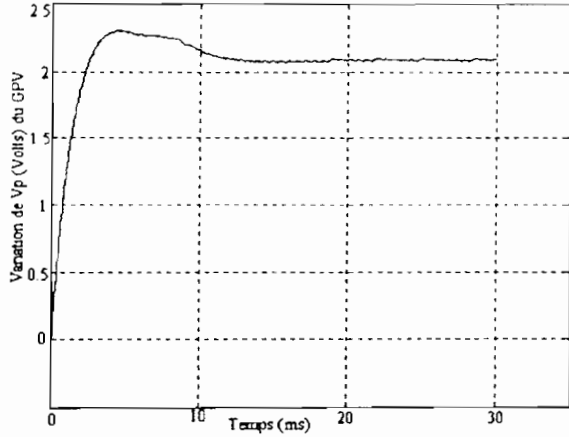
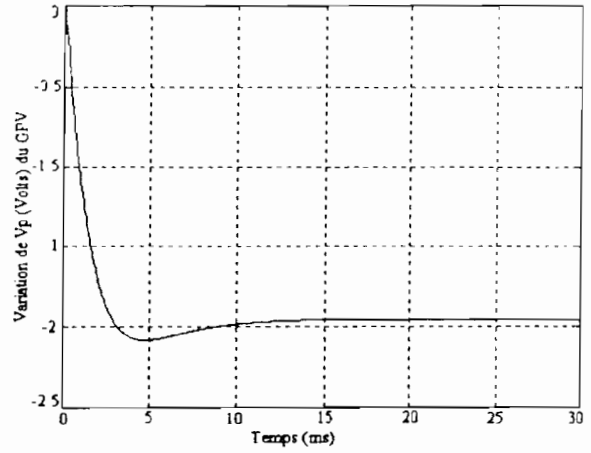
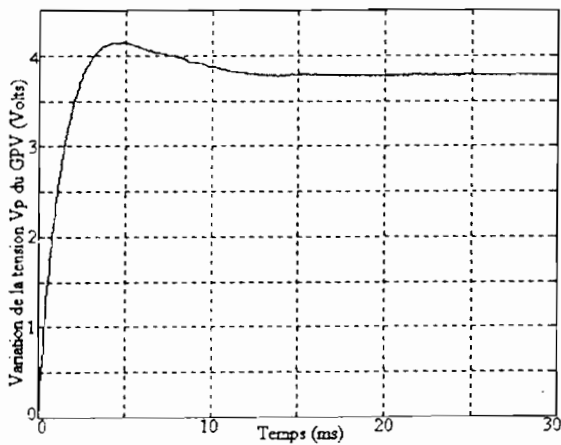
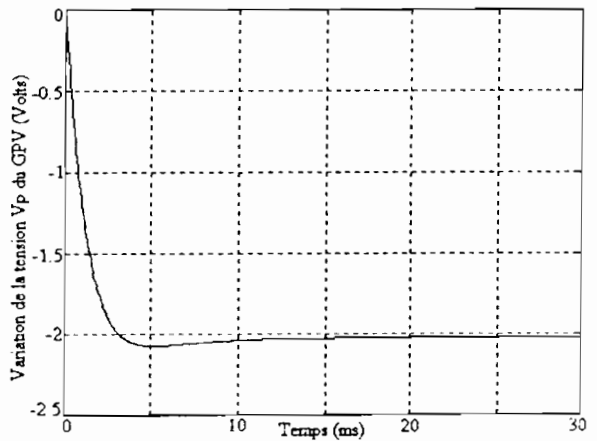
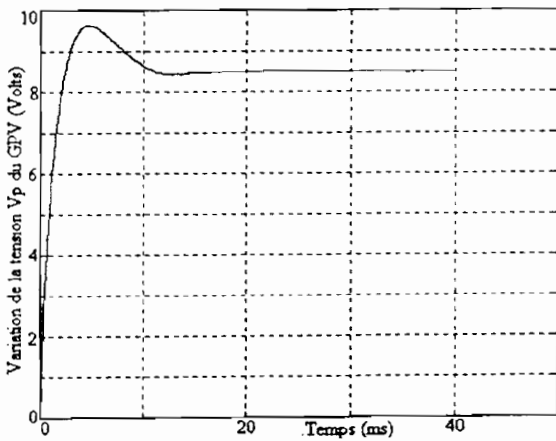
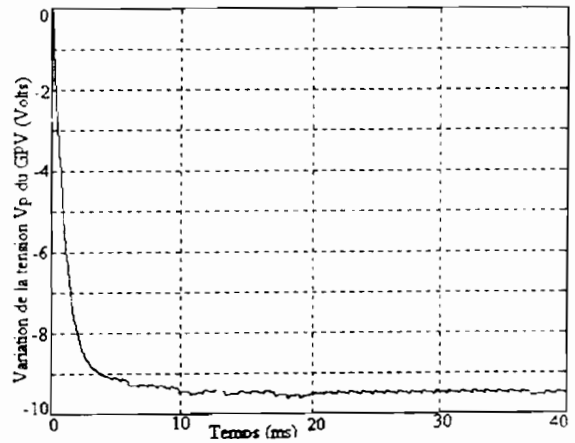
fig 2.22.a : $\alpha = \alpha_{opt} - 0.01$ fig 2.22.b : $\alpha = \alpha_{opt} + 0.01$ fig 2.22.c : $\alpha = \alpha_{opt} - 0.02$ fig 2.22.d : $\alpha = \alpha_{opt} + 0.02$ fig 2.22.e : $\alpha = \alpha_{opt} - 0.05$ fig 2.22.f : $\alpha = \alpha_{opt} + 0.05$

Figure 2.22 : Réponse autour de V_{popt} la tension V_p du générateur photovoltaïque à une variation du rapport cyclique

II.3 MODÈLE DE SIMULATION DU SYSTEME CONSTITUE DE L'ONDULEUR ET DE LA CHARGE A TRAVERS UN TRANSFORMATEUR

L'onduleur sera constitué de trois parties importantes (Figure 2.23) : le pont à quatre interrupteurs constituant la partie non linéaire, le filtre de sortie et la partie commande. Chaque partie sera déterminée par un ensemble de fonctions logiques ou différentielles et sera par la suite simulées avec SIMULINK.

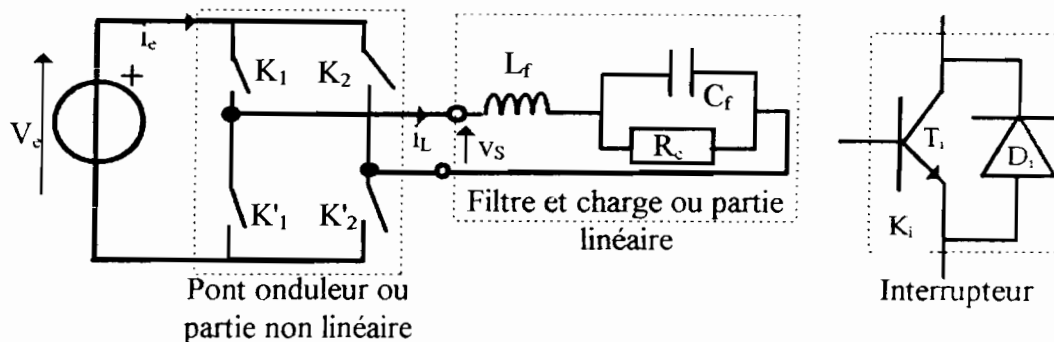


Figure 2.23: L'onduleur monophasé sur charge résistive

Nous supposons que les différents éléments constituant le système sont parfaits. Ainsi, nous représentons la source d'alimentation par une source de tension parfaite et l'ensemble constitué du transformateur et de la charge par une source de courant parfaite (Figure 2.24).

A partir de ces considérations, nous déterminons les modèles de simulation des différents éléments sous le logiciel Matlab with Simulink [14][15].

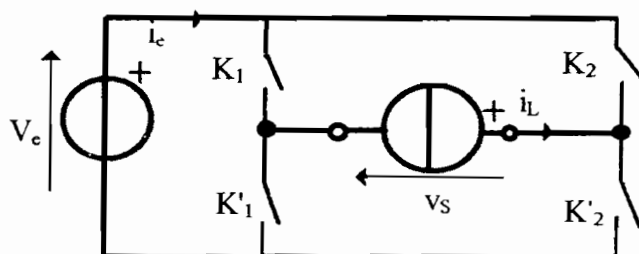


Figure 2.24 : Schéma de l'onduleur avec le modèle de la partie linéaire

Le modèle pour la simulation du fonctionnement réel de cet ensemble est donné par la Figure 2.25.

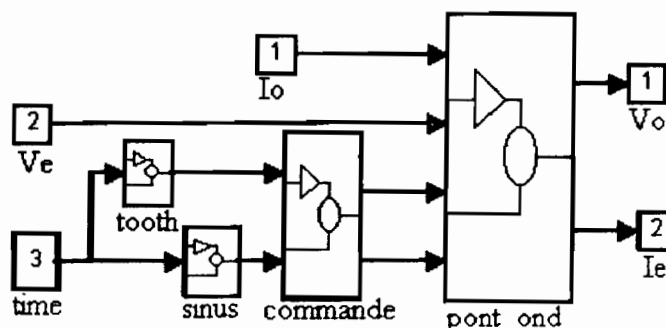


Figure 2.25 : Pont interrupteur de l'onduleur

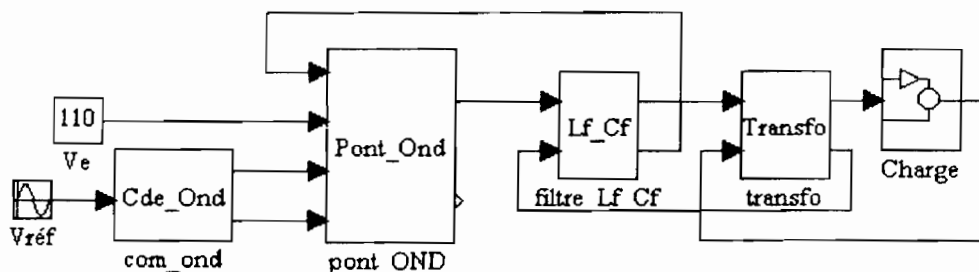


Figure 2.26 : Modèle de l'onduleur monophasé sur charge résistive

2.3.1 LE PONT ONDULEUR

Il est constitué des quatre interrupteurs bidirectionnels en courant (Figure 2.23). Chaque interrupteur est constitué d'un transistor avec une diode en tête - bêche.

Le modèle du pont a comme paramètres d'entrée, la tension d'entrée V_e , le courant dans le filtre i_L et la commande des interrupteurs. Les grandeurs de sortie sont la tension de sortie V_s et le courant d'entrée I_e . Le principe de la modélisation consiste à établir les équations de fonctionnement du pont liant les grandeurs de sortie aux grandeurs d'entrée par l'intermédiaire des états de la commande des interrupteurs.

Principe

Nous déterminons d'abord les différentes séquences de fonctionnement. Ces séquences sont alors mises en équations en tenant compte des commandes des interrupteurs.

Le fonctionnement de l'onduleur est alors déterminé par le séquencement des configurations suivant une certaine logique.

2.3.2 LOGIQUE DE FONCTIONNEMENT :

Nous avons six séquences de fonctionnement (Figure 2.27). Pour chaque séquence, nous allons définir la tension de sortie v_s et le courant d'entrée i_e en fonction de la tension d'entrée V_e et le courant dans la bobine L_f , i_L .

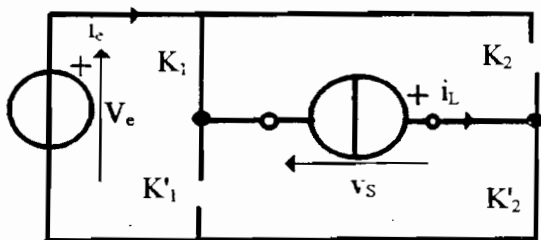


Figure 2.27.a : séquence 1

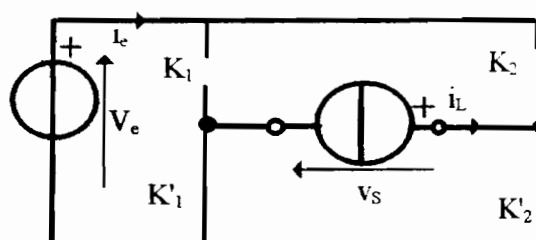


Figure 2.27.b : séquence 2

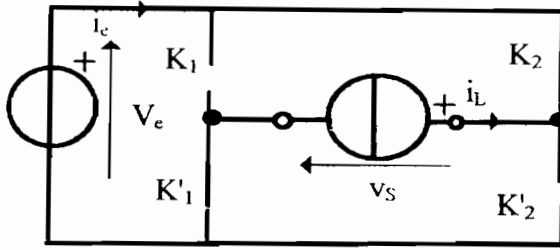


Figure 2.27.c : séquence 3

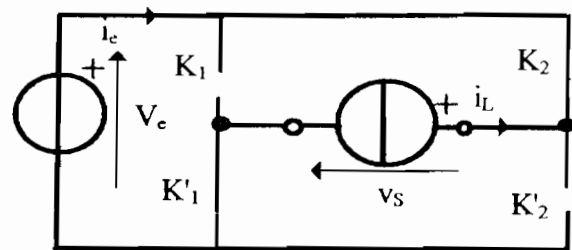


Figure 2.27.d : séquence 4

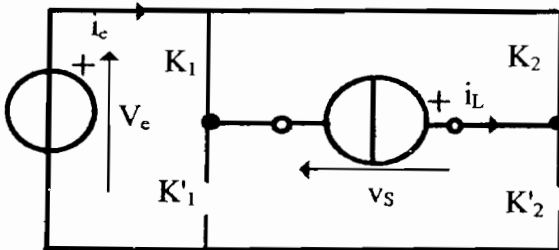


Figure 2.27.e : séquence 5

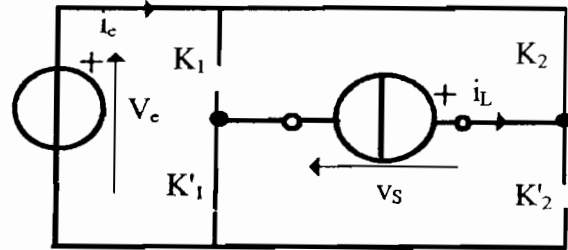


Figure 2.27.f : séquence 6

Figure 2.27 : Séquences de fonctionnement de l'onduleur

1^{ère} séquence : T_1 et T_2 fermés. Phase d'alimentation de la charge par la source. $i_e = i_L > 0$ et $v_s = V_e$

2^{ème} séquence : D_1 et T_2 fermés. Phase de roue libre avec déconnexion de la source d'avec la charge $i_e = 0$; $v_s = 0$;

3^{ème} séquence : D_2 et D_1 passants. Phase de récupération d'énergie par la source. $i_e = -i_L < 0$ et $v_s = -V_e$;

4^{ème} séquence : T_1 et T_2 fermés. Phase d'alimentation $i_e = -i_L > 0$ ($i_L < 0$) et $v_s = -V_e$.

5^{ème} séquence : T_1 et D_1 fermés. Phase de roue libre. $i_e = 0$; $v_s = 0$;

6^{ème} séquence : D_1 et D_2 fermés. Phase de récupération. $i_e = i_L < 0$ et $v_s = V_e$.

Définissons deux variables binaires com_1 et com_2 décrivant la commande des interrupteurs. Nous choisissons de fermer en permanence pendant une moitié de la période, les transistors T_2 et T_2 alternativement avec com_2 , tandis que les autres transistors recevront la commande MLI, com_1 . Nous pouvons ainsi définir des relations entre les variables caractéristiques (tensions et courants) de fonctionnement du pont onduleur et les commandes. Aussi nous avons :

séquence 1 : $com_1 = 1$ et $com_2 = 1$: état passant pour les transistors T_1 et T_2 tandis que les autres interrupteurs sont ouverts. C'est une phase d'alimentation et nous avons la tension de sortie qui est égale à la tension d'entrée tandis que la courant d'entrée égale le courant dans la bobine qui est positif.

$$i_e = com_1 com_2 (i_L \geq 0) i_L$$

$$v_s = com_1 com_2 (i_L \geq 0) V_e$$

séquence 2 : $com_1 = 0$ et $com_2 = 1$: blocage du transistor T_1 ce qui amorce la diode D_1 La tension de sortie est nulle comme aussi le courant d'entrée cependant le courant dans la bobine est toujours positif. C'est une phase de roue libre

$$i_e = com_1 com_2 (i_L \geq 0) i_L$$

$$v_s = com_1 com_2 (i_L \geq 0) V_e$$

séquence 3 : $com_1 = 1$ et $com_2 = 0$ Cette phase correspond à la récupération de l'énergie emmagasinée dans la bobine par la source continue. Ce sont les diodes D_2 et D_1 qui conduisent. Les commandes sur les transistors sont inhibées car le courant ne peut être véhiculé par les transistors T_1 et T_2 .

$$i_e = -com_1 \overline{com_2} (i_L \geq 0) i_L$$

$$v_s = -com_1 \overline{com_2} (i_L \geq 0) V_e$$

séquence 4 : $com_1 = 1$ et $com_2 = 0$ identique à la séquence 3 sauf que le courant a changé de sens de circulation dans la bobine.

$$i_e = -com_1 \overline{com_2} (i_L < 0) i_L$$

$$v_s = -com_1 \overline{com_2} (i_L < 0) V_e$$

séquence 5 : $com_1 = 0$ et $com_2 = 0$ similaire à la séquence 2

$$i_e = -com_1 \overline{com_2} (i_L < 0) i_L$$

$$v_s = -com_1 \overline{com_2} (i_L < 0) V_e$$

séquence 6 : $com_1 = 1$ et $com_2 = 1$: phase de récupération

$$i_e = com_1 com_2 (i_L < 0) i_L$$

$$v_s = com_1 com_2 (i_L < 0) V_e$$

Nous avons le courant d'entrée et la tension de sortie donnés par la somme des six fonctions ci-dessus. Elles sont obtenues à partir de la fonction f_1 :

$$f_1 = com_1 com_2 - com_1 \overline{com_2}$$

Nous avons alors :

$$i_e = f_1 * i_L$$

$$v_s = f_1 * V_e$$

Le modèle du pont onduleur est alors donné par le schéma de la figure 2.28

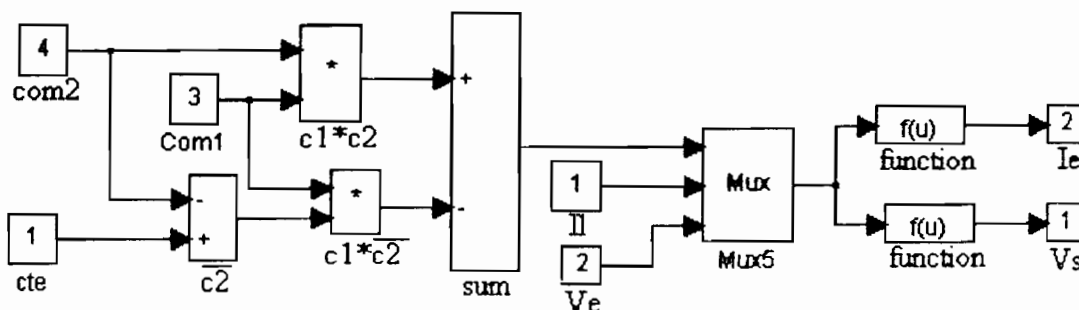


Figure 2.28: Modèle du pont interrupteur de l'onduleur

2.3.3 LE FILTRE A LA SORTIE DE L'ONDULEUR

Il constitue la partie linéaire de l'onduleur. C'est un bloc ayant pour entrées les grandeurs tension V_e et le courant i_s et pour grandeurs de sortie le courant d'entrée i_c ou le courant dans la bobine i_L et tension de sortie v_s ou tension aux bornes du condensateur v_{cf} . Le modèle est donné par la figure 2.29.

A la sortie des convertisseurs, il existe très souvent une série d'harmoniques plus ou moins importante suivant la technique de commande utilisée. Cette présence d'harmoniques engendre une déformation des tensions et des courants de sortie.

A part la technique de commande, un autre procédé consiste à réaliser un filtrage adéquat des harmoniques et à ne conserver que le fondamental de l'onde.

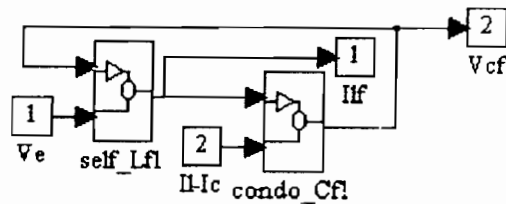


Figure 2.29 : Modèle du filtre de l'onduleur

2.3.4 LA COMMANDE MLI PAR LA METHODE DE LA SOUS-OSCILLATION

Elle est mise en oeuvre par la combinaison d'une porteuse triangulaire et d'une référence sinusoïdale [16]. Les intersections des deux signaux constituent les instants de début de fermeture ou d'ouverture des interrupteurs.

Lors de l'alternance positive de la tension de sortie, l'intersection de la partie croissante du signal triangulaire avec la référence donne la fermeture de K_1 et l'ouverture de K_2 . C'est le début de la roue libre.

La commande de l'onduleur consiste à fermer un interrupteur d'une diagonale pendant la moitié du signal modulant et à appliquer le signal de modulation sur l'autre interrupteur de la diagonale.

Cette commande est réalisée par le modèle de la figure 2.30. Le modèle est conçu pour délivrer deux signaux de commande. Le premier signal com_2 permet la sélection d'une diagonale d'interrupteurs. Cette commande a la même période que le signal modulant.

Le deuxième signal com_1 est la commande MLI appliquée à l'autre transistor de la diagonale.

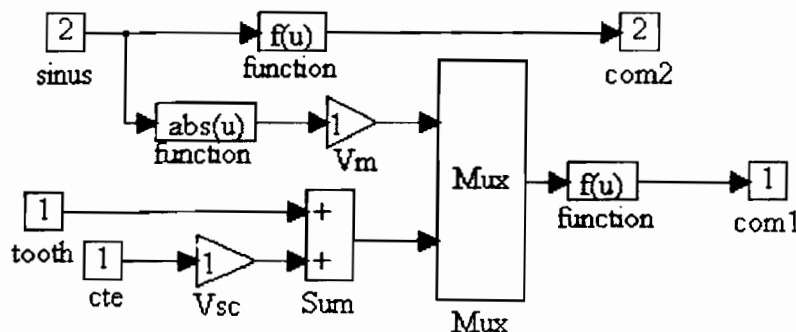


Figure 2.30 : Commandes de l'onduleur

2.3.5 LE TRANSFORMATEUR

Le modèle choisi est le schéma équivalent aval du transformateur (Figure 2.31). Les éléments du secondaire sont ramenés au primaire.

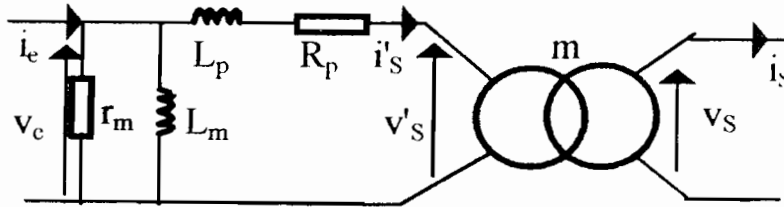


Figure 2.31 : Le transformateur monophasé

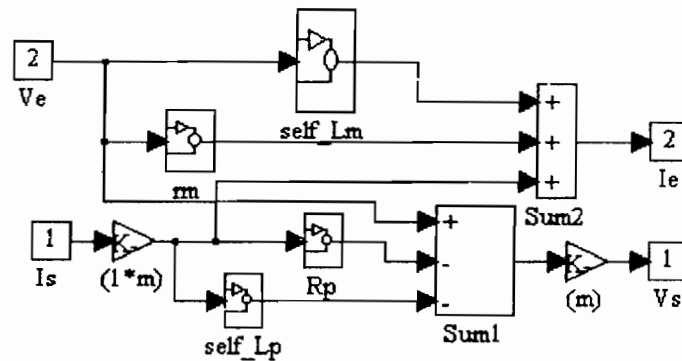


Figure 2.32 : Modèle du transformateur monophasé

II.4 RESULTATS DE LA SIMULATION DE L'ONDULEUR

Le rôle de l'onduleur est primordial dans le fonctionnement de la microcentrale.

Les résultats présentés sous forme de courbes (Figures 2.33) permettent de dégager certaines conclusions.

Le signal de sortie est sinusoïdal et a une fréquence de 50 Hz. Son amplitude dépend de la tension d'entrée mais aussi du coefficient de réglage r , $r = \frac{v_m}{v_{sc}}$ où v_m est l'amplitude de la sinusoïde de référence et v_{sc} est l'amplitude de la dent de scie.

2.4.1 SIMULATION AVEC LA TENSION D'ENTREE CONSTANTE

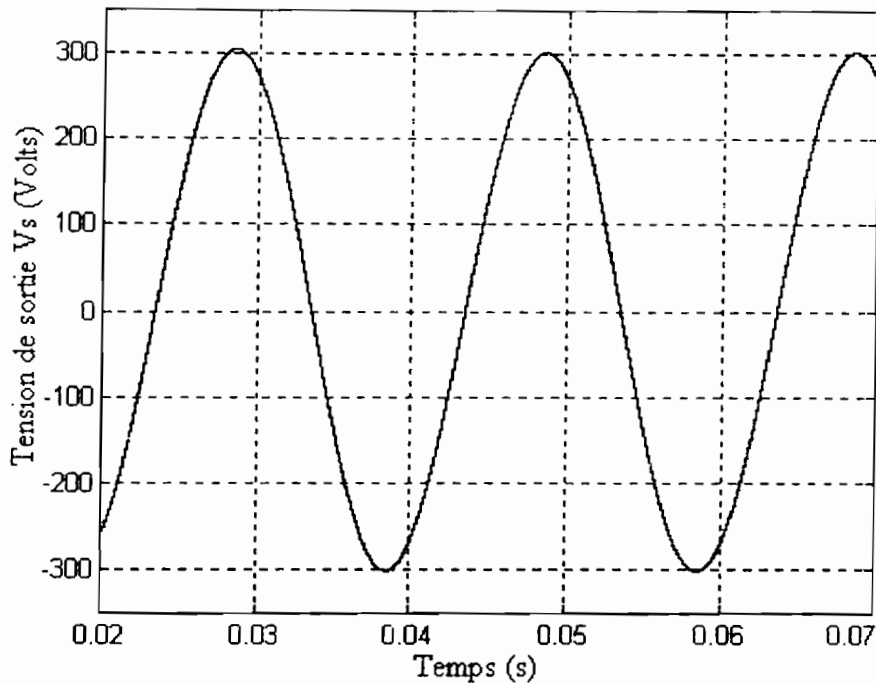


Figure 2.33 : Tension de sortie de l'onduleur de tension

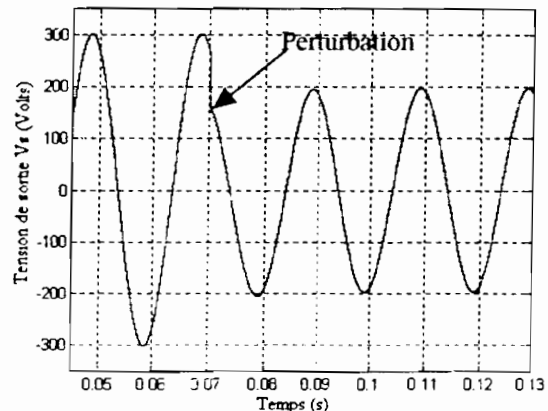
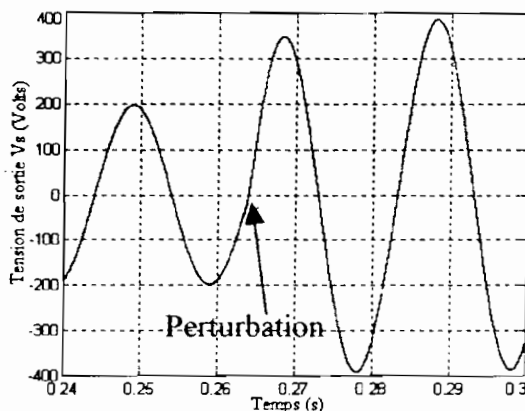


Fig 2.34.a : Diminution de la charge de 13 % Fig 2.34.b : Augmentation de la charge de 9 %

Figure 2.34 : Tension de sortie de l'onduleur en boucle ouverte après une perturbation de la charge

La tension d'entrée est ici maintenue constante et égale à 192 V. Le coefficient de réglage permettant d'obtenir cette tension de sortie est égal à $r = 0.72$.

Sur la figure 2.33, nous avons tracé la tension de sortie de l'onduleur en régime permanent. La forme est sinusoïdale et la fréquence est égale à 50 Hz. La tension maximale est égale à 311 V ce qui correspond à une tension efficace de 220 V.

Sur les figures 2.34, nous avons représenté la tension de sortie avec une perturbation de la charge.

2.4.2 SIMULATION AVEC LA TENSION D'ENTREE VARIABLE

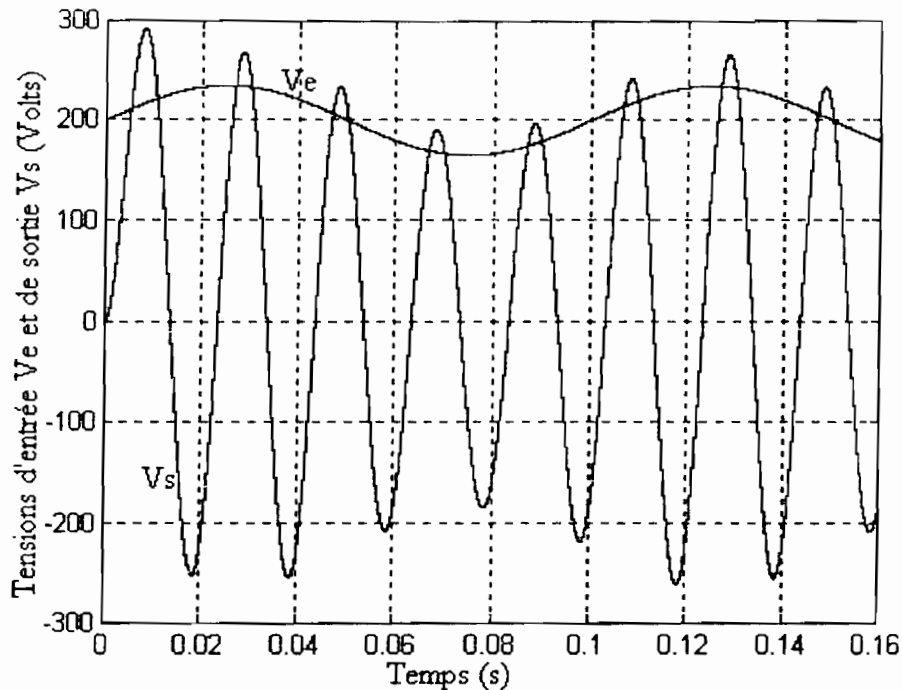


Figure 2.35 : Tension de sortie en boucle ouverte lorsque la tension d'entrée est variable

Nous avons aussi cherché à déterminer l'influence de la tension d'entrée sur le comportement de l'onduleur. En effet, le système est conçu pour fonctionner avec une tension du noeud continu non asservi. Cette tension peut être variable au cours du fonctionnement. Comment ces variations affectent-elles le fonctionnement de l'onduleur ?

Pour répondre à cette question, nous avons superposé à la tension constante de 200 V, une tension sinusoïdale de faible fréquence. La tension d'entrée a l'expression suivante :

$$V_e = 200 + 30 * \sin\left(\frac{2 * \pi * t}{5 * T_s}\right) \text{ avec } T_s \text{ la période de la sinusoïde de référence.}$$

La réponse de l'onduleur est tracée sur la figure 2.35.

Nous constatons que la valeur de la tension de sortie varie avec la tension d'entrée. Cette variation de la tension de sortie nécessite alors un asservissement de celle-ci.

II.5 CONCLUSION

Nous venons de présenter dans ce chapitre le fonctionnement du système que nous avons simulés sous Matlab with Simulink. Ce sont des modèles adaptés pour la simulation sous le logiciel Simulink.

Les résultats obtenus constituent des éléments importants pour l'étude dans le paragraphe suivant. En effet, notre objectif est de trouver une méthode de détermination de correcteurs de manière systématique et rigoureuse. Pour ce faire, l'utilisation des outils classiques de l'automatique est souhaitée d'où la nécessité de disposer de modèles mathématiques qui traduisent bien le fonctionnement des systèmes à énergie renouvelable avec des convertisseurs statiques.

La modélisation par schéma équivalent moyen qui est présentée dans le prochain chapitre constitue une étape très importante de nos études.

CHAPITRE III

MODELISATION DES ELEMENTS DU SYSTEME PAR SCHEMA EQUIVALENT MOYEN

CHAPITRE III

MODELISATION DES ELEMENTS DU SYSTEME

Dans le but de faire la simulation du système à étudier, une analyse et une synthèse du système dynamique sont à réaliser dans un premier temps [4]. Cette phase initiale permet de mettre en place des modèles traduisant le fonctionnement du système.

Il est dès lors nécessaire d'avoir une description mathématique du problème à partir des grandeurs caractéristiques du système et les relations entre celles-ci .

L'ensemble de ces relations constitue le modèle mathématique du système.

L'objectif visé est de déterminer de manière systématique, les correcteurs et régulateurs du système à partir d'outils mathématiques plutôt que de manière empirique par l'observation des résultats de la simulation. En effet, dans le domaine qui nous intéresse, la détermination des correcteurs a été souvent conduite de manière empirique.

La modélisation des convertisseurs statiques par la méthode des schémas équivalents moyens est une bonne approximation des grandeurs électriques du convertisseur [17], [18]. Les résultats obtenus nous fournissent des informations intéressantes sur l'évolution du système aux régimes transitoire et permanent.

Cette partie constitue donc un jalon important de nos études et les résultats seront confrontés à ceux obtenus avec les modèles réels pour une validation. Ces modèles que nous aurons déterminés seront traités avec les outils classiques de l'automatique. Ce sera pour l'étude de la stabilité et la recherche de performances du système.

Dans ce chapitre, nous allons donc présenter les modèles moyens des différents convertisseurs statiques utilisés dans le système.

Dans un premier temps, nous avons le hacheur dévolteur alimenté par un générateur photovoltaïque. Puis, nous présenterons le hacheur survolteur et le générateur photovoltaïque et enfin l'onduleur monophasé.

III.1 GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE - MODELE ASYMPTOTIQUE

Il est utilisé pour l'alimentation des différentes charges à travers des convertisseurs statiques pour son optimisation ou pour la transformation de l'énergie (Figure 3.1).

Le générateur photovoltaïque présente une caractéristique de fonctionnement non linéaire. Son utilisation dans des systèmes d'équations devient alors dans ce cas impossible d'où la nécessité de l'approcher par linéarisation.

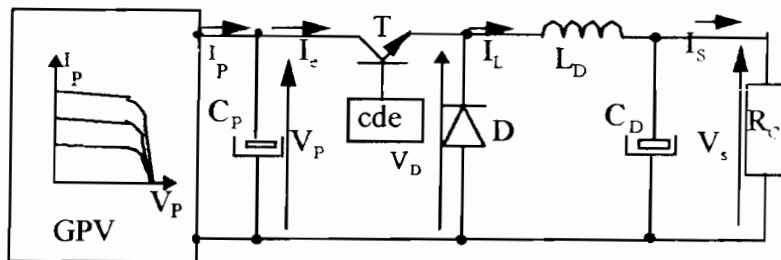


Figure 3.1 : Générateur Photovoltaïque avec un hacheur dévolteur

Le modèle du générateur est celui développé au niveau du laboratoire [19], modèle qui ne prend en compte que les caractéristiques externes des photopiles.

$$I_p = I_{cc} \left(1 - \exp \chi \left(\frac{V_p}{V_0} - 1 \right) \right) \text{ avec}$$

I_{cc} : courant de court - circuit , image de l'ensoleillement

V_0 : tension de couplage du générateur ou tension de circuit ouvert

χ facteur de forme de la courbe modèle

I_p et V_p : courant et tension du générateur.

Ce modèle est sous forme exponentielle et présente donc une non linéarité très prononcée autour du point de fonctionnement optimal. Cette non linéarité est très gênante lors de la mise en équation d'un système photovoltaïque. Le fonctionnement du système dépendant de la caractéristique sera décrit par des équations non linéaires.

De plus, pour un meilleur transfert de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque vers la charge, il est nécessaire de toujours ramener le point de fonctionnement du système autour du point optimal. Il se pose alors, pour notre étude, le problème de la linéarité des équations que nous utilisons.

Aussi, avons-nous cherché à linéariser la caractéristique du générateur photovoltaïque, en utilisant la méthode asymptotique. Il s'agit d'approcher la caractéristique par des droites dont les pentes et les limites dépendent des paramètres du générateur photovoltaïque, notamment le facteur de forme χ .

3.1.1 PRINCIPE ET MISE EN ŒUVRE DU MODELE ASYMPTOTIQUE :

Il s'agit de remplacer la courbe exponentielle par des droites asymptotiques. Chaque droite correspond à une source conventionnelle de courant ou de tension. Le nombre de branches détermine la précision de l'approximation.

Nous avons défini un algorithme permettant, en fonction des paramètres du générateur photovoltaïque et du nombre de branches souhaitées, de déterminer les droites d'approximation de la caractéristique avec une bonne précision. Nous donnons dans le tableau 1 les éléments des droites pour une tension de circuit ouvert V_O égale à 364V et un courant de court - circuit I_{CC} de 21 A.

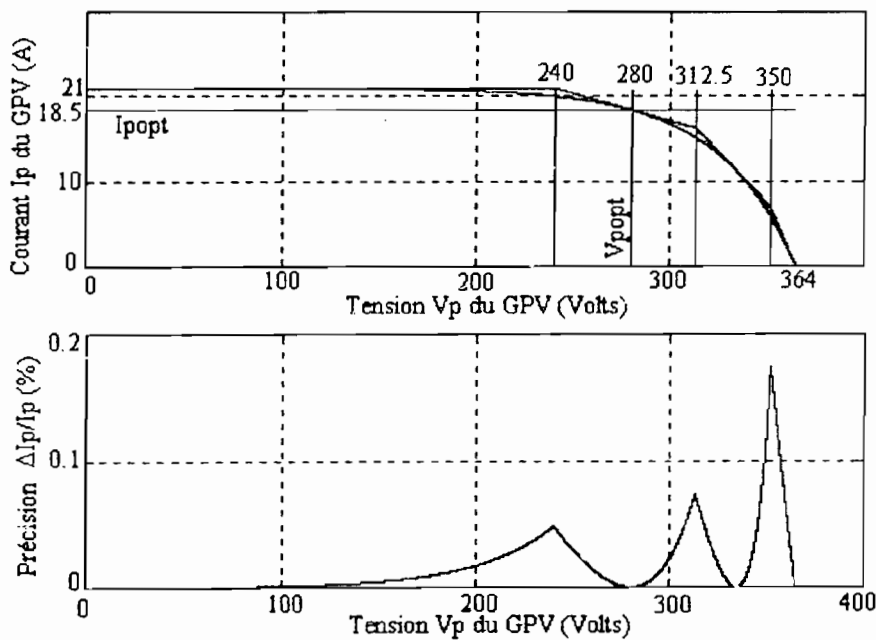


Figure 3.2 : Modèle asymptotique du Générateur photovoltaïque pour le hacheur dévolteur .

V_p	0 - 240	240 - 312.5	312.5 - 350	350 - 364
Pente K	$-6.4 \cdot 10^{-4}$	-0.065	-0.244	-0.52

Tableau 1 : Pentés des droites d'approximation

Le point de fonctionnement optimal est ($V_{\text{popt}} = 280 \text{ V}$, $I_{\text{popt}} = 18.5 \text{ A}$) et la pente de la droite passant par ce point est $K_{\text{opt}} = -0.065$.

3.1.2 EXPLOITATION DES RESULTATS

Nous avons simulé plusieurs modèles à nombre de branches donné. Le modèle à deux branches présente une erreur maximale au point de puissance optimale et ne convient pas à notre application. Aussi avons - nous cherché à utiliser plusieurs branches avec toujours une branche passant par le point de fonctionnement optimal.

Le modèle avec quatre droites donne une bonne approximation de la courbe avec une erreur relative maximale de 20 %.

Nous avons ainsi choisi la méthode d'approximation par quatre droites. Le point de fonctionnement du générateur devra alors être pris au niveau de ces droites. Cela entraîne la nécessité de faire des commutations entre les branches lors du fonctionnement.

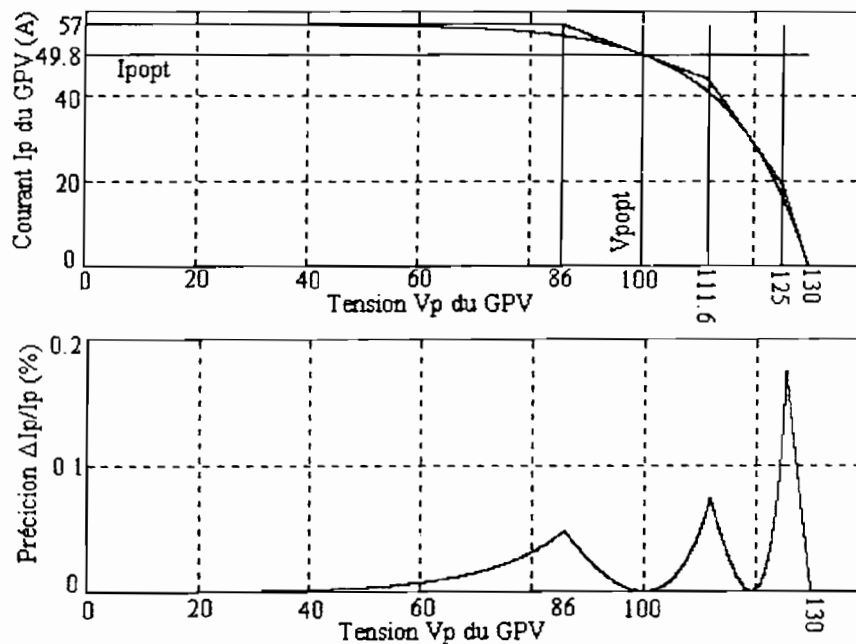


Figure 3.3 : Modèle asymptotique du Générateur photovoltaïque pour le hacheur survolteur .

V_p	0 - 86	86 - 111.6	111.6 - 125	125 - 130
Pente K	$-4.9 \cdot 10^{-3}$	-0.4975	-1.85	-3.95

Tableau 2 : Pentés des droites d'approximation

Le point de fonctionnement optimal est ($V_{\text{popt}} = 100 \text{ V}$, $I_{\text{popt}} = 49.8 \text{ A}$) et la pente de la droite passant par ce point est $K_{\text{opt}} = -0.497$.

III.2 MODELISATION PAR SCHEMA EQUIVALENT MOYEN DES CONVERTISSEURS STATIQUES

La modélisation des convertisseurs statiques continu - continu ou continu - alternatif est très complexe du fait de leur non linéarité. La configuration du circuit est périodiquement modifiée au cours du fonctionnement [17] [19], par le jeu des commutateurs électroniques qui font intervenir plusieurs configurations distinctes au cours d'une période de découpage. Pour surmonter ce problème, la linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement est primordiale. Cette linéarisation se justifie d'autant plus que les périodes de découpage habituellement rencontrées sont faibles devant les constantes de temps des convertisseurs.

L'évolution des variables (courant et tension) résulte donc de la succession cyclique dans le temps, avec la période T , de plusieurs circuits linéaires continus. Ainsi, il est possible de calculer les valeurs des variables à la fin de chaque période, de façon approchée en remplaçant le convertisseur statique par un circuit unique de même topologie dans laquelle les interrupteurs électroniques sont remplacés par des générateurs de courant ou de tension.

3.2.1 PRINCIPE GENERAL DE LA MODELISATION

Au cours de son fonctionnement, le convertisseur statique en conduction continue prend deux configurations possibles. Ces configurations se présentent comme des circuits linéaires continus. La méthode de modélisation envisagée consiste à :

- écrire les équations d'état du circuit pour chaque configuration,
- établir "l'équation moyenne" sur une période de fonctionnement,
- en déduire un schéma équivalent "continu" commun aux deux configurations.

Dans ce schéma équivalent, les commutateurs seront remplacés par des générateurs, la topologie initiale du système restant la même.

3.2.2 LE HACHEUR SERIE OU HACHEUR DEVOLTEUR

3.2.2.1 Modélisation du hacheur dévolteur

Il est placé entre une source de tension ou de courant continue et un récepteur continu de tension ou de courant. Lorsque la charge fonctionne avec une tension inférieure à celle de la source, le hacheur permet alors d'abaisser la tension d'entrée pour la rendre compatible avec celle de la charge. Son schéma de base est donnée sur la figure 3.4.

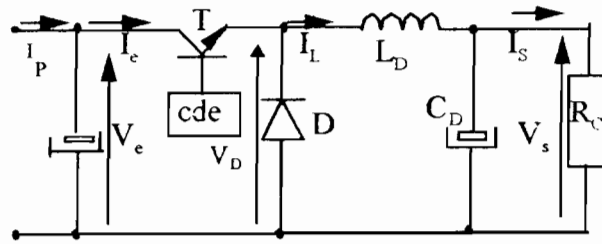


Figure 3.4 : Le hacheur dévolteur

Pour $0 < t < \mathcal{R}T_C$, nous avons la première configuration (Figure 3.5) qui est défini par les équations suivantes :

$$V_D = V_e = L_D \frac{dI_L}{dt} + V_s$$

$$I_L = I_e = C_D \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R_C}$$

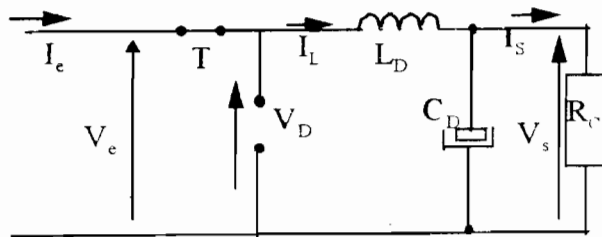


Figure 3.5 : Première configuration

Pour $\mathcal{R}T < t < TC$, nous avons la deuxième configuration (Figure 3.6) définie par les équations suivantes :

$$V_D = 0 = L_D \frac{dI_L}{dt} + V_s$$

$$I_e = 0$$

$$I_L = C_D \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R_C}$$

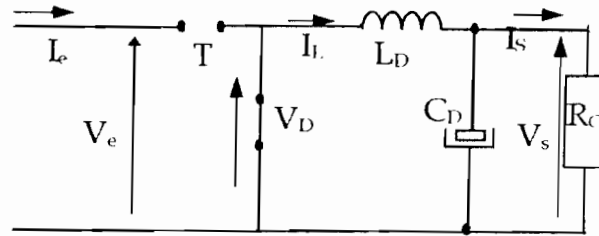


Figure 3.6 : Deuxième configuration

La moyenne temporelle des équations nous donne :

$$V_D = \mathfrak{R} V_e$$

$$I_e = \mathfrak{R} I_L$$

Le schéma équivalent moyen du hacheur dévolteur est donné sur la figure 3.7.

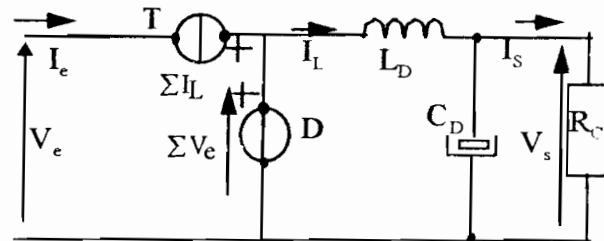


Figure 3.7 : Schéma équivalent moyen du hacheur dévolteur

3.2.2.2 Association du hacheur dévolteur et du générateur photovoltaïque

A partir des modèles du générateur photovoltaïque et du hacheur dévolteur, nous en déduisons le schéma global du système. Cela nous permet d'avoir une configuration unique de fonctionnement (Figure 3.8).

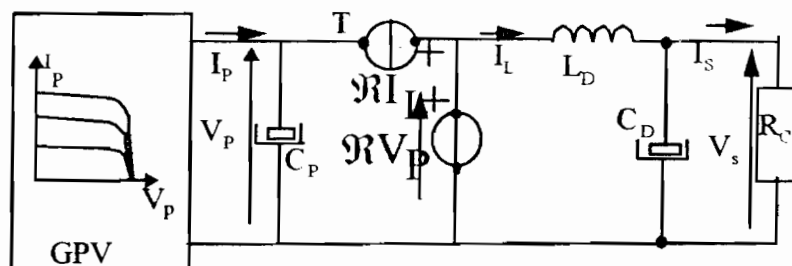


Figure 3.8 : Modèle par schéma équivalent moyen du hacheur dévolteur

3.2.2.2.1 Mise en équations du système.

Le système est composé des variables d'état suivantes V_p , I_L , et V_s . Ces variables d'état sont les grandeurs ne devant pas subir de discontinuité et sont définies par les tensions aux bornes des condensateurs et des courants dans les bobines.

Pour les variables d'entrée, nous avons le courant de court-circuit I_{cc} qui est l'image de l'ensoleillement, la commande \mathfrak{R} du hacheur dévolteur

Les variables de sortie sont définies par V_p , V_s et I_p .

Nous avons alors les équations suivantes pour le système.

* le GPV : le courant photovoltaïque délivré par le GPV est donné par I_p et le courant injecté

$$\text{dans le hacheur est } C_p \frac{\Delta V_p}{\Delta t} = I_p - \mathfrak{R} I_L \quad (1)$$

* Pour le hacheur dévolteur, les équations le régissant sont :

$$L_D \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \mathfrak{R} V_p - V_S \quad (2)$$

$$C_D \frac{\Delta V_S}{\Delta t} = I_L - I_S \quad (3)$$

$$I_S = \frac{V_S}{R_C} \quad (4)$$

Le courant du générateur photovoltaïque est donné par :

$$I_p = I_{p_{opt}} + A_p (V_p - V_{p_{opt}})$$

avec $(V_{p_{opt}}, I_{p_{opt}})$ coordonnées du point de fonctionnement optimal et A_p la pente de la droite d'approximation de la caractéristique du générateur photovoltaïque. A_p dépendant de l'ensoleillement est donc variable au cours de la journée.

Le point de fonctionnement (V_{p0}, I_{p0}) sera pris sur cette droite dans les limites définies suivant le graphique de la figure 3.2.

$$I_p = I_{p_{opt}} + A_p (V_p - V_{p_{opt}}), \quad \text{avec } 240V \leq V_p \leq 312.5V, \quad V_{p0} = 280V \quad \text{et} \quad I_{p_{opt}} = 18.5A \quad \text{lorsque}$$

$$V_0 = 364 \text{ V} \quad \text{et} \quad I_{cc} = 21A.$$

En introduisant une variation au niveau de V_p , nous avons :

$$I_p + i_p = I_{p_{opt}} + (A_{p0} + a_p) (V_{p0} + v_p - V_{p_{opt}})$$

En posant $I_{p0} = I_{p_{opt}} + A_{p0}(V_{p0} - V_{p_{opt}})$ nous avons une faible variation autour de I_{p0} et cette

$$\text{variation est donnée par } i_p = a_p (V_{p0} - V_{p_{opt}}) + A_{p0} v_p + a_p v_p$$

Nous supposons que la pente au point optimal ne dépend que de l'ensoleillement car nous savons que la tension optimale varie très peu en fonction de l'ensoleillement. Donc à partir de

l'expression donnant a_p , nous en déduisons qu'une variation de l'ensoleillement va entraîner une variation de la pente de la droite optimale. Cette pente est donnée par :

$$A_p = \left(\frac{dI_p}{dV_p} \right)_{V_p = V_{popt}}$$

$$A_p = -\frac{\chi I_{cc}}{V_0} \exp \left[\chi \left(\frac{V_{popt}}{V_0} - 1 \right) \right].$$

Soit la constante K définie par $K = -\frac{\chi}{V_0} \exp \left[\chi \left(\frac{V_{popt}}{V_0} - 1 \right) \right]$, nous avons $A_p = KI_{cc}$ soit pour

une variation de l'ensoleillement, $A_p = K(I_{cc0} + i_{cc})$.

A partir de $I_p = I_{p0} + a_p(V_{p0} - V_{popt}) + A_{p0}v_p + a_p v_p$ nous avons alors

$I_p = I_{p0} + K(V_{p0} - V_{popt})i_{cc} + KI_{cc0}v_p + Ki_{cc}v_p$. Nous en déduisons l'expression de i_p

donnée par : $i_p = I_p - I_{p0}$ donc $i_p = KI_{cc0}v_p + K(V_{p0} - V_{popt})i_{cc}$, nous avons considéré que le terme du second ordre contribue peu à la variation du courant.

3.2.2.2.2 Linéarisation des équations

Pour utiliser les outils de l'automatique, il faut que le système soit constitué d'équations linéaires. Ainsi, autour d'un point de fonctionnement, nous introduisons des variations des grandeurs suffisamment faibles pour permettre une approximation linéaire [4][20].

Soit le point de fonctionnement défini par $V_{p0}, I_{p0}, V_{D0}, V_{S0}, I_{L0}, A_0, I_{cc0}$;

Les variations algébriques autour de ces grandeurs sont $v_p, i_p, v_s, i_L, \alpha, i_{cc}$;

Nous avons alors :

$$\mathfrak{R} = \alpha_0 - \alpha \quad V_p = V_{p0} + v_p \quad I_p = I_{p0} - i_p \quad I_L = I_{L0} - i_L$$

$$V_S = V_{S0} - v_S \quad I_{cc} = I_{cc0} - i_{cc}$$

En remplaçant les grandeurs ainsi définies dans les équations de fonctionnement du système, nous avons :

$$C_p \frac{\Delta(V_{p0} + v_p)}{\Delta t} = I_{p0} - i_p + (\alpha_0 - \alpha)(I_{L0} - i_L)$$

En retranchant des relations les grandeurs caractéristiques du point de fonctionnement, en négligeant les termes du second ordre, et en passant à la limite, nous avons alors :

$$\frac{dv_p}{dt} = -\frac{KI_{cc0}}{C_p} v_p + \frac{\alpha_0}{C_p} i_L + \frac{I_{L0}}{C_p} \alpha - \frac{K(V_{p0} - V_{popt})}{C_p} i_{cc}$$

Nous utilisons le même principe que précédemment pour les autres équations

$$L_D \frac{\Delta(I_{L0} - i_L)}{\Delta t} = V_{S0} - v_S + (\alpha_0 - \alpha)(V_{p0} + v_p),$$

d'où :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{\alpha_0}{L_D} v_p + \frac{1}{L_D} v_S + \frac{V_{p0}}{L_D} \alpha$$

$$C_D \frac{\Delta(V_{S0} - v_S)}{\Delta t} = I_{L0} - i_L - \frac{V_{S0} - v_S}{R_C}$$

$$\frac{dv_S}{dt} = -\frac{v_S}{R_C C_D} + \frac{1}{C_D} i_L$$

Nous obtenons alors le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{dv_p}{dt} = -\frac{KI_{cc0}}{C_p} v_p + \frac{\alpha_0}{C_p} i_L + \frac{I_{L0}}{C_p} \alpha - \frac{K(V_{p0} - V_{popt})}{C_p} i_{cc}$$

$$\frac{dv_S}{dt} = -\frac{v_S}{R_C C_D} + \frac{1}{C_D} i_L$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{\alpha_0}{L_D} v_p + \frac{1}{L_D} v_S + \frac{V_{p0}}{L_D} \alpha$$

$$i_p = K I_{cc0} v_p + K(V_{p0} - V_{popt}) i_{cc}$$

3.2.2.2.3 Ecriture matricielle des équations d'état

Soit X le vecteur d'état, U le vecteur d'entrée, Y le vecteur de sortie, A la matrice fondamentale, B la matrice d'entrée, C la matrice de sortie et D la matrice de passage :

$$X = \begin{bmatrix} v_p \\ v_S \\ i_L \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} \alpha \\ i_{cc} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} v_p \\ v_S \\ i_p \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{KI_{cc0}}{C_p} & 0 & \frac{\alpha_0}{C_p} \\ 0 & -\frac{1}{R_c C_D} & \frac{1}{C_D} \\ -\frac{\alpha_0}{L_D} & \frac{1}{L_D} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} I_{L0} & -K(V_{p0} - V_{popt}) \\ C_p & C_p \\ 0 & 0 \\ V_{p0} & 0 \\ L_D & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ KI_{cc0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K(V_{p0} - V_{popt}) \end{bmatrix}$$

3.2.3 LE HACHEUR PARALLELE OU HACHEUR SURVOLTEUR

3.2.3.1 Modélisation du hacheur survolteur

Comme le hacheur dévolteur, il est utilisé pour adapter la tension du troisième générateur à la tension du noeud continu. Son schéma de principe est donné sur la figure 3.9.

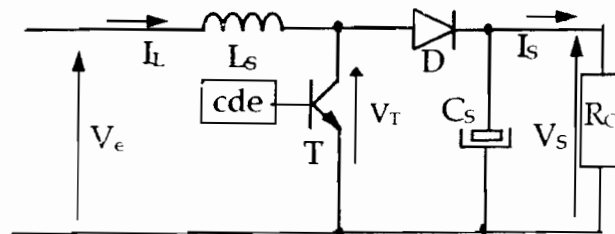


Figure 3.9 : Le hacheur survolteur

Les deux configurations prises par le hacheur lors de son fonctionnement sont données sur les figures 3.10 et figure 3.11.

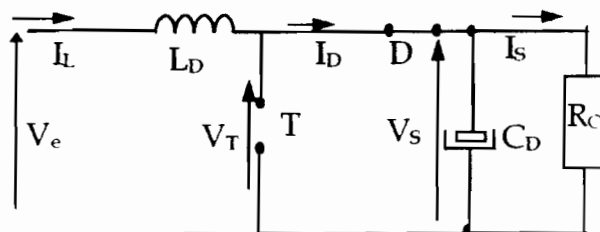


Figure 3.10 : Première configuration

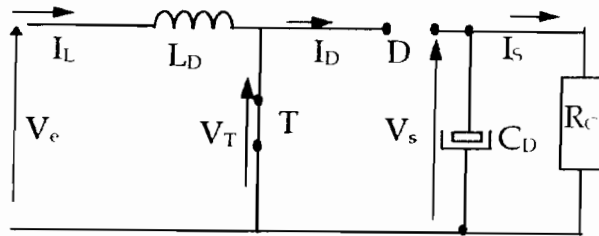


Figure 3.11 : Deuxième configuration

Pour $0 < t < \mathfrak{R}T_c$, nous avons la première configuration (Figure 3.10) définie par :

$$V_T = V_S$$

$$I_D = I_L$$

Pour $\mathfrak{R}T < t < T_c$, nous avons la deuxième configuration (Figure 3.10) définie par :

$$V_T = 0$$

$$I_D = 0$$

La moyenne temporelle des équations nous donne :

$$V_T = \mathfrak{R}V_S$$

$$I_D = \mathfrak{R}I_L$$

Le schéma équivalent moyen du hacheur dévolteur est donné sur la figure 3.12.

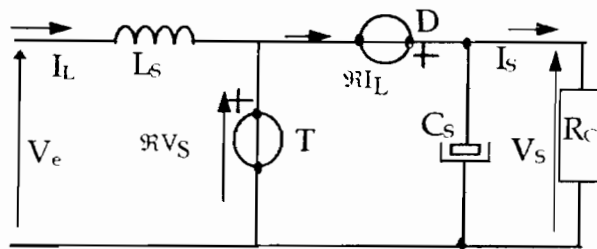


Figure 3.12 : Schéma équivalent moyen du hacheur survolteur

3.2.3.2 Association du hacheur survolteur et du générateur photovoltaïque

A partir des modèles du générateur photovoltaïque et du hacheur survolteur, nous en déduisons le schéma global du système. Cela nous permet d'avoir une configuration unique de fonctionnement (Figure 3.13).

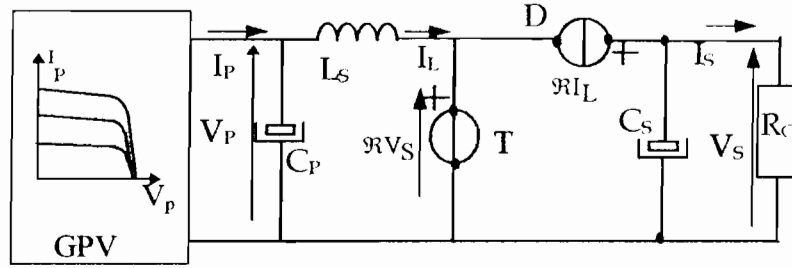


Figure 3.13 : Schéma équivalent moyen du hacheur survolteur avec le générateur photovoltaïque

3.2.3.2.1 Mise en équations du système.

Le générateur photovoltaïque est toujours approché par quatre droites suivant le graphique (Figure 3.3). Le point de fonctionnement sera sur la droite définie par les limites $85.7V < V_p < 112V$, avec $V_{popt} = 100V$, $I_{popt} = 49.8A$, $I_{cc} = 57A$ et $V_O = 130V$.

Les équations régissant le fonctionnement du système sont:

$$C_p \frac{\Delta V_p}{\Delta t} = I_p - I_L \quad (1)$$

$$L_D \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = V_p - \mathfrak{R}V_S \quad (2)$$

$$C_D \frac{\Delta V_S}{\Delta t} = \mathfrak{R}I_L - I_S \quad (3)$$

$$I_S = \frac{V_S}{R_C} \quad (4)$$

Après traitement de ces équations, nous obtenons alors le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{K I_{cc0}}{C_p} v_p + \frac{1}{C_p} i_L - \frac{K(V_{p0} - V_{popt})}{C_p} i_{cc}$$

$$\frac{dv_S}{dt} = -\frac{v_S}{R_C C_S} + \frac{1}{C_S} i_L + \frac{I_{L0}}{C_S} \alpha$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L_S} v_p - \frac{\alpha_0}{L_S} v_S - \frac{V_{S0}}{L_S} \alpha$$

$$i_p = K I_{cc0} v_p + K(V_{p0} - V_{popt}) i_{cc}$$

3.2.3.2.2 Ecriture matricielle des équations d'état

Soit X le vecteur d'état, U le vecteur d'entrée, Y le vecteur de sortie, A la matrice fondamentale, B la matrice d'entrée, C la matrice de sortie et D la matrice de passage :

$$X = \begin{bmatrix} v_p \\ v_s \\ i_L \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} \alpha \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} v_p \\ v_s \\ i_p \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{KI_{cc0}}{C_p} & 0 & \frac{1}{C_p} \\ 0 & -\frac{1}{R_C C_S} & \frac{\alpha_0}{C_S} \\ -\frac{1}{L_S} & -\frac{\alpha_0}{L_S} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K(V_{p0} - V_{popt})}{C_p} \\ 0 & 0 \\ -\frac{I_{L0}}{L_S} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ KI_{cc0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K(V_{p0} - V_{popt}) \end{bmatrix}$$

3.2.4 MODELISATION DE L'ONDULEUR MONOPHASE

Le schéma de l'onduleur monophasé est donné sur la figure 3.14.

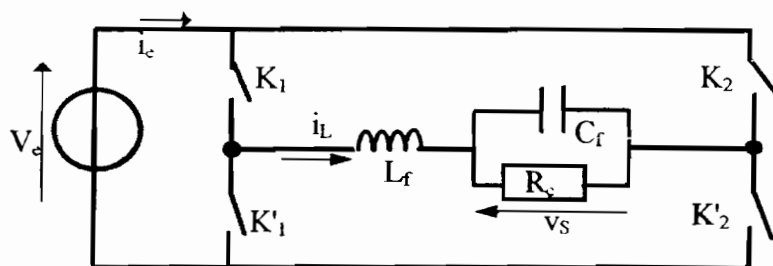


Figure 3.14 : Schéma de principe de l'onduleur monophasé

3.2.4.1 Schéma équivalent moyen de l'onduleur, mise en équation

Le fonctionnement de l'onduleur est une succession de différentes configurations électriques (Figures 3.15 à 3.18). En effet, suivant le jeu des commutations, nous avons :

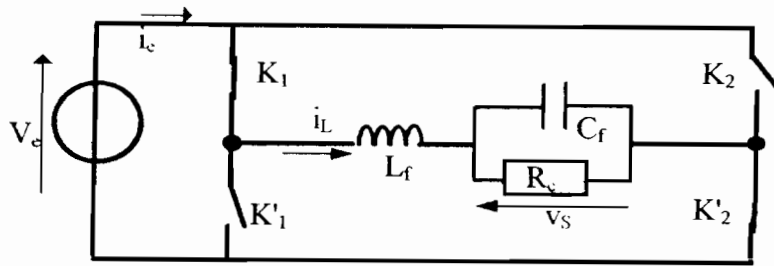


Figure 3.15 : Première configuration de l'onduleur monophasé (alternance positive de la référence)

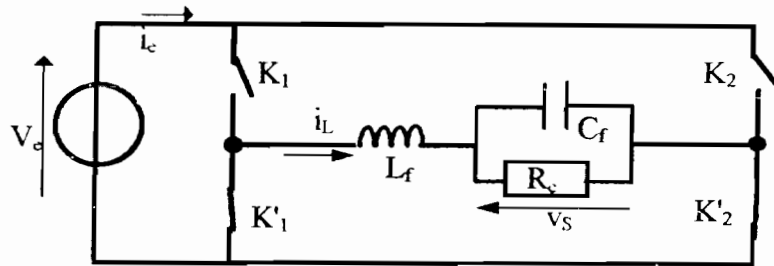


Figure 3.16 : Deuxième configuration de l'onduleur monophasé (alternance positive de la référence)

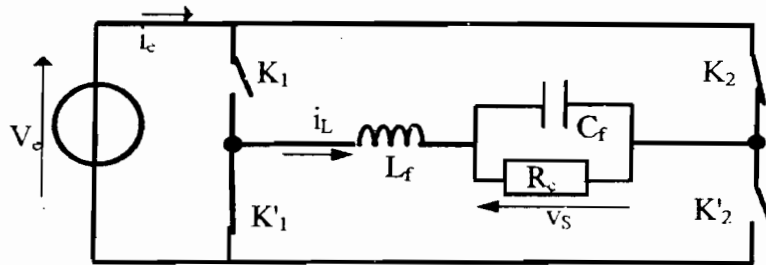


Figure 3.17 : Troisième configuration de l'onduleur monophasé (alternance négative de la référence)

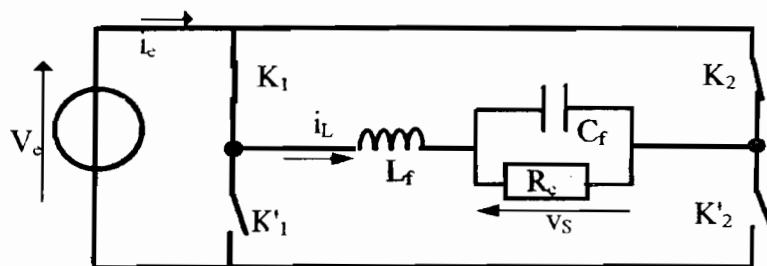


Figure 3.18 : Troisième configuration de l'onduleur monophasé (alternance négative de la référence)

La mise en équation du fonctionnement des différentes configurations aboutit à un schéma équivalent moyen (Figure 3.19) :

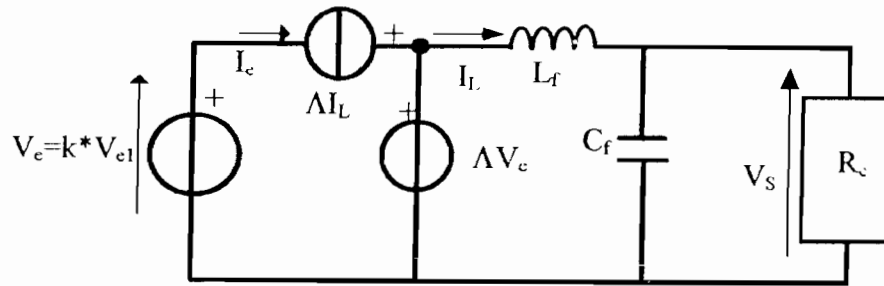


Figure 3.19 : Schéma équivalent moyen de l'onduleur monophasé

A chaque demi - période du signal de référence, l'onduleur peut être assimilé à un hacheur, d'où une similitude avec les études précédentes.

Sur le schéma de la figure 3.19, le coefficient k permet de tenir compte de l'alternance du signal de référence.

$k = 1$ pour l'alternance positive de la référence

$k = -1$ pour l'alternance négative de la référence

L'onduleur monophasé est un élément essentiel de notre dispositif. Il constitue l'interface entre les générateurs et le réseau. Il doit donc fournir à la sortie un signal compatible avec le réseau.

Nous avons un transformateur entre l'onduleur et le réseau (Figure 3.20).

Le fonctionnement de l'onduleur est supposé parfait. De plus, nous allons considérer son fonctionnement pendant une alternance comme étant similaire à celui d'un hacheur.

L'étude de l'onduleur va donc être ramenée à celle d'un hacheur. Les correcteurs qui seront déterminés devront par conséquent être adaptatifs car nous n'avons plus un seul point de fonctionnement pour un régime permanent.

En tenant compte du transformateur, nous avons le schéma équivalent moyen de l'onduleur (Figure 3.20)

Le transformateur est défini par son inductance magnétisante L_m en parallèle avec sa résistance R_m , la résistance R_p et l'inductance L_p des enroulements et son rapport de transformation m .

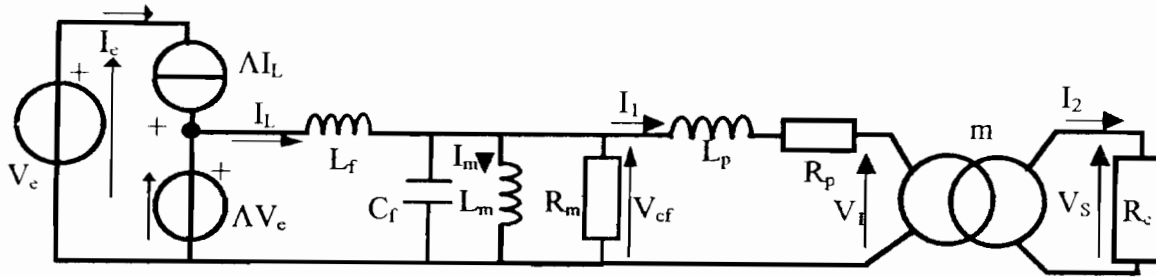


Figure 3.20 : Modèle de l'onduleur pendant une demi alternance

Nous avons quatre variables d'état (V_{cf} , I_m , I_1 et I_L) et notre objectif est de réguler la tension de sortie V_s de l'onduleur.

La mise en équations du fonctionnement de l'onduleur est donné par :

$$\Delta V_e = L_f \frac{\Delta I_L}{\Delta t} + V_{cf}, \Lambda \text{ étant le rapport cyclique de la commande}$$

$$V_{cf} = L_m \frac{\Delta I_m}{\Delta t}$$

$$I_L = C_f \frac{\Delta V_{cf}}{\Delta t} + I_m + \frac{V_{cf}}{R_m} + I_1$$

$$V_{cf} - V_1 = L_p \frac{\Delta I_1}{\Delta t} + R_p I_1$$

3.2.4.2 Linéarisation des équations

Pour utiliser les outils de l'automatique, il faut que le système soit constitué d'équations linéaires. Ainsi, autour d'un point de fonctionnement, nous introduisons des variations des grandeurs suffisamment faibles pour permettre une approximation linéaire.

Soit le point de fonctionnement défini par V_{s0} , I_{20} , V_{10} , I_{L0} , Λ_0 , V_{e0} , I_{10} , V_{cf} , I_{m0} , Λ_0 ;

Les variations algébriques autour de ces grandeurs sont v_e , v_s , v_{cf} , v_1 , i_L , i_1 , i_m , λ ;

Nous avons alors :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{v_{cf}}{L_f} + V_{e0}\lambda + \lambda_0 v_e$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{v_{cf}}{L_m}$$

$$\frac{dv_{cf}}{dt} = \frac{i_L}{C_f} - \frac{i_m}{C_f} - \frac{v_{cf}}{R_m C_f} - \frac{i_1}{C_f}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{cf}}{L_p} + \frac{v_l}{L_p} + \frac{R_p i_l}{L_p}$$

3.2.4.3 Ecriture matricielle des équations d'état

Soit X le vecteur d'état, U le vecteur d'entrée, Y le vecteur de sortie, A la matrice fondamentale, B la matrice d'entrée, C la matrice de sortie et D la matrice de passage on a :

$$X = \begin{bmatrix} v_{cf} \\ i_L \\ i_l \\ i_m \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} v_e \\ v_l \\ \lambda \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} v_s \\ v_{cf} \\ i_L \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_m C_f} & \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} \\ -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_p} & 0 & -\frac{R_p}{L_p} & 0 \\ \frac{1}{L_m} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \lambda_0 & 0 & V_{e0} \\ 0 & -\frac{1}{L_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

III.3 SIMULATION DES MODELES PAR SCHEMA EQUIVALENT MOYEN

La simulation des modèles moyens définis au paragraphe III-2 sera appliquée autour de points tirés des résultats de fonctionnement réel du système. En effet, dans le chapitre précédent, nous avons réalisé la simulation du système réel non régulé. Une comparaison des résultats de ces deux chapitres nous permet donc de voir la nécessité de chercher les régulateurs à partir des modèles mathématiques de ce chapitre.

3.3.1 FONCTIONNEMENT DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE AVEC HACHEUR DEVOLTEUR

Les résultats de la simulation du modèle par schéma équivalent moyen de ce sous - système sont présentés sur les figures 3.20 et 3.21.

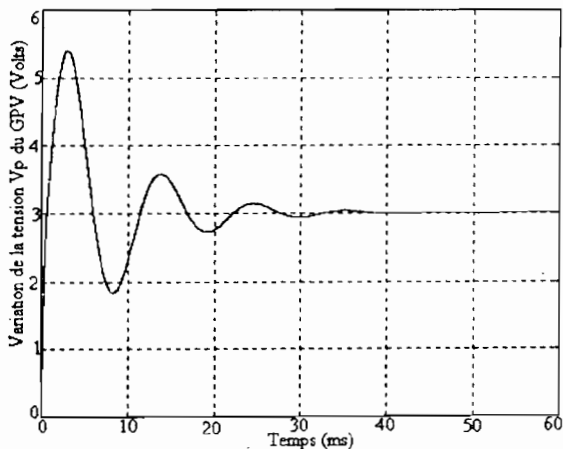
3.3.1.1 Exploitation des résultats

Le système est oscillatoire au régime transitoire avec une fréquence de 125 Hz. Le dépassement est de 2.5 en valeur absolue ce qui correspond à 80 % en valeur relative à la valeur au régime permanent.

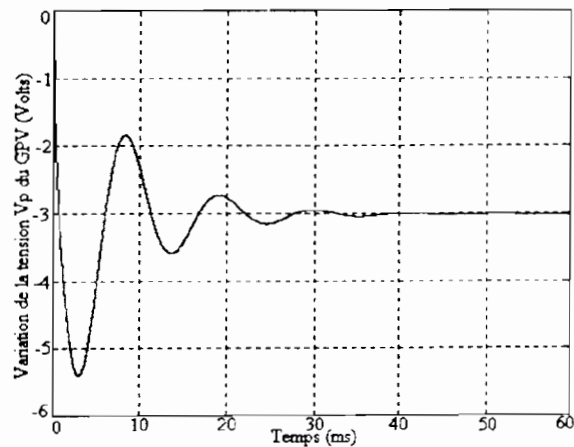
Au régime permanent, la variation du point de fonctionnement est de 3 Volts en valeur absolue. Ceci correspond en valeur relative à la tension du générateur photovoltaïque à 1.07%, pour une variation de 1 % du rapport cyclique

Les variations de la tension du générateur photovoltaïque augmentent avec l'accroissement de l'amplitude de la variation du rapport cyclique.

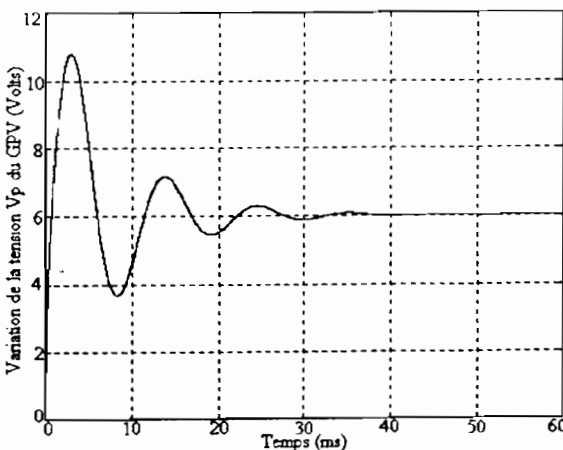
La forme de l'onde est identique pour toutes les variations du rapport cyclique.



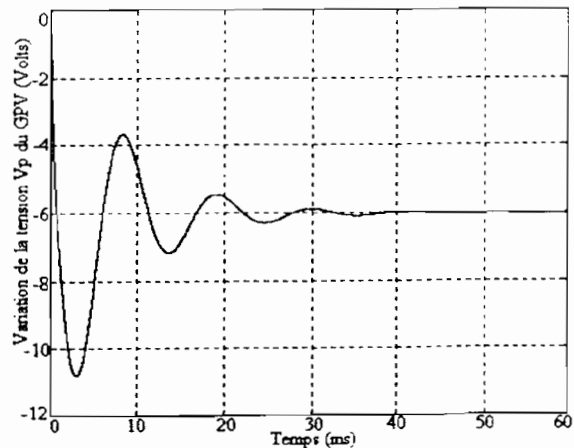
a) Diminution de 0.01



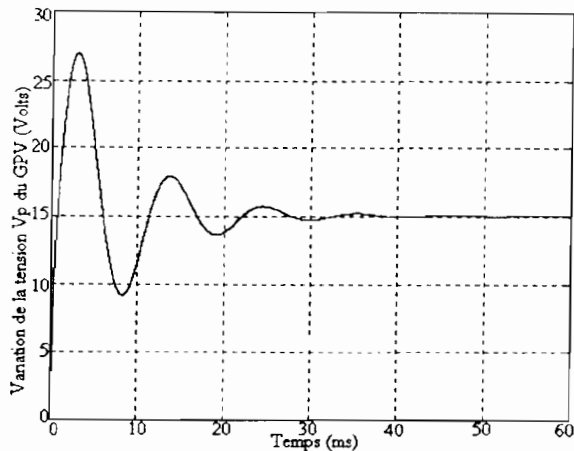
b) augmentation de 0.01



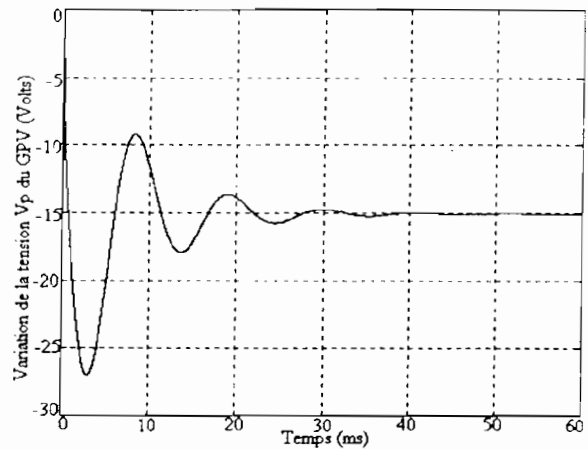
c) Diminution de 0.02



d) augmentation de 0.02

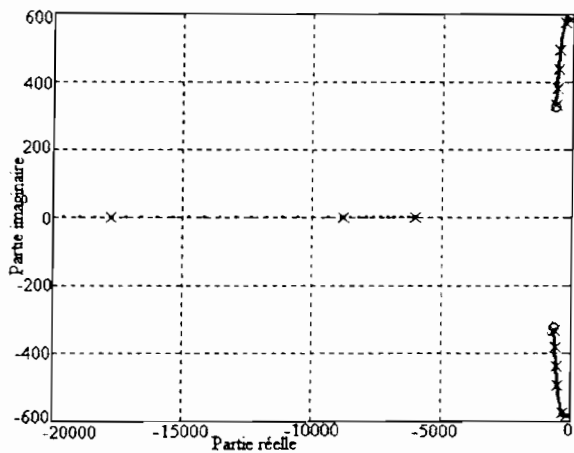


e) Diminution de 0.05

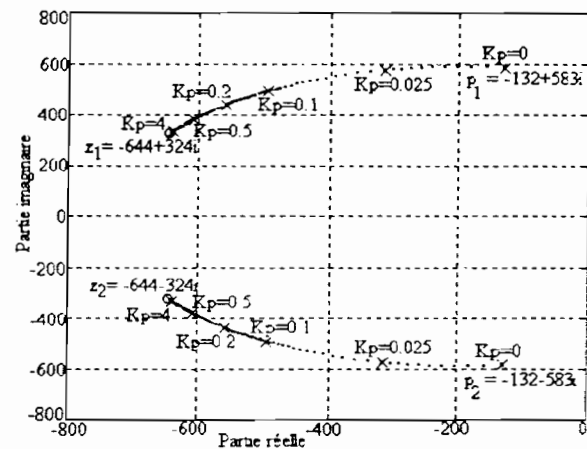


f) augmentation de 0.05

Figure 3.21 : Réponse de la tension V_p du générateur photovoltaïque à un échelon de rapport cyclique



a) Evolution des 3 pôles



b) Evolution des 2 pôles complexes conjugués

Figure 3.22. Lieu d'Evans du système Hacheur dévolteur et Générateur photovoltaïque

Le lieu d'Evans est constitué de la variation de trois pôles et de deux zéros fixes.

Tous les pôles et zéros sont à partie réelle négative d'où donc la stabilité du système en fonctionnement.

L'existence de deux pôles complexes conjugués est à l'origine de l'oscillation observée sur les réponses indicielles.

Lorsqu'en boucle fermée, nous faisons varier le gain, nous avons les pôles complexes conjugués qui convergent vers les zéros.

Ces remarques nous permettent donc de trouver des correcteurs qui devront donner au système une réponse optimale, c'est-à-dire avec une seule oscillation au régime transitoire.

3.3.1.2 Comparaison avec les résultats du système réel

Nous avons une grande similitude entre les résultats de la simulation du modèle par schéma équivalent moyen et du système en fonctionnement réel.

Au régime transitoire, le premier dépassement a même valeur et la fréquence d'oscillation est de 125 Hz.

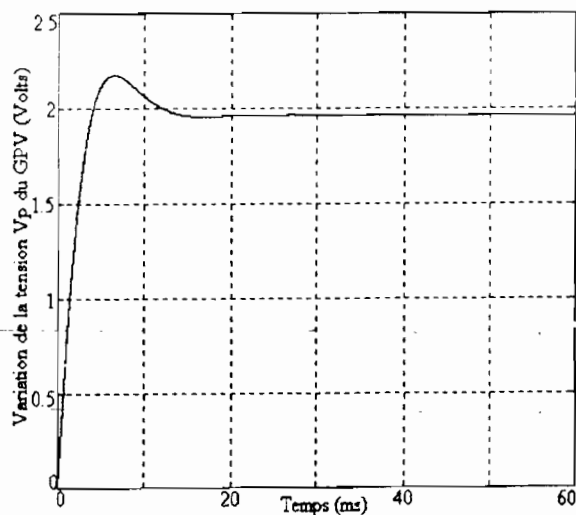
Au régime permanent, il y a un volt de différence en valeur absolue mais en valeur relative, elle est négligeable.

A partir des résultats de la comparaison, nous pouvons donc utiliser le modèle par schéma équivalent moyen pour déterminer les régulateurs nécessaires au fonctionnement du sous - système constitué du hacheur dévolteur et du générateur photovoltaïque.

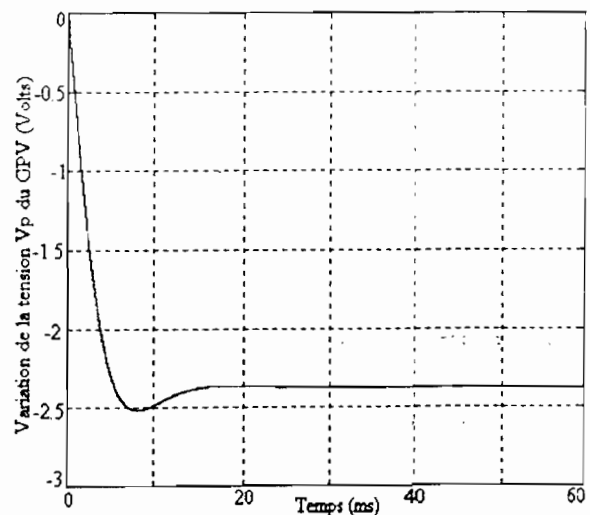
3.3.2 FONCTIONNEMENT DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE AVEC HACHEUR SURVOLTEUR

Nous donnons sur les figures 3.23, les résultats de la simulation du modèle par schéma équivalent moyen du sous système constitué du générateur photovoltaïque et hacheur survolteur.

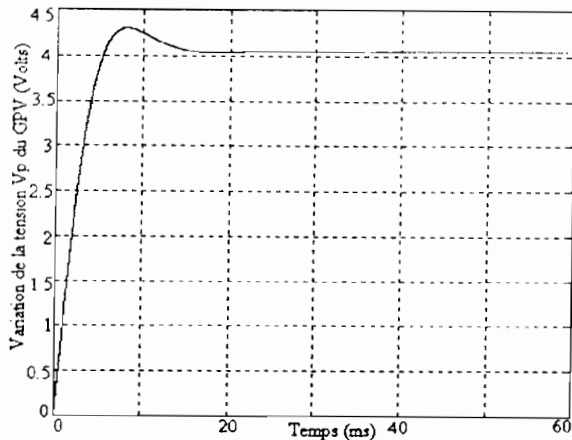
3.3.2.1 Exploitation des résultats



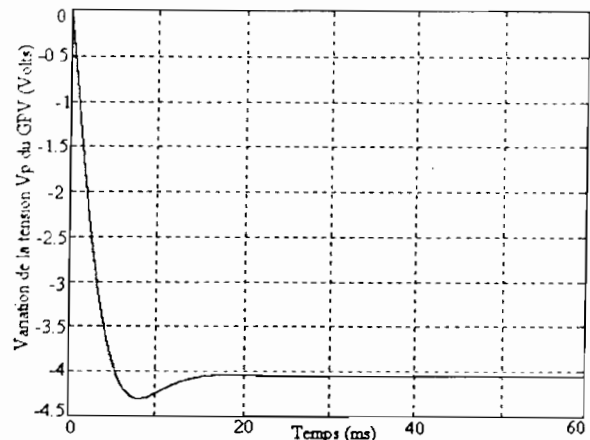
a) Diminution de 0.01



b) augmentation de 0.01

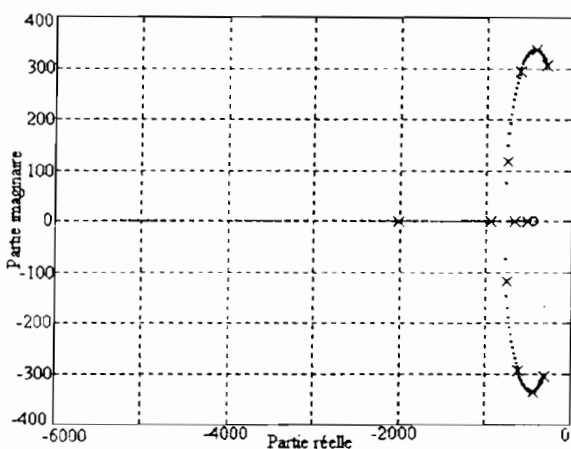


a) Diminution de 0.02

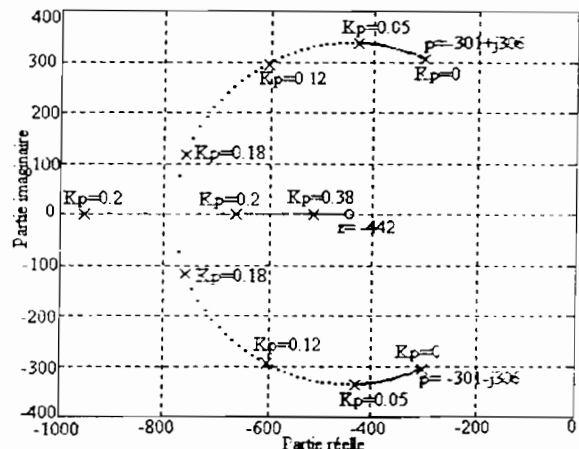


b) augmentation de 0.02

Figure 3.23 : Réponse de la tension V_p du générateur photovoltaïque à un échelon de rapport cyclique



a) Evolution des 3 pôles



b) Evolution des 2 pôles complexes conjugués

Figure 3.24. Lieu d'Evans du système Hacheur survolteur et Générateur photovoltaïque

Régime transitoire

Le fonctionnement est surtout caractérisé par un comportement similaire à un système du second ordre avec un dépassement faible. Le temps de réponse (pour avoir la tension dans un intervalle 5 % de la valeur finale) est très long. Il est de l'ordre de 15 ms.

Ce temps de réponse devra alors être amélioré. En effet, le système devant comporter un onduleur fonctionnant avec la période de 20 ms, il faudra nécessairement que les temps de réponses des hacheurs soient faibles devant cette période.

On constate également ici une similitude presque parfaite entre le fonctionnement du sous système réel et de son modèle par schéma équivalent moyen linéarisé.

CHAPITRE IV

ETUDE DES REGULATEURS - OPTIMISATION DU TRANSFERT D'ENERGIE

CHAPITRE IV

ETUDE DES REGULATEURS - OPTIMISATION DU TRANSFERT D'ENERGIE

Ce chapitre présente les résultats des correcteurs déterminés de manière systématique. Cette méthode permet aujourd'hui une détermination plus aisée et plus rapide des correcteurs avec un gain de temps assez substantiel.

Dans le chapitre précédent, nous avons montré la possibilité d'utiliser les modèles par schéma équivalent moyen pour étudier le système. Aussi, allons - nous dans ce chapitre présenter les différents régulateurs pour l'optimisation des différents générateurs. Nous y développons aussi le couplage des générateurs par un condensateur en lieu et place de la station de batterie de stockage d'énergie.

La centrale que nous voulons mettre en place comporte des puissances des générateurs dont il faut optimiser le transfert d'énergie, par des hacheurs et la tension de sortie de l'onduleur de tension à réguler. Ainsi, nous avons à réguler :

- la tension V_p des générateurs photovoltaïques
- la tension de sortie V_s de l'onduleur de tension pour que cette dernière soit compatible avec celle du réseau.

IV.1 ETUDE DES REGULATEURS DES GENERATEURS

Pour une optimisation du transfert d'énergie entre les générateurs et la charge, nous cherchons à faire fonctionner le système avec une puissance maximale des générateurs. Toute perturbation devrait alors être corrigée pour ramener le générateur à fonctionner autour de son point optimal [20].

La régulation sera basée sur une référence de tension correspondant à la tension optimale du générateur photovoltaïque . En effet, nous avons montré dans le chapitre 2 que la tension optimale du générateur photovoltaïque était constante et qu'elle pouvait être utilisée comme référence.

4.1.1 PRINCIPE DE LA DETERMINATION DES CORRECTEURS

Le correcteur utilisé est du type Proportionnel et Intégral (PI). Il a été déterminé à partir de l'étude dans le lieu d'Evans. Cette étude dans le plan complexe est une méthode directe basée sur l'équation différentielle régissant le fonctionnement du système, pour les grandeurs d'entrée de type déterministe [21].

Cette méthode nous permet d'étudier le régime transitoire et permanent de manière qualitative et quantitative. Elle utilise pleinement les possibilités de l'outil mathématique qu'est la transformée de Laplace.

Le principe est basé sur le choix de pôles et de zéros du correcteur de telle manière qu'après correction, le système ait un comportement voisin de celui du deuxième ordre. Les pôles occupent dans le plan complexe les positions qui assurent la forme spécifique de la réponse indicielle ou impulsionnelle.

L'objectif est d'obtenir une forme du régime libre et une durée de réglage convenables. Il faut alors satisfaire les contraintes suivantes :

- * le système doit être stable
- * annulation de l'erreur de position et imposition de l'erreur de vitesse.
- * la réponse impulsionnelle ou indicielle doit être apériodique ou oscillatoire optimale c'est-à-dire que cette réponse ne doit comprendre qu'une seule oscillation (Figure 4.1).
- * la rapidité de réponse est aussi un critère très important.

Nous cherchons dans ce chapitre à rendre le système corrigé à pôles dominants avec une réponse impulsionnelle oscillatoire optimale.

Si p et p^* sont les pôles dominants conjugués, nous avons alors les relations suivantes :

$p = -\delta + j\omega_0$ et $p^* = -\delta - j\omega_0$ où ω_0 est la pulsation propre du régime libre et δ le facteur d'amortissement.

Ces deux paramètres permettent de définir la pulsation propre non amortie du système par $\omega_n = \sqrt{\delta^2 + \omega_0^2}$

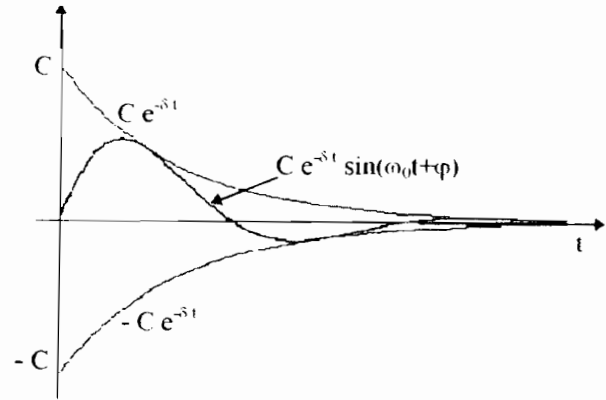
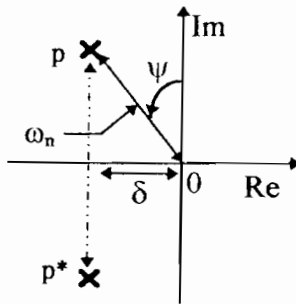


Fig : 4.1.1 : Position dans le plan complexe Fig 4.1.2 : Réponse oscillatoire optimale

Figure 4.1 : Pôles dominants

Dans ces conditions, la fonction de transfert du correcteur à action proportionnelle et intégrale PI est donnée par la relation :

$$G_c = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{1 + sT_n}{sT_i} = k_c \frac{s - z_i}{s}$$

Procédure de détermination du correcteur

La procédure utilisée permet de déterminer de manière systématique les coefficients du correcteur.

Cette procédure a été programmée sous Matlab with Simulink (Figure 4.2) et il suffit de donner les paramètres des performances souhaitées pour obtenir le temps de réponse.

Introduction des éléments du système
Donner les performances souhaitées
Traitement des matrices d'état
Conversion matrices d'état en fonction de transfert
Détermination des coefficients du correcteur

Figure 4.2 : Organigramme de recherche du correcteur

Le programme détermine alors le lieu des pôles et des zéros et calcule les pôles et zéros du correcteur. Il en déduit alors les coefficients K_P et K_I du correcteur.

4.1.2 CORRECTEUR DU SOUS - SYSTEME AVEC HACHEUR DEVOLTEUR

L'objectif visé est l'optimisation du transfert d'énergie du générateur photovoltaïque à la charge. Avec le correcteur la réponse du système doit satisfaire les conditions posées au paragraphe 4.1.1.

La fonction de transfert du système est définie par :

$$H_d(s) = 6.2 * 10^4 \frac{s^2 + 1.3 * 10^3 s + 5.2 * 10^5}{s^3 + 6.3 * 10^3 s^2 + 1.94 * 10^6 s + 2.15 * 10^9}$$

La représentation dans le plan complexe a donné des pôles et zéros négatifs ce qui donne un système stable.

Le programme élaboré nous a donné dans un premier temps les coefficients du correcteur G_c .

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \text{ avec } K_p=0.0523 \text{ et } K_I = 9.95.$$

Les résultats présentés sur les figures 4.3 montrent que la tension du générateur photovoltaïque est régulée à sa valeur optimale.

La charge est résistive et est égale à $R_{chd} = 6.5 \Omega$. Elle permet d'obtenir une tension de sortie comparable à la tension du noeud continu de la centrale multigénérateurs (180 V). Le générateur photovoltaïque est caractérisé par sa tension de circuit ouvert $V_o = 364 \text{ V}$ et le courant de court-circuit $I_{ocd} = 21 \text{ A}$

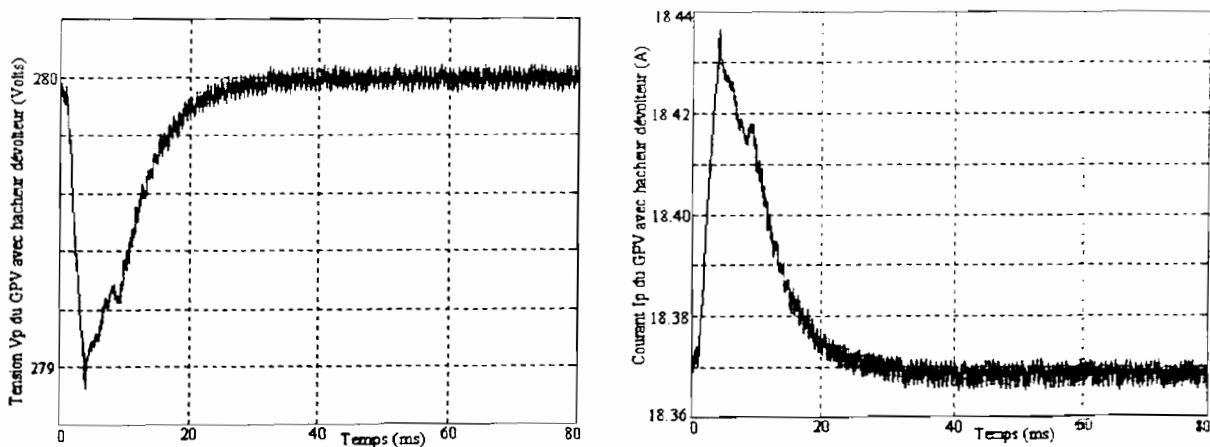


Figure 4.3.a : Augmentation de la charge de 15 %

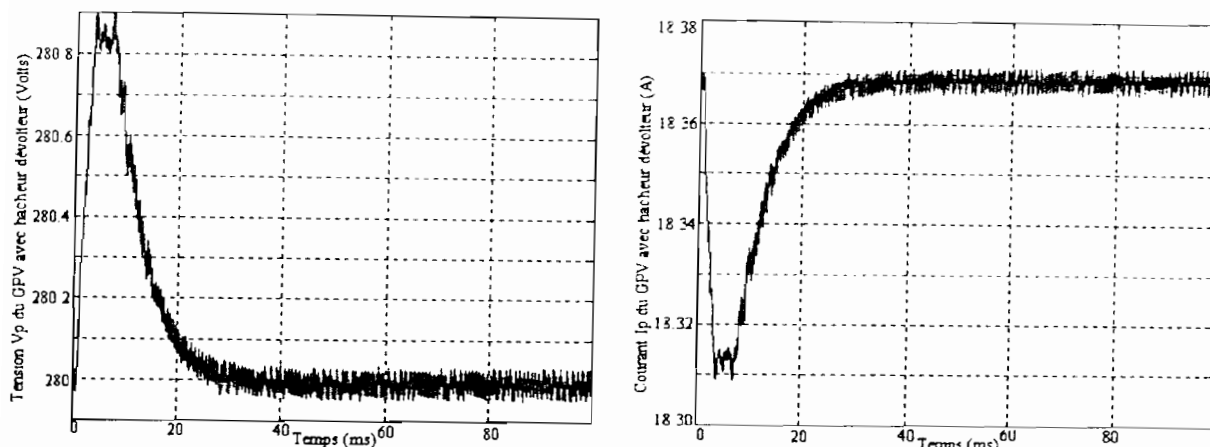


Figure 4.3.b : Diminution de la charge de 15 %

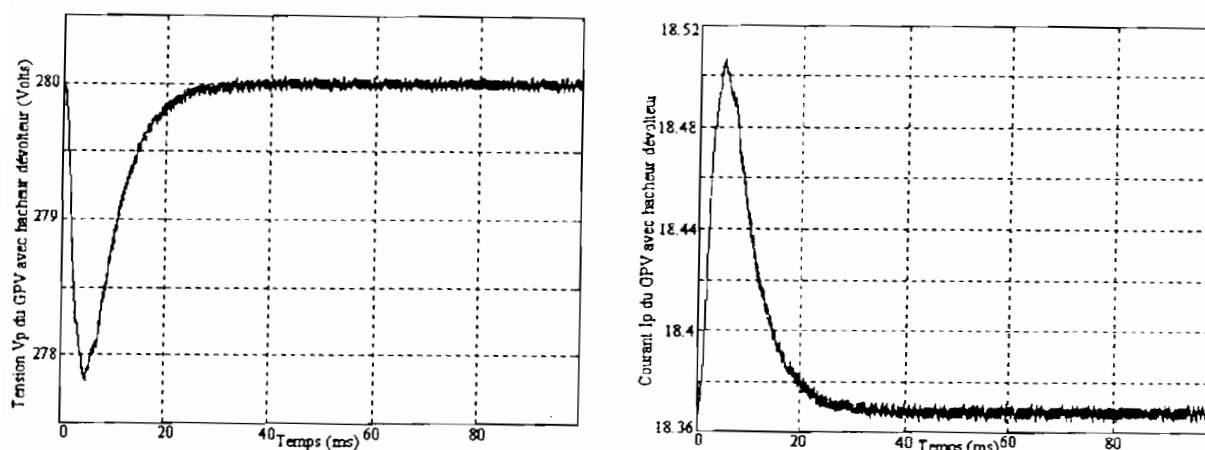


Figure 4.3.c : Augmentation de la charge de 30 %

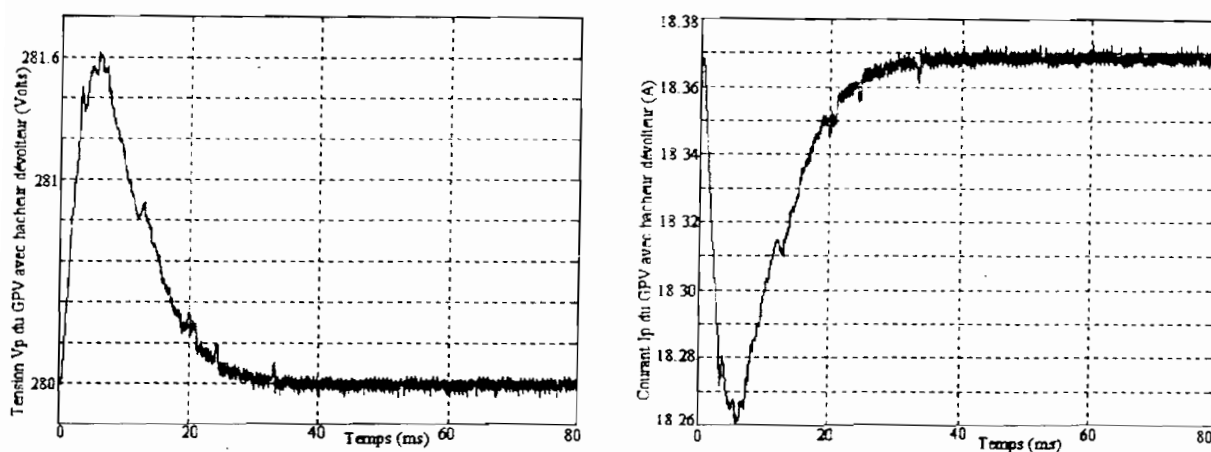


Figure 4.3.d : Diminution de la charge de 30 %

Figure 4.3 : Réponse du système régulé suite à une perturbation de la charge

Nous avons présenté sur les figures 4.3, les réponses des grandeurs tension et courant du système lorsque nous procédons à une perturbation de la charge. Nous constatons que la tension du générateur photovoltaïque ainsi que le courant qu'il débite sont régulés à leurs

grandeurs optimales. L'optimisation du transfert d'énergie du générateur photovoltaïque vers la charge est ainsi réalisée même après une perturbation de la charge. Nous constatons sur les courbes de réponses, qu'un échelon de 30% de la charge n'implique qu'une variation maximale de 0.4% du courant et de la tension optimale et ce décrochage de la résistance dure environs 20 ms.

De même, pour une perturbation d'ensoleillement (sous forme d'échelon), nous avons aussi une optimisation du transfert d'énergie. Ces résultats sont présentés sur les figures 4.4. Cette optimisation est réalisée par la régulation de la tension du générateur photovoltaïque à la tension optimale.

La tension du générateur photovoltaïque diminue de moins d'un volt pour une variation de l'image de l'ensoleillement de 2 A, ceci pendant environ 20 ms.

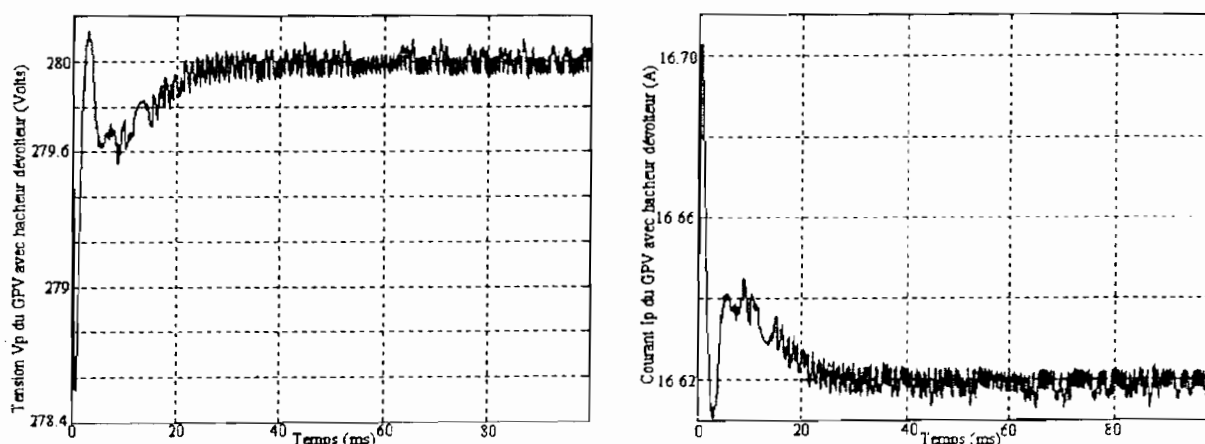


Figure 4.4.a : Diminution du courant de court-circuit de 2 A

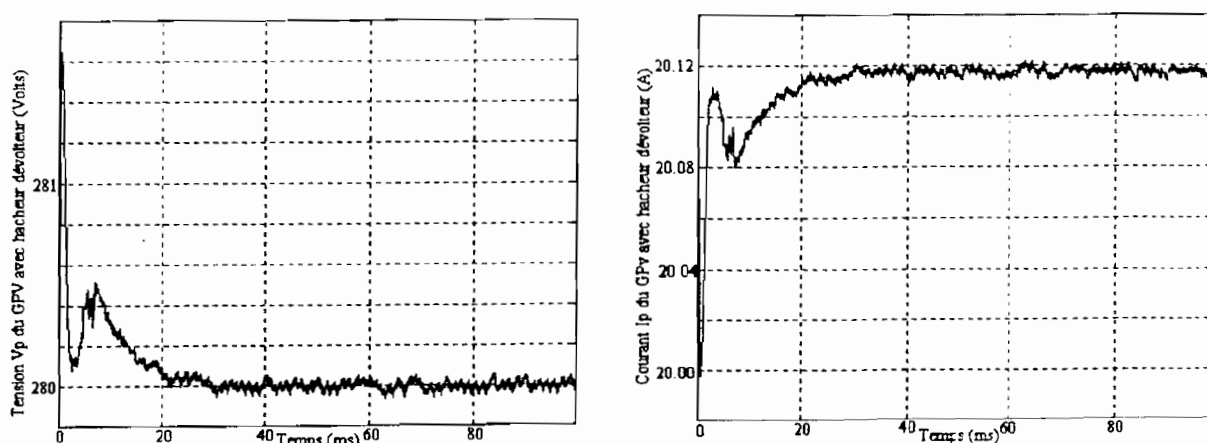


Figure 4.4.b : Augmentation du courant de court-circuit de 2 A

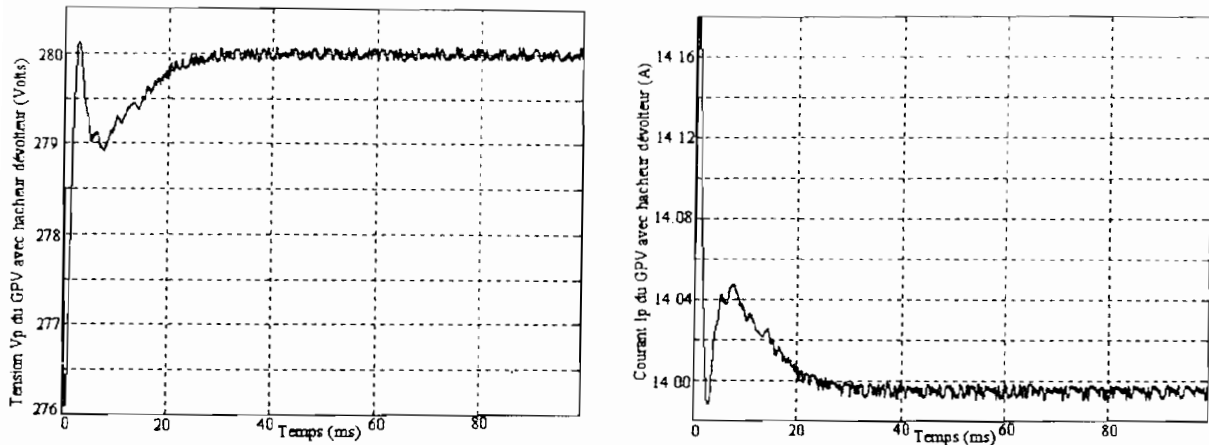


Figure 4.4.c : Diminution du courant de court-circuit de 5 A

Figure 4.4 : Réponse du système suite à une perturbation d'ensoleillement en échelon

4.1.3 CORRECTEUR DU SOUS SYSTEME AVEC HACHEUR SURVOLTEUR

La centrale multigénérateurs est constituée de différents générateurs n'ayant pas les mêmes caractéristiques. Pour réaliser le noeud continu, il faut que toutes les tensions des différents générateurs soient adaptées au niveau du noeud.

Cela nous impose l'insertion d'adaptateurs continu - continu notamment un hacheur survolteur dans une chaîne du système.

Le hacheur survolteur comprendra dans son circuit de commande un régulateur constitué d'un correcteur PI dans la boucle de retour.

L'étude de ce correcteur a été menée comme pour le hacheur dévolteur. A partir des résultats de la simulation du modèle par schéma équivalent moyen du fonctionnement du générateur photovoltaïque et du hacheur survolteur, nous avons déterminé avec les outils de l'automatique, les coefficients du correcteur PI.

La fonction de transfert du système est donnée par :

$$\bar{H}_s(s) = 9.6 * 10^3 \frac{s + 443}{s^3 + 2.3 * 10^3 * s^2 + 1.35 * 10^9 s + 3.5 * 10^{11}}$$

Le correcteur G_c déterminé à partir de cette fonction de transfert est donnée par

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \text{ avec } K_p = 0.1092 \text{ et } K_I = 984.$$

Ce correcteur a été par la suite utilisée avec le système réel pour tester l'amélioration qu'il apporte. Les figures 4.5 à 4.9 donnent les réponses des grandeurs caractéristiques du système (la tension V_p et le courant I_p du générateur photovoltaïque et la tension de sortie V_s du hacheur survolteur) à une variation de la charge et de l'ensoleillement.

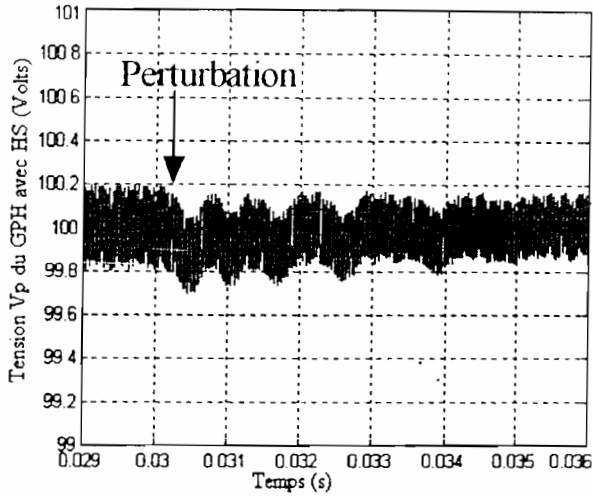
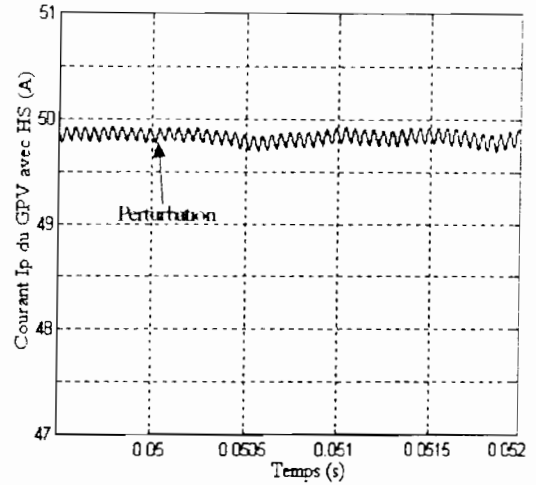
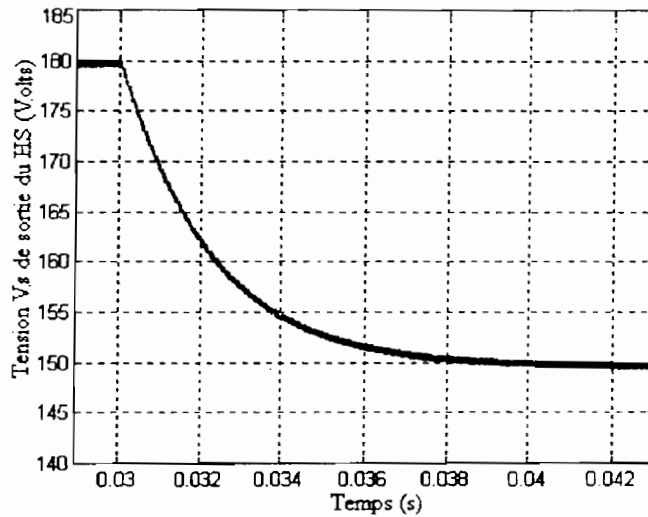
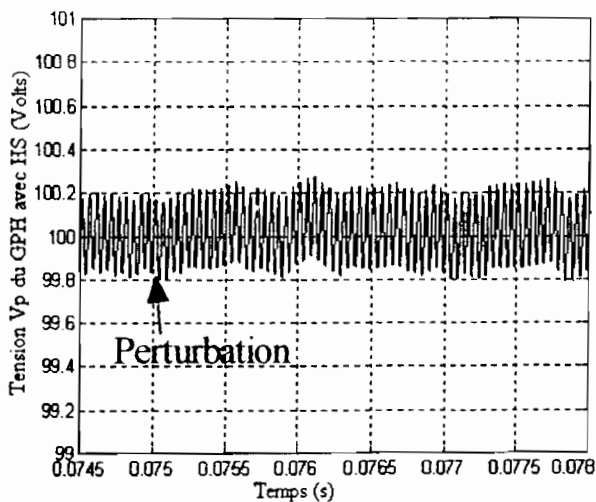
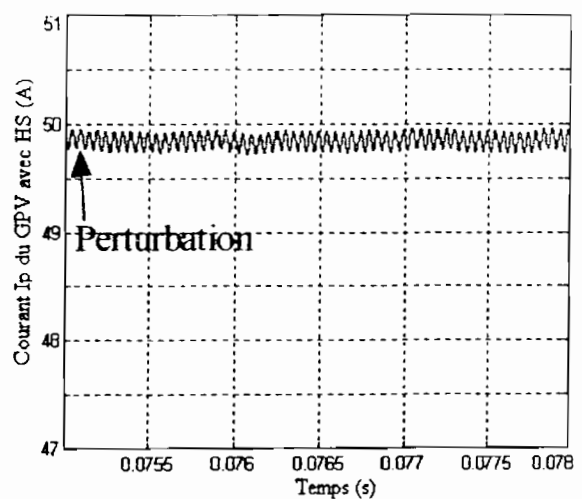
Figure 4.5.a : Tension V_p du générateurFigure 4.5.b : Courant I_p du générateur

Figure 4.5.c : Tension de sortie du hacheur

Figure 4.5 : Augmentation relative de la charge de 28 %

Figure 4.6.a : Tension V_p du générateurFigure 4.6.b : Courant I_p du générateur

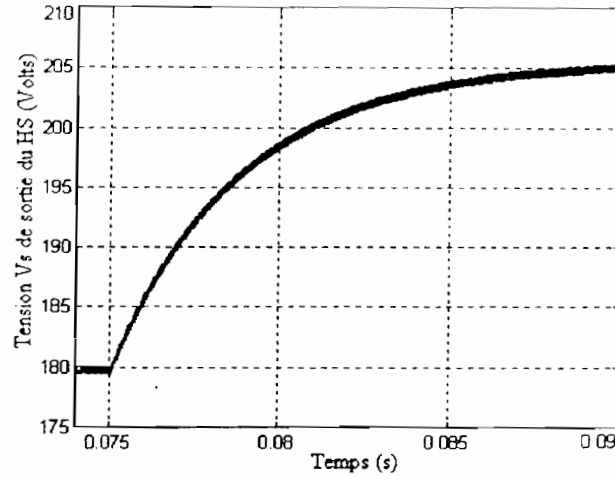


Figure 4.6.c : Tension Vs de sortie du Hacheur

Figure 4.6 : Diminution relative de la charge de 13 %

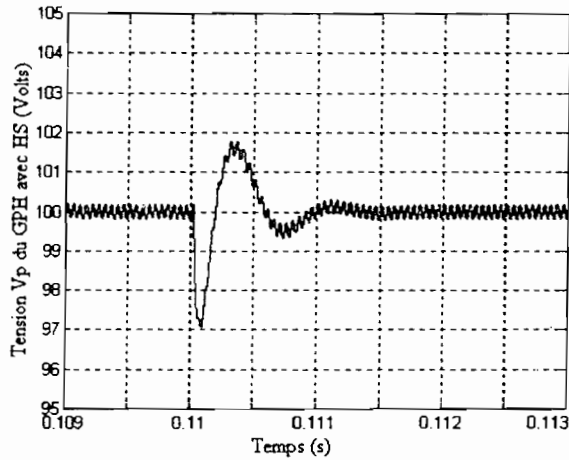


Figure 4.7.a : Tension Vp du générateur

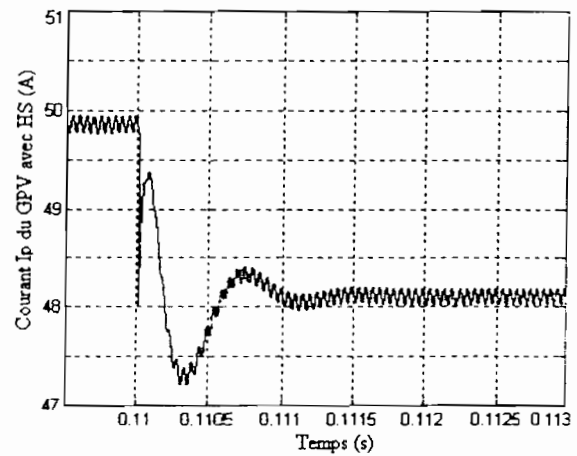


Figure 4.7.b : Courant Ip du générateur

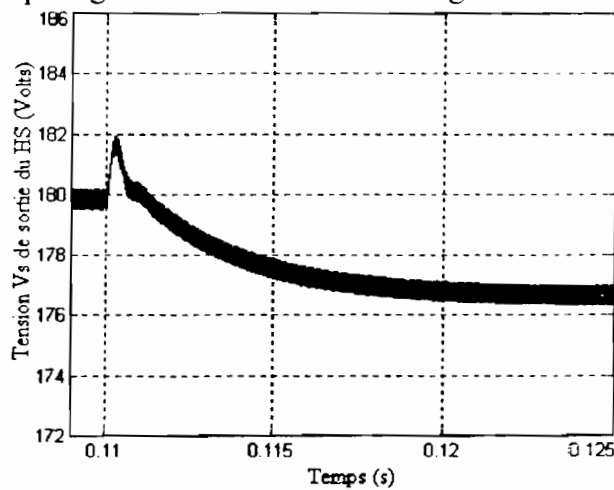


Figure 4.7.c : Tension Vs du hacheur

Figure 4.7 : Diminution du courant de court - circuit de 2A

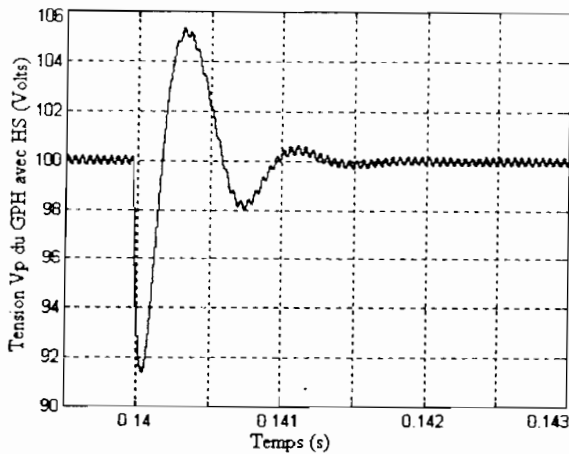
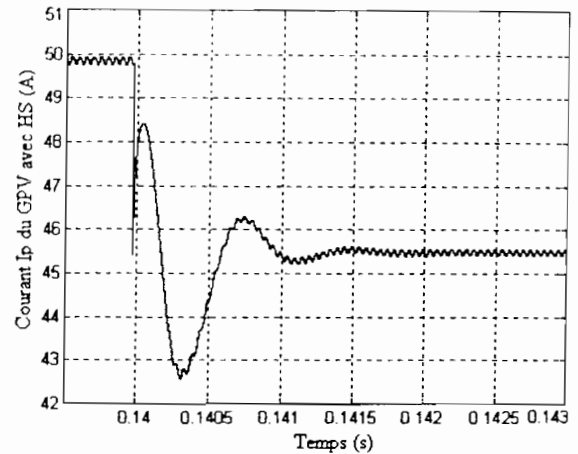
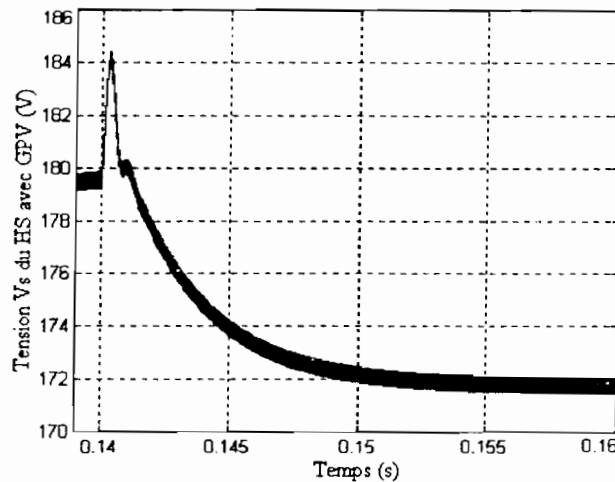
Figure 4.9.a : Tension V_p du générateurFigure 4.9.b : Courant I_p du générateurFigure 4.9.c : Tension V_s du hacheur

Figure 4.9 : Diminution du courant de court - circuit de 5A

Lorsque nous procédons à une perturbation de la charge, nous constatons qu'au niveau du générateur photovoltaïque nous avons la tension et le courant qui ne varient pratiquement pas. Nous avons donc une régulation correcte de la tension du générateur photovoltaïque.

La tension de sortie diminue (ou augmente) si nous augmentons la charge. Son temps de réponse est plus long que celui des grandeurs de la source. Cela s'explique par le fait que son filtre a une constante de temps plus importante. Ce temps de réponse est de l'ordre 15 ms lorsque la charge diminue et de 7 ms lorsque la charge augmente.

Lorsque la charge augmente, nous avons un accroissement de la constante de temps à la sortie du hacheur ce qui explique la différence des temps de réponse entre les deux types de perturbation.

Lorsque nous procédons à une perturbation d'ensoleillement par l'intermédiaire de son image qui est le courant de court - circuit I_{cc} , nous observons un décrochage au niveau des

courbes. Ce décrochage induit une oscillation avant que le système ne stabilise en réalisant le transfert optimal de l'énergie du générateur photovoltaïque

La tension et le courant du générateur photovoltaïque subissent une oscillation qui disparaît au bout de 1 ms. Nous avons donc un temps de réponse très rapide au niveau du générateur photovoltaïque. Au niveau du hacheur survolteur, sa tension de sortie a un temps de réponse d'une dizaine de millisecondes. Après un pic au début de la perturbation, la tension a le fonctionnement d'une grandeur régie par une équation du premier ordre.

Conclusion

Les régulateurs utilisés dans le fonctionnement du générateur photovoltaïque réalisent bien la fonction qui leur est assignée. Nous avons comme objectifs de :

- réaliser une optimisation du transfert d'énergie des générateurs aux charges par un asservissement de leur tension de sortie à une consigne donnée. Cette fonction est obtenue dans le fonctionnement et les courbes représentant le comportement des générateurs montrent que cette optimisation est réalisée avec un temps de réponse convenable et une très bonne précision.

- montrer que les régulateurs déterminés à partir du modèle par schémas équivalents moyens sont satisfaisants.

Il devient dès lors intéressant d'utiliser les modèles moyens pour disposer de modèles mathématiques utilisables avec un outil automatique. La manière empirique de détermination des régulateurs peut valablement être remplacée par cette méthode.

IV.2 COUPLAGE DES TROIS GENERATEURS

Après une étude séparée des différents générateurs utilisés dans la centrale, nous procédons à leur couplage. Cela nous permet de déterminer le comportement du noeud continu à des sollicitations d'une charge variable et de dégager certaines précautions pour l'alimentation d'un onduleur.

Le couplage des trois générateurs est assuré par un condensateur. Nous cherchons dans ce chapitre à montrer la possibilité d'obtenir un fonctionnement stable et performant du système en réalisant le noeud continu sans utilisation de batteries électrochimiques. Ces batteries permettent dans un tel système de réaliser en permanence :

- un découplage du fonctionnement des différents générateurs donc la possibilité de commande séparée des différents générateurs sous interaction. Ces sources sont

indépendantes les unes les autres et cela a une très grande importance dans la réalisation des commandes.

- une tension constante du noeud continu donc un fonctionnement stable de l'onduleur qui serait connecté à ce niveau.

Cependant, du fait que la tension des batteries varie très peu, une optimisation du transfert d'énergie des générateurs vers la charge devient hypothétique. Aussi, nous avons cherché à réaliser le noeud continu avec un condensateur électrochimique.

Le condensateur devra donc en instantané assurer ces deux fonctions et la régulation gérant de façon convenable l'échange d'énergie nécessaire à la bonne marche du système ainsi que la stabilité.

En effet, le condensateur devra assurer :

- le transfert d'énergie des sources vers l'onduleur et l'équilibre instantané du bilan d'énergie entre sources et charges.

- et supporter la restitution d'énergie de l'onduleur pendant les phases de récupération.

En effet, les sources à énergie renouvelable ne sont pas réversibles d'où la nécessité de disposer de condensateurs.

Les perturbations opérées lors du fonctionnement du système sont essentiellement dues à la charge et à l'ensoleillement .

Pour l'ensoleillement, nous avons distingué les perturbations sur le générateur alimentant un hacheur dévolteur du générateur photovoltaïque alimentant un hacheur survolteur.

4.2.1 PERTURBATION DE LA CHARGE.

Les performances souhaitées au niveau du système doivent être :

- une tension au niveau du noeud continu variant très peu;
- un système stable avec une réponse apériodique ou oscillatoire optimale suite à une perturbation de la charge.

Les correcteurs insérés dans les boucles de retour pour la commande des hacheurs doivent donc être suffisamment performants et rigides pour répondre à ce cahier de charges

Les réponses du système suite à ces perturbations sont données sur les figures 4.10 à 4.13.

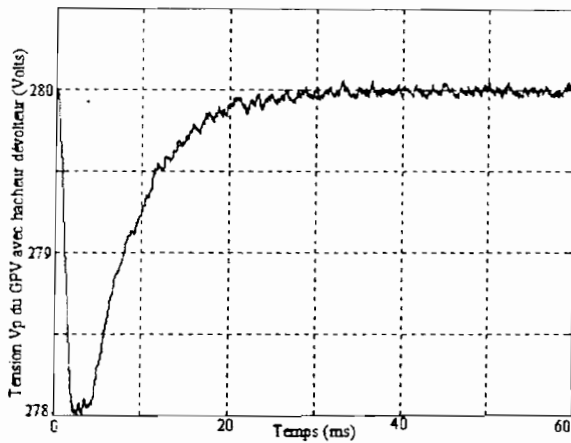


Figure 4.10.a :

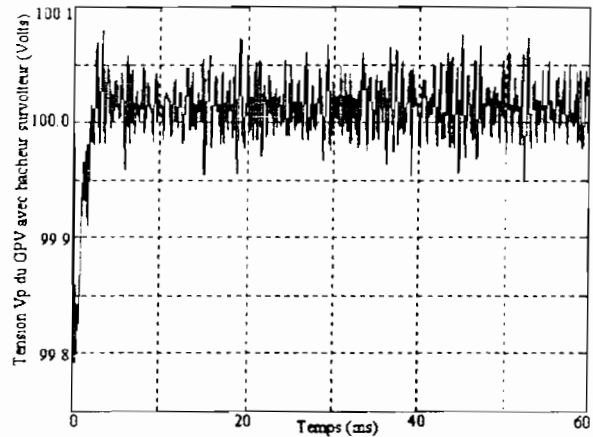


Figure 4.10.b :

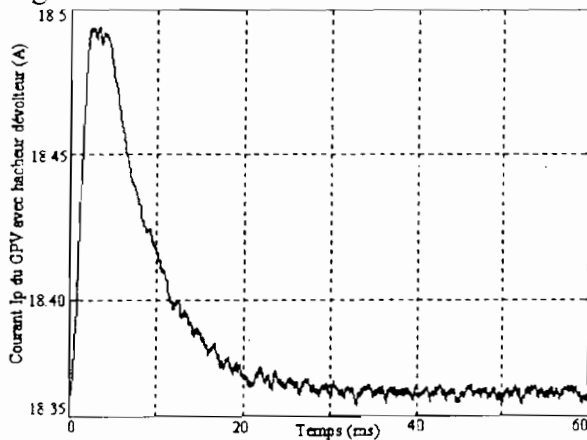


Figure 4.10.c :

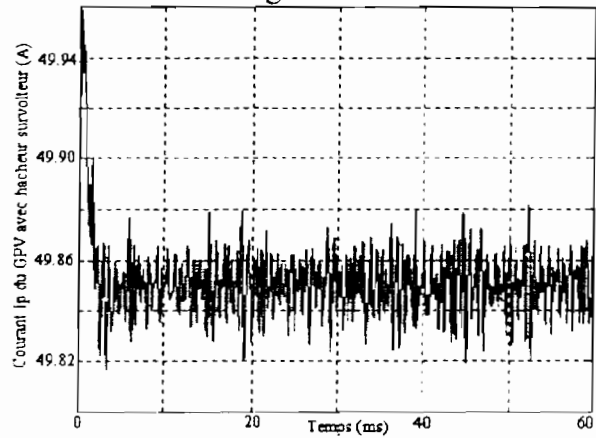


Figure 4.10.d :

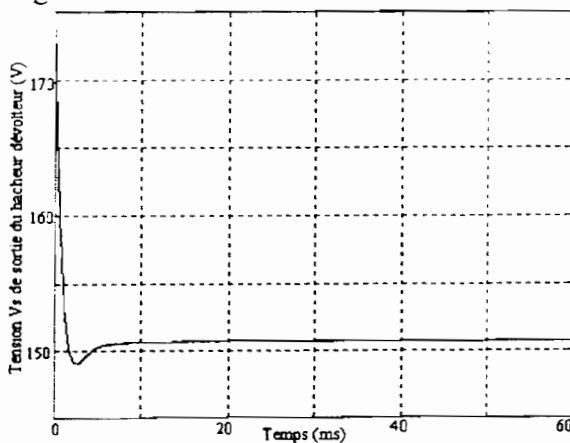


Figure 4.10.e :

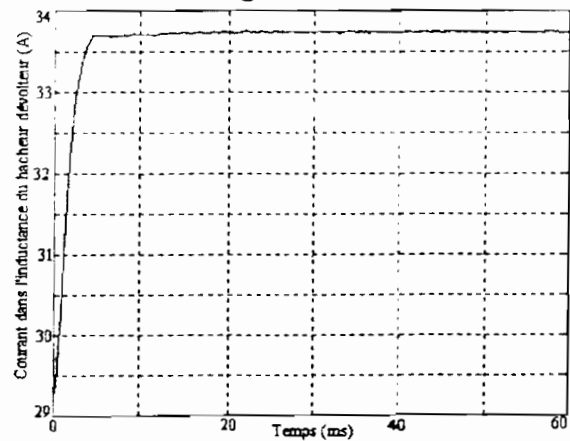


Figure 4.10.f :

Figure 4.10 : Réponse du système à une augmentation de la charge de 8 %

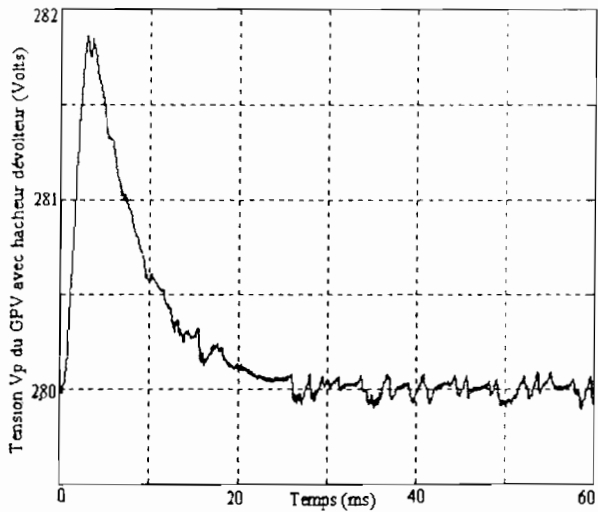


Figure 4.11.a. :

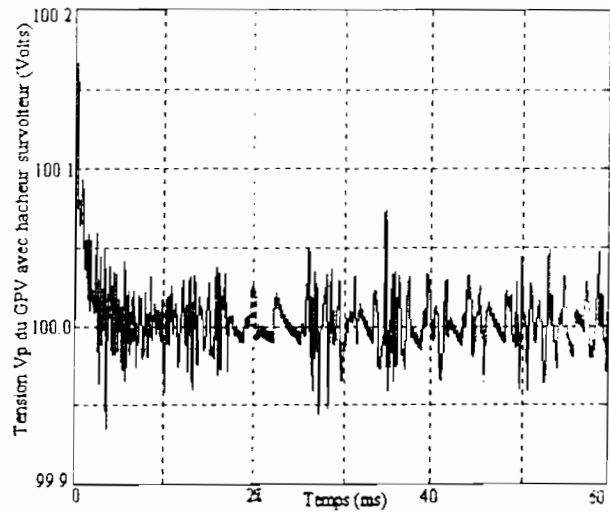


Figure 4.11.b. :

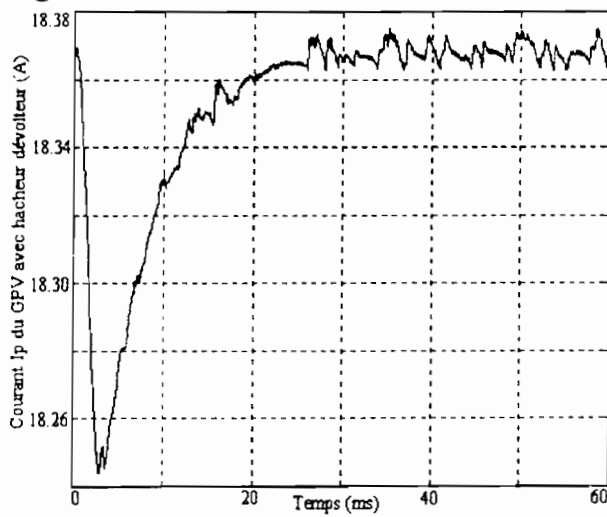


Figure 4.11.c. :

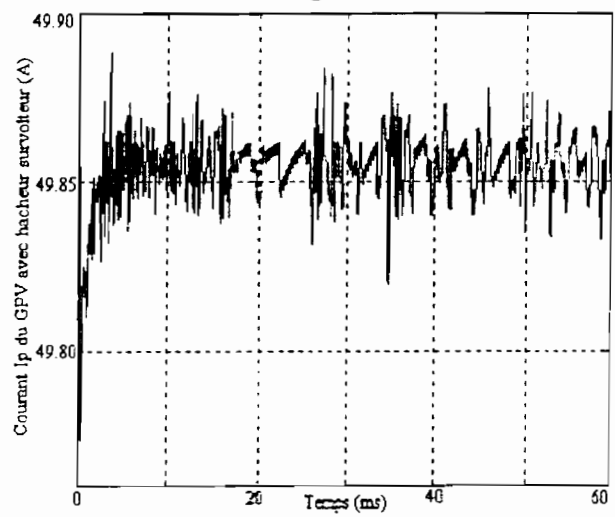


Figure 4.11.d. :

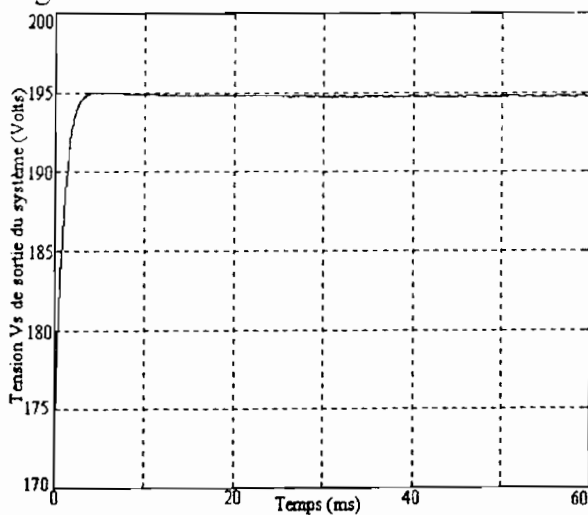


Figure 4.11.e. :

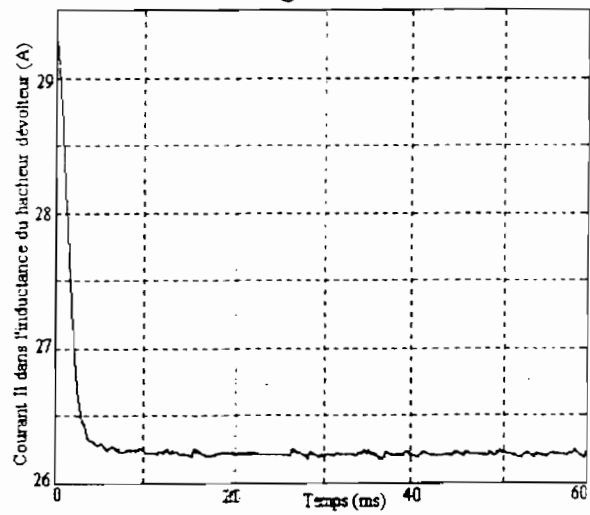


Figure 4.11.f. :

Figure 4.11 : Réponse du système à une diminution de la charge de 8 %

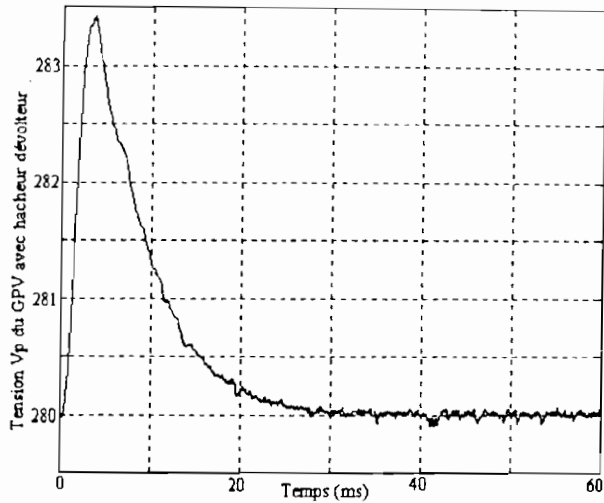


Figure 4.12.a. :

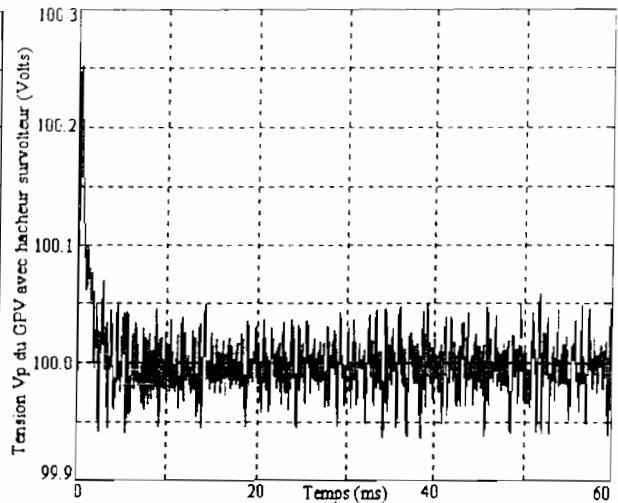


Figure 4.12.b. :

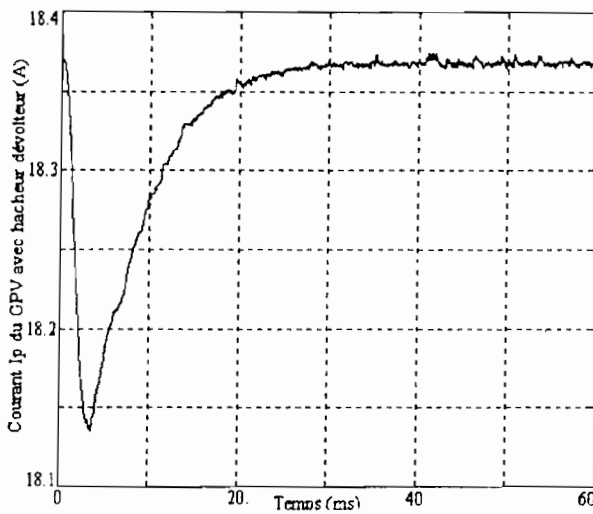


Figure 4.12.c. :

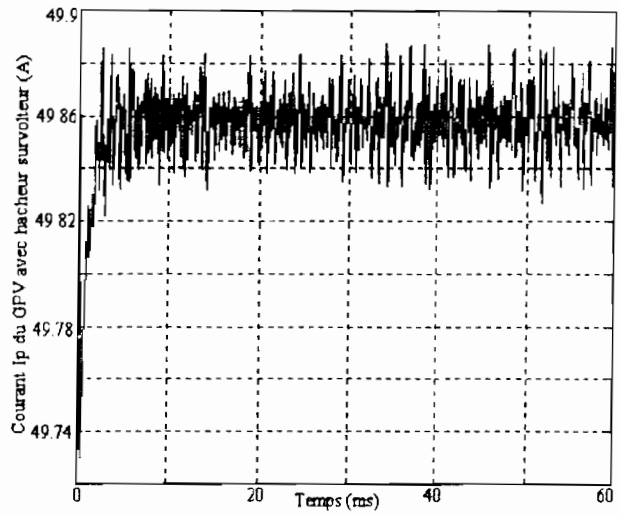


Figure 4.12.d. :

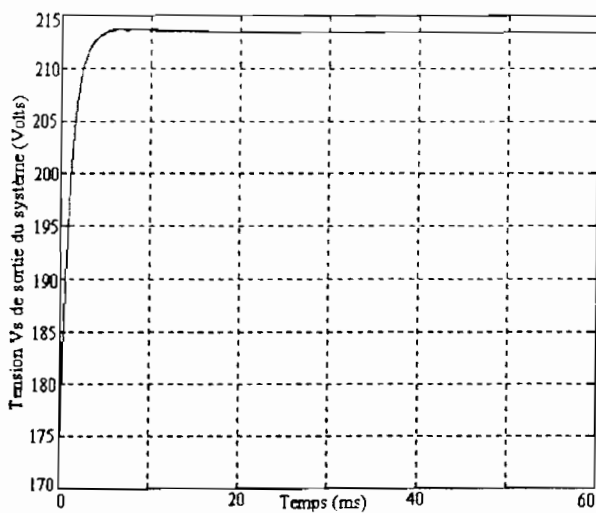


Figure 4.12.e. :

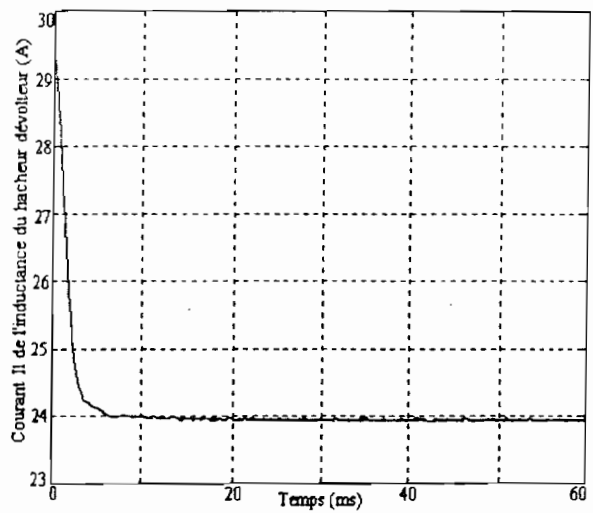


Figure 4.12.f. :

Figure 4.12 : Réponse du système à une diminution de la charge de 15 %

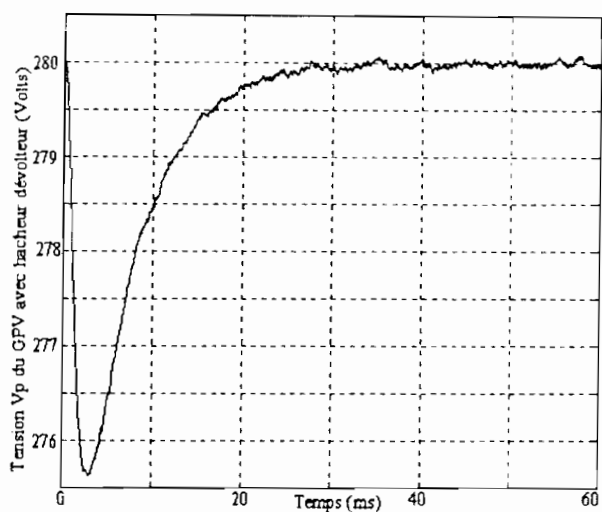


Figure 4.13.a. :

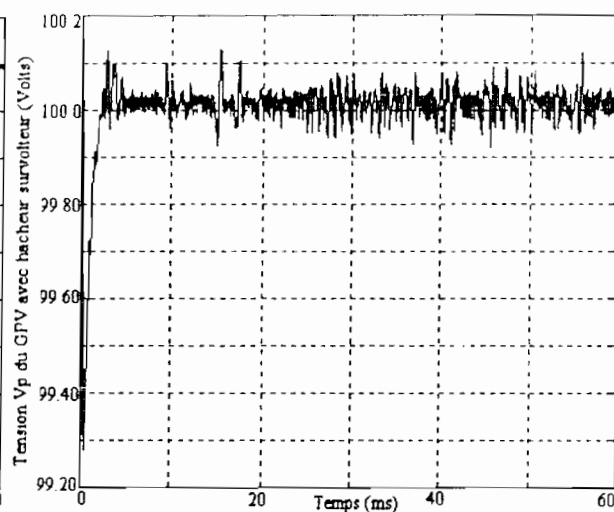


Figure 4.13.b. :

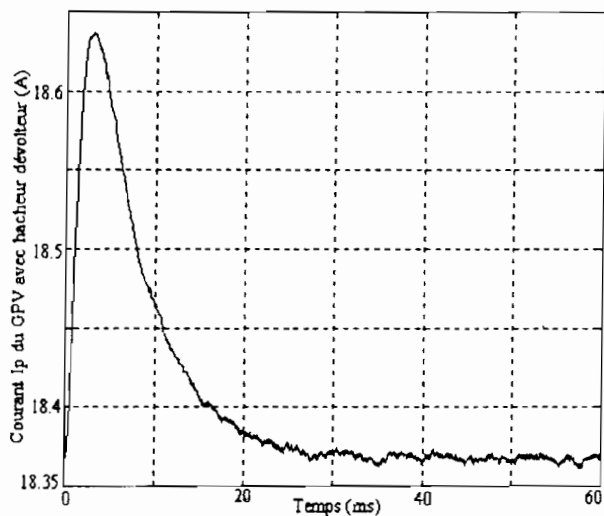


Figure 4.13.c. :

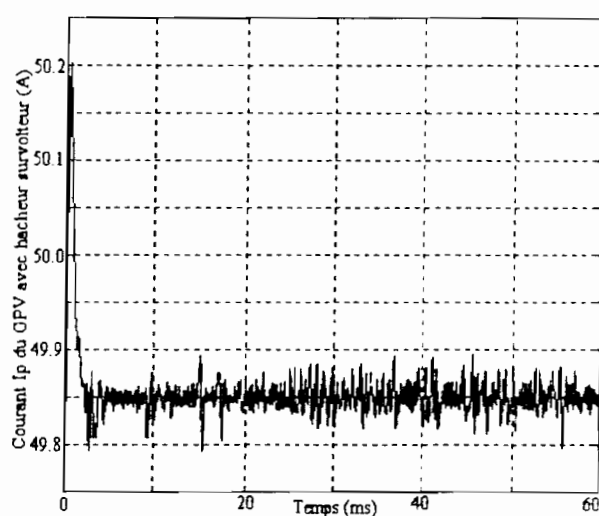


Figure 4.13.d. :

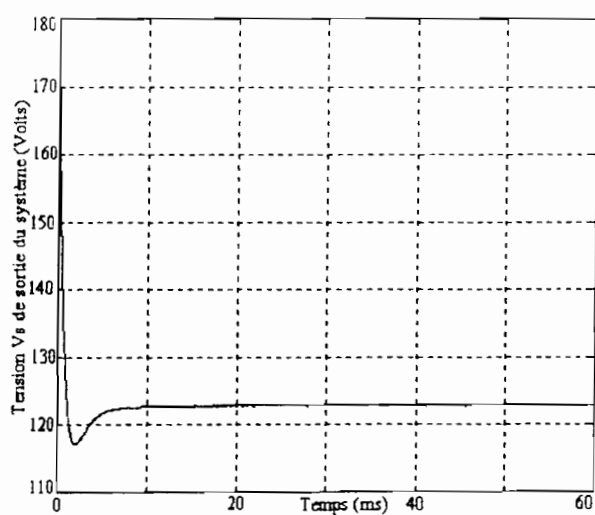


Figure 4.13.e. :

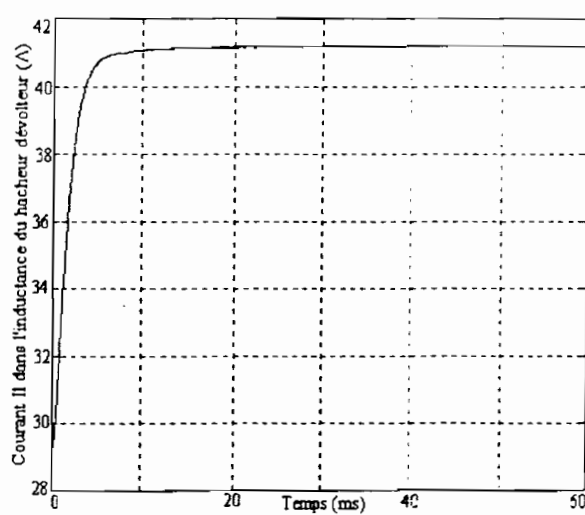


Figure 4.13.f. :

Figure 4.13 : Réponse du système à une augmentation de la charge de 15 %

Les résultats présentés sur les figures 4.10 à 4.13 nous montrent les grandeurs d'entrée (tension V_p et courant I_p) et de sortie (tension de sortie V_s et de courant dans la filtre I_L) après une perturbation de la charge.

Les grandeurs du générateur avec hacheur dévolteur subissent la perturbation en accusant un pic qui s'amortit très vite après un temps d'environ 20 ms. Cependant, en valeur absolue, cette variation n'est pas importante car elle est de moins de 4 V (pour la tension) et moins de 0.3 A (pour le courant), ce qui correspond à une variation relative de 1.5 %. La valeur optimale est atteinte en moins de 20 ms.

Pour le générateur photovoltaïque avec le hacheur survolteur, il n'y a pratiquement pas de variation.

Conclusion :

Le fonctionnement du système d'alimentation est peu perturbé par les variations de charge. Le régime transitoire n'est pas très significatif.

Le hacheur survolteur a un fonctionnement moins perturbé mais a quand même des oscillations de faible amplitude autour de la valeur souhaitée. Son temps de réponse est très faible et cela du fait de la non existence de dépassement.

Pour un couplage avec l'onduleur, il faudra que ce dernier ne soit pas très sensible à ces faibles variations. L'onduleur devra disposer de correcteurs performants pour surmonter ces éventuelles oscillations.

Il en est de même du générateur photovoltaïque avec un hacheur dévolteur.

Après chaque perturbation, le transfert optimal d'énergie s'effectue (voir les courbes de tension V_p et I_p). Cela se traduit par une variation de la tension de sortie en valeur absolue maximale de 10 V.

Le couplage effectué par un condensateur ne perturbe pas le fonctionnement du système. Nous avons un fonctionnement stable et la régulation est réalisée pour une optimisation du transfert d'énergie des sources vers la charge.

4.2.2 PERTURBATION DE L'ENSOLEILLEMENT.

L'ensoleillement est simulé par le courant de court-circuit I_{cc} des générateurs photovoltaïques. Ses variations sont très faibles au cours du temps comparées aux constantes de temps du système. La connaissance des effets que sa variation pourrait avoir sur le fonctionnement du système est importante. C'est une grandeur qui varie tout au long de la journée et parfois de manière aléatoire.

Les résultats sont présentés sur les figures 4.14 et 4.15.

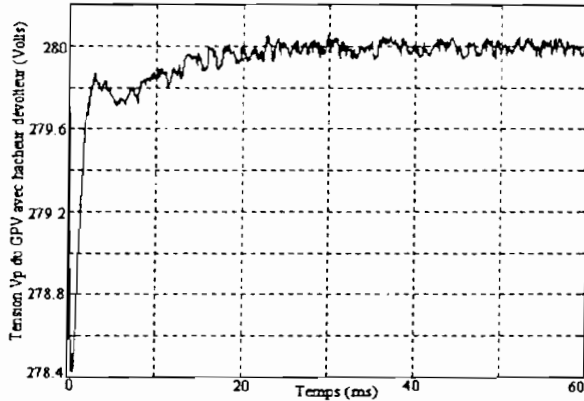


Figure 4.14.a. :

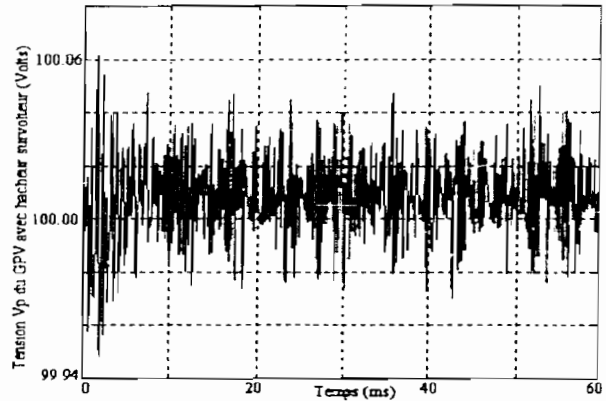


Figure 4.14.b. :

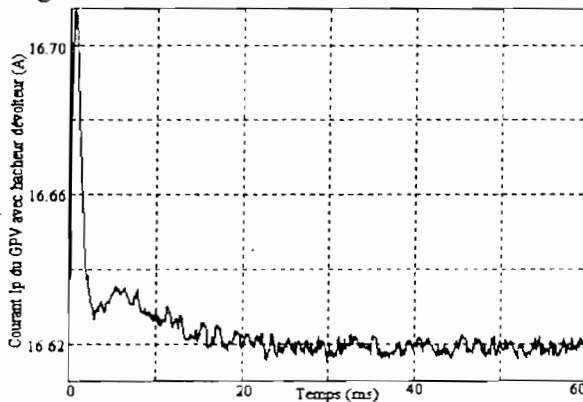


Figure 4.14.c. :

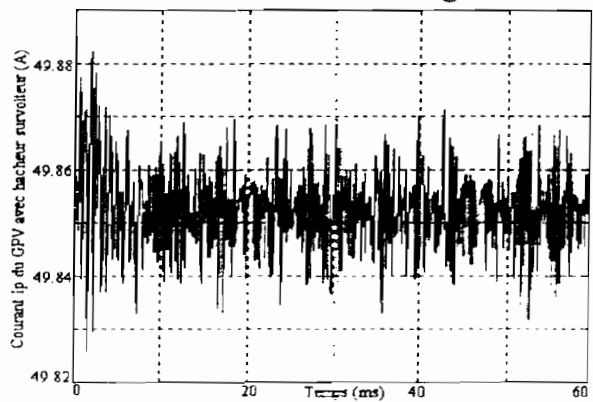


Figure 4.14.d. :

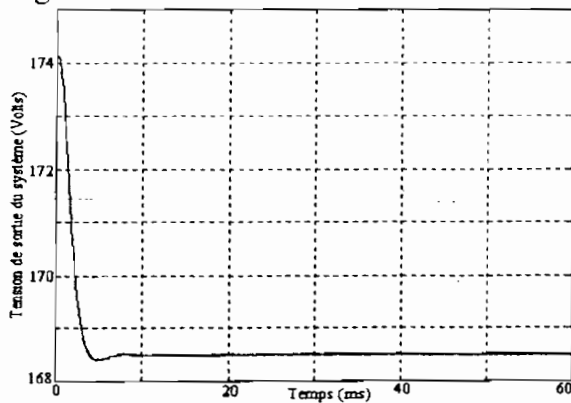


Figure 4.14.e. :

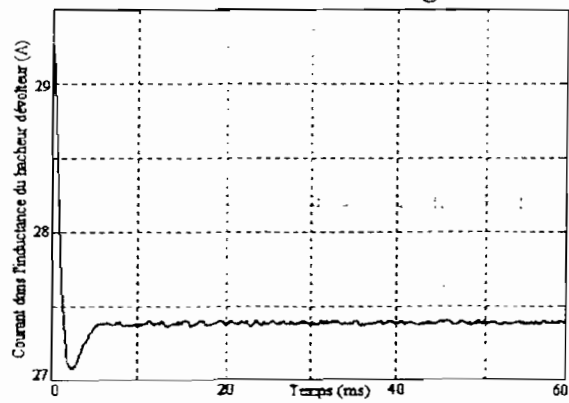


Figure 4.14.f. :

Figure 4.14 : Diminution du courant de court-circuit de GPV avec HD de 2 A.

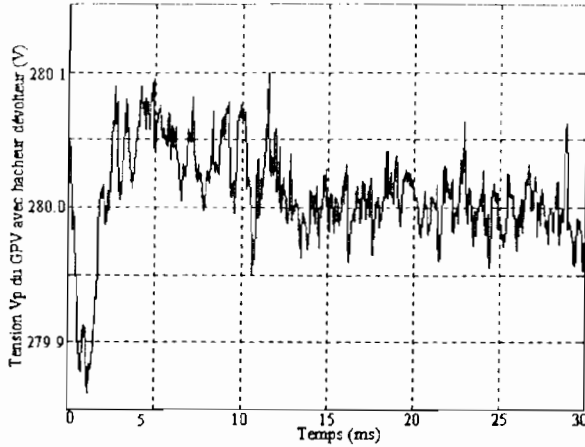


Figure 4.15.a. :

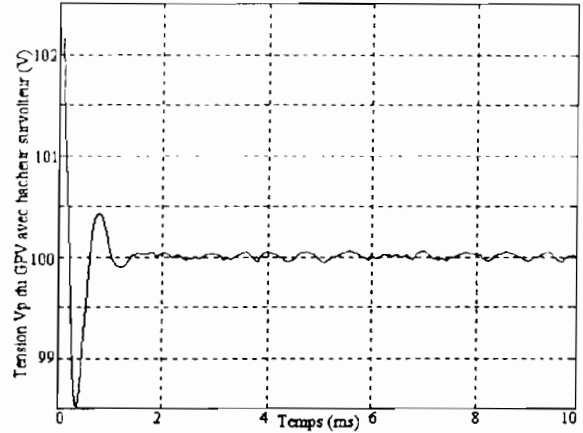


Figure 4.15.b. :

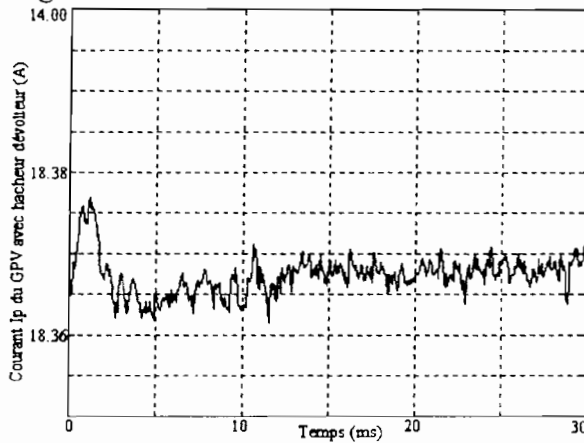


Figure 4.15.c. :

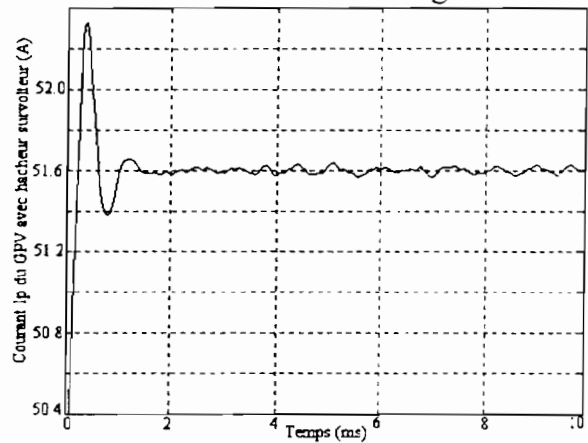


Figure 4.15.d. :

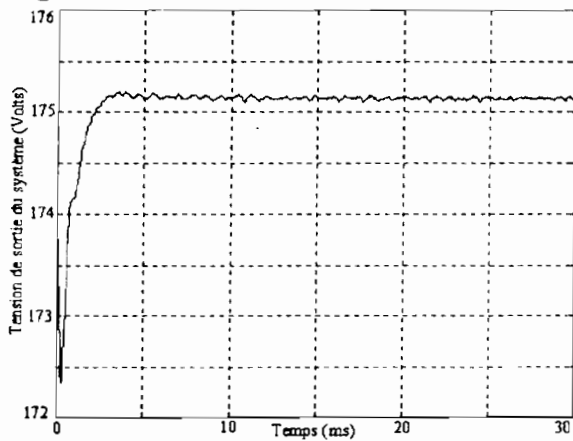


Figure 4.15.e. :

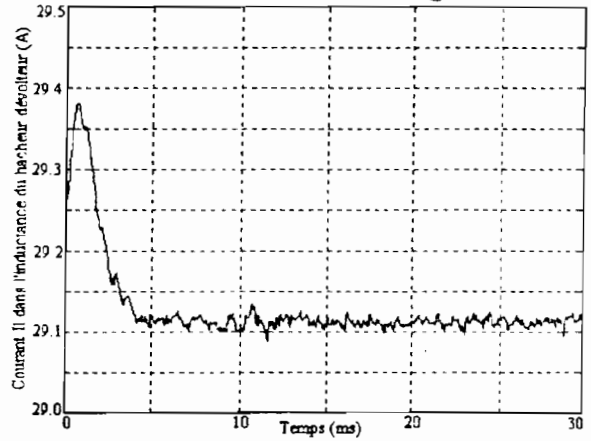


Figure 4.15.f. :

Figure 4.15 : Diminution du courant de court-circuit de GPV avec HS de 2 A.

Nous avons tracé les réponses des tensions et courants des différents générateurs lorsque nous faisons varier le courant de court-circuit d'un générateur. Nous supposons ici que les différents générateurs peuvent pour une raison ou une autre recevoir de manière différente l'ensoleillement et que des perturbations peuvent s'opérer sur un générateur sans que les autres en soient affectés.

4.2.2.1 Régime transitoire

La perturbation de l'ensoleillement (I_{ccd} [hacheur dévolteur] ou I_{ccs} [hacheur survolteur]) d'un générateur photovoltaïque n'affecte pas l'autre générateur (Figure 4.14.b et Figure 4.15.a). La tension du générateur photovoltaïque V_{ps} alimentant le hacheur survolteur ne varie même pas d'un dixième de Volt lorsque nous perturbons l'ensoleillement I_{ccd} des autres sources. Il en est de même d'une perturbation de l'ensoleillement I_{ccs} sur le générateur photovoltaïque alimentant le hacheur survolteur. Il n'y a pas de répercussion significative sur la tension V_{pd} du générateur photovoltaïque alimentant le hacheur dévolteur.

A une diminution de I_{ccd} de 2A, la tension V_{pd} subit une légère diminution sous la forme d'un pic de 1.5 V puis se rétablit à sa valeur optimale en moins de 3 ms. Le courant I_{pd} connaît un pic positif avant de se stabiliser. Le temps de réponse est très faible et est de l'ordre de 3 ms. La tension de sortie diminue de la manière d'un système du premier ordre avec toujours un temps de réponse inférieur à 3 ms (Figure 4.14.e).

A une diminution de I_{ccs} , ce sont plutôt les grandeurs du sous-système avec le hacheur survolteur qui subissent des variations. La réponse est optimale mais avec un dépassement de l'ordre de 1%. Le temps de réponse est aussi très faible puisqu'il est inférieur à 3 ms.

4.2.2.2 Régime permanent

Après une perturbation de l'ensoleillement, nous constatons que les tensions des générateurs photovoltaïques se stabilisent à leur valeur optimale.

Les courants varient dans le même sens que la perturbation mais leur valeur finale correspond à la valeur donnant l'optimum de puissance des générateurs photovoltaïques. L'asservissement de la tension à sa valeur optimale est aussi réalisée lorsque l'ensoleillement varie. Les régulateurs utilisés sont donc rigoureux et satisfaisants.

Cette régulation est possible dans la mesure où la tension de sortie est variable. En effet, nous voulons maintenir la tension des générateurs constantes et égales à leur optimale. Puisque cette tension est liée à la tension à la sortie des hacheurs, pour la maintenir constante, il faut que la tension de sortie soit variable.

Cette condition nous impose l'utilisation d'un système de couplage à tension variable qui peut être constitué d'un condensateur.

4.2.2.3 Conclusion

La partie constituant le noeud continu a un fonctionnement stable avec le condensateur. Ce dernier permet donc une gestion adéquate de l'échange d'énergie entre les sources et la charge.

Le comportement du système est aussi caractérisé par un quasi découplage du fonctionnement des différentes sources le constituant. Cette dernière condition est essentielle pour l'optimisation des sources et ceci grâce à la mise en place des régulateurs individualisés, fiables et performants.

Nous avons montré dans cette partie que les régulateurs utilisés permettent l'optimisation du transfert d'énergie et la stabilisation du fonctionnement des générateurs intercouplés. Les temps de réponses pour que le système se stabilise aux conditions optimales sont faibles comparées à la période du réseau de distribution de la SENELEC. Ils sont aussi très importants par rapport aux périodes des hacheurs.

Ces régulateurs ont été déterminés en utilisant un outil classique de l'automatique qui est l'étude du lieu d'Evans. Cela a pu être fait grâce à l'utilisation de la modélisation par schéma équivalent moyen pour disposer des relations mathématiques utilisables en automatique.

Cela constitue donc un moyen très puissant de recherche de régulateurs. Cette démarche donne de manière systématique et de façon plus rapide les régulateurs. La méthode empirique de détermination des correcteurs peut ainsi être remplacée par cette modélisation par schéma équivalent moyen.

CHAPITRE V

ETUDE DES REGULATEURS - APPLICATION A LA MICROCENTRALE

CHAPITRE V. :

**ETUDE DES REGULATEURS - APPLICATION A LA
MICROCENTRALE**

Le présent chapitre présente les résultats de la simulation du couplage du noeud continu à un onduleur. L'importance du couplage par condensateur est la réduction du coût (pas de batteries électrochimiques) mais aussi une installation beaucoup plus adaptée à l'environnement et une diminution de la fréquence de maintenance.

Les batteries électrochimiques utilisées dans les systèmes photovoltaïques contribuent pour une large part dans les frais d'entretien et de maintenance. Les batteries ont une durée de vie faible par rapport aux autres éléments et si elles sont vieilles, elles contribuent à réduire les performances du système [6].

De plus l'utilisation des batteries réduit le rendement global du système.

Tous ces facteurs conjugués nous ont poussés à chercher la faisabilité du couplage du noeud continu par un condensateur.

Dans un premier temps nous présentons le fonctionnement de l'onduleur et la nécessité d'un asservissement à une consigne qui est l'image du signal du réseau de distribution d'énergie électrique.

Nous ferons ensuite le couplage de l'ensemble de la chaîne énergétique. Cela nous permettra de dégager des lois d'optimisation du transfert d'énergie et de déterminer aussi les éléments des filtres pour un fonctionnement adéquat du système.

V.1 ASSERVISSEMENT DE LA TENSION DE SORTIE DE L'ONDULEUR

La transformation de l'énergie disponible sous forme continue en énergie à tension et courant alternatifs nécessite l'utilisation d'un onduleur.

Nous supposons que le filtrage est parfait, c'est-à-dire sans harmoniques, seul le fondamental de l'onde de sortie est considéré.

Nous avons aussi mis un transformateur d'isolement avec un rapport de transformation $m = 5.56$. Ce transformateur est pris avec son modèle réel car il a été étudié auparavant dans le laboratoire [23].

La valeur efficace de l'onde de sortie est alors donnée par l'expression :

$$V_s = r * m * \frac{V_e}{\sqrt{2}} \text{ où} \quad (5.1)$$

V_e = tension d'entrée de l'onduleur

r = coefficient de réglage

V_s = tension de sortie de l'onduleur

Le courant d'entrée de l'onduleur est aussi donnée par

$$I_e = \frac{1}{2} r * m * I_s * \cos\varphi \text{ avec} \quad (5.2)$$

I_s = courant de sortie,

φ déphasage entre tension V_s et courant I_s de sortie.

Comme nous le constatons donc sur ces formules, pour une régulation de la tension de sortie, nous avons la latitude d'agir sur la tension d'entrée V_e ou sur le coefficient de réglage r .

Le système que nous étudions est constitué d'un ensemble où le noeud continu peut fluctuer entre deux grandeurs. Il est par conséquent impossible de vouloir réguler la tension de sortie par la tension d'entrée de l'onduleur. Pour arriver à notre fin, nous avons cherché à adapter la tension de sortie V_s en agissant sur le coefficient de réglage lorsque la tension d'entrée varie. En effet, lorsque la tension d'entrée varie, la tension de sortie varie et cette perturbation sera prise en compte dans l'élaboration de la commande de l'onduleur.

5.1.1 ETUDE EN BOUCLE OUVERTE

Dans un premier temps nous avons cherché à étudier le comportement de l'onduleur lorsque nous lui faisons subir des perturbations. Ces variations sont effectuées sur la tension d'entrée et la charge. Les résultats sont présentés sur les figures 5.1 à 5.3.

5.1.1.1 Perturbation de la charge

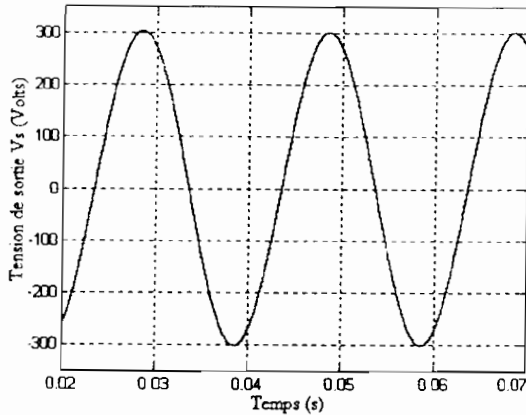


Figure 5.1.a : Tension de sortie V_{os}

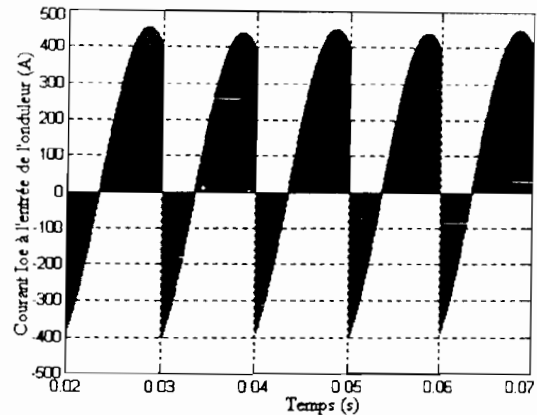


Figure 5.1.b : Courant d'entrée I_{oe}

Figure 5.1 : Formes d'ondes des grandeurs de l'onduleur

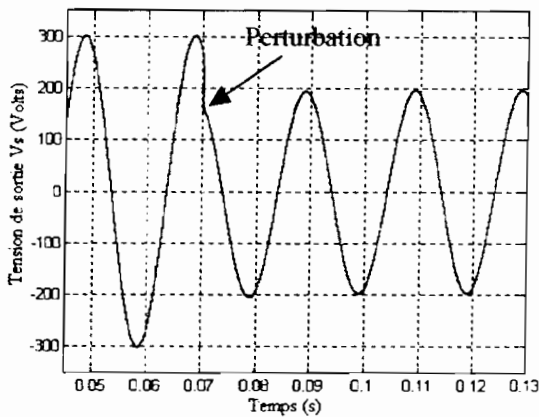


Figure 5.2.a : Tension de sortie V_{os}

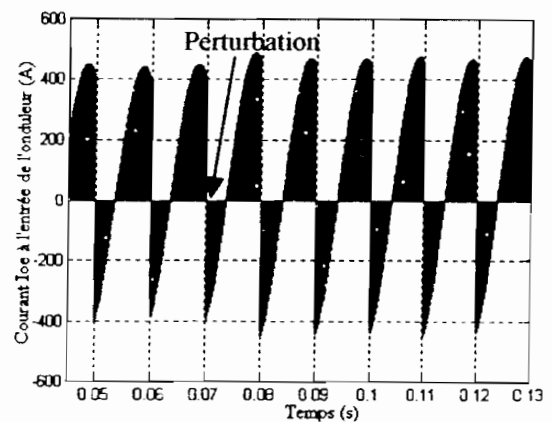


Figure 5.2.b : Courant d'entrée I_{oe}

Figure 5.2 : Augmentation relative de la charge de l'onduleur de 35 %

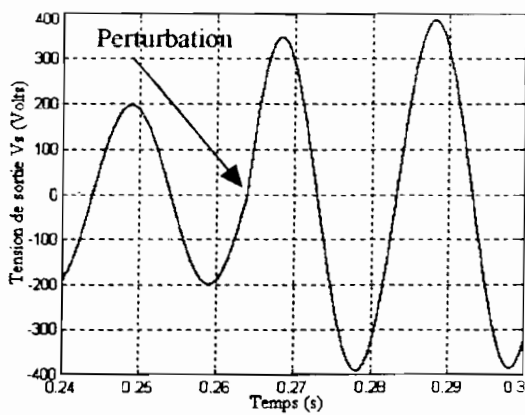


Figure 5.3.a : Tension de sortie V_{os}

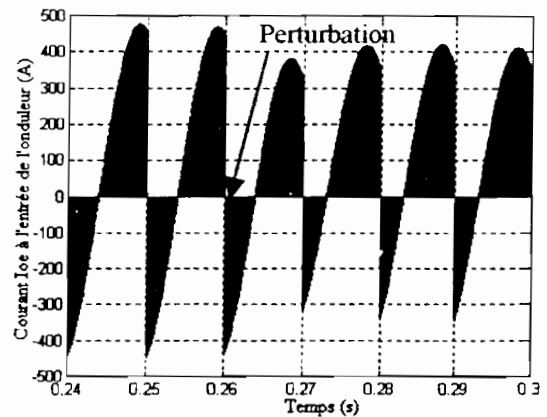


Figure 5.3.b : Courant d'entrée I_{oe}

Figure 5.3 : Diminution relative de la charge de l'onduleur de 35 %

Nous procédons à une perturbation de la charge dans un premier temps. L'objectif est l'asservissement de la tension de sortie à une tension sinusoïdale. Ici, il se pose le problème de la poursuite d'une grandeur. Le point de fonctionnement n'est pas fixe. Il varie de manière sinusoïdale. Le régulateur qui sera utilisé devra être adaptatif pour permettre d'obtenir une réponse correcte.

Nous avons représenté sur les courbes 5.1, la tension de sortie et le courant d'entrée de l'onduleur. La tension d'entrée est sinusoïdale et a une fréquence de 50 Hz. Le courant d'entrée est composé de calottes avec une partie négative correspondant aux phases de récupération d'énergie.

Lorsque nous procédons à une perturbation de la charge, cela se répercute sur la tension de sortie et le courant d'entrée (Figure 5.2 et Figure 5.3). La tension diminue lorsque la charge augmente et vis - versa. Mais le temps de rétablissement est quand même faible car la tension de sortie atteint sa valeur au régime permanent pendant la période de la sinusoïde de référence.

Le courant d'entrée subit aussi cette perturbation et varie dans le même sens que la perturbation.

5.1.1.2 Perturbations de la tension d'entrée

Sur les figures 5.3, nous avons représenté la tension de sortie de l'onduleur lorsque nous procédons à une perturbation de la tension d'entrée.

La tension de sortie varie dans le même sens que la tension d'entrée. En effet, d'après la relation 5.1, nous avons lorsque le coefficient de réglage est constant, la tension de sortie qui est proportionnelle à la tension de sortie.

Cette remarque nous a permis d'établir pour la boucle fermée une commande qui est l'image de la tension de sortie donc de la tension d'entrée (Figure 5.5).

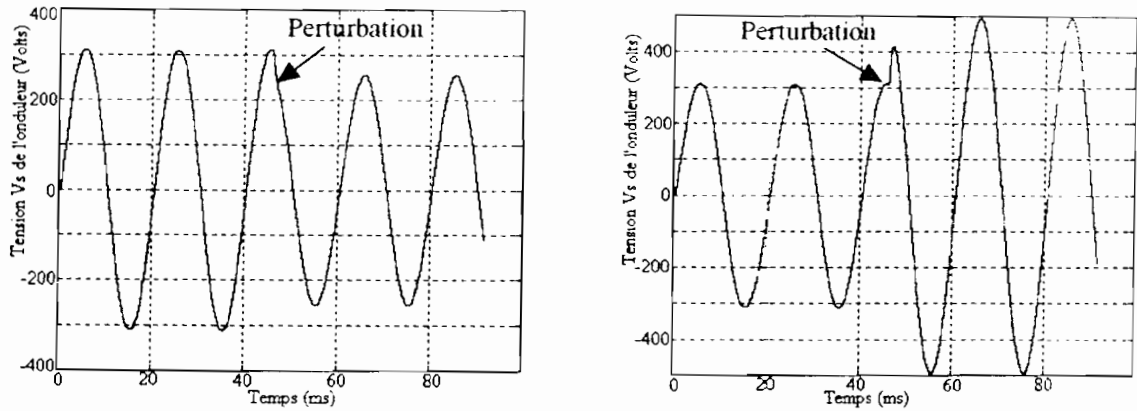


Figure 5.4.a : Tension d'entrée diminue de $1/5^{\text{ème}}$ Figure 5.4.b : Tension d'entrée croît de $1/5^{\text{ème}}$

Figure 5.4 : Tension de sortie de l'onduleur après une perturbation de la tension d'entrée

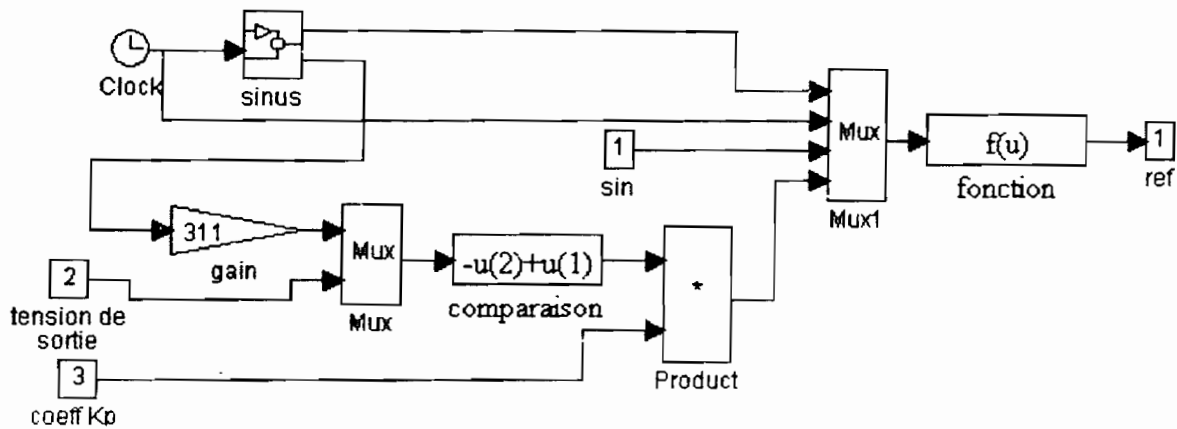


Figure 5.5 : Elaboration de la référence de la commande de l'onduleur

Nous avons élaboré dans le fichier une comparaison de la tension de sortie à une consigne qui est l'image de la tension du réseau. Le résultat de la comparaison est corrigé s'il le faut pour donner la référence sinusoïdale.

Nous représentons sur la figure 5.6, le comportement de la tension de sortie lorsque la tension d'entrée varie de manière sinusoïdale. Les résultats sur cette figure seront comparés à ceux qui seront obtenus avec une régulation de la tension au paragraphe suivant.

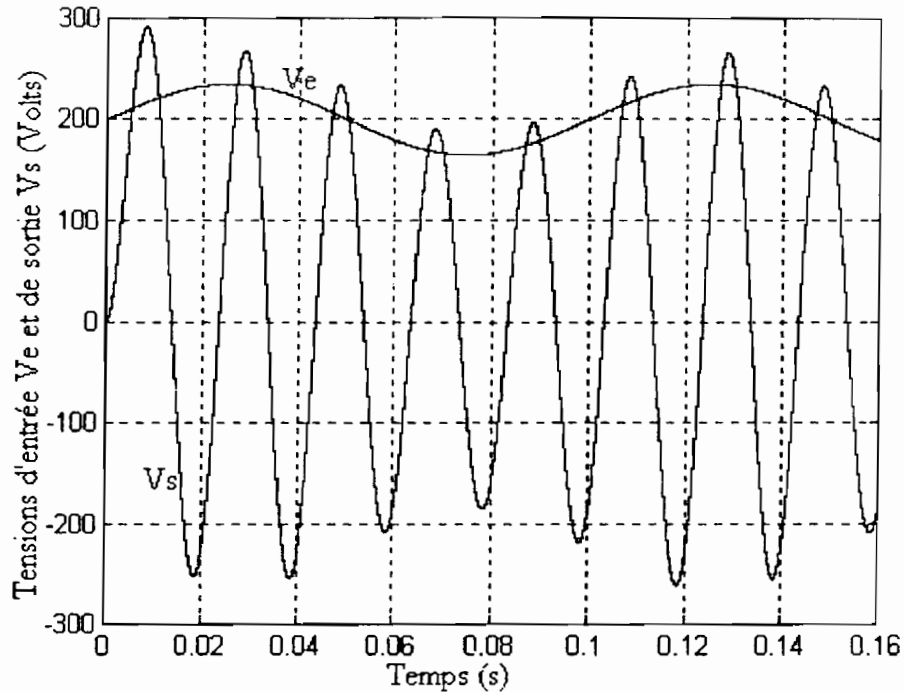


Figure 5.6 : Variation de la tension de sortie suite à une variation sinusoïdale de la tension d'entrée

5.1.2 FONCTIONNEMENT EN BOUCLE FERMÉE

Nous avons montré au niveau des paragraphes précédents que l'asservissement de la tension de sortie s'imposait pour obtenir un fonctionnement adéquat du système. En effet, nous savons que la tension du noeud continu est variable du fait de la nécessité de l'optimisation des générateurs, l'amplitude de cette variation étant inversement proportionnelle à la valeur du condensateur du noeud. La tension au niveau du noeud n'est donc pas régulée.

5.1.2.1 Recherche des coefficients du correcteur de l'onduleur

Comme pour les hacheurs, nous avons utilisé le modèle par schéma équivalent moyen de l'onduleur. Nous savons surtout que le fonctionnement de cet onduleur est similaire à celui d'un hacheur dévolteur pendant une alternance de la sinusoïde de référence.

Cette remarque nous a amené à procéder de la même manière et nous avons utilisé la même procédure pour déterminer les coefficients du correcteur.

Le correcteur utilisé ici est un correcteur à action Proportionnelle (P) dans un premier temps. En effet, nous cherchons à avoir une bonne précision ce qui nous impose l'utilisation d'un correcteur à action proportionnelle, pour réaliser la poursuite de la consigne.

Pour aussi tenir compte de la variation de la tension d'entrée, le coefficient proportionnel doit dépendre de cette dernière. Nous avons alors cherché après simulation à déterminer une loi de variation du coefficient K_p en fonction de la tension d'entrée. Nous avons aussi déterminé la plage de la tension d'entrée permettant un fonctionnement normal de l'onduleur.

Nous avons alors pour une régulation correcte avec une bonne précision, la tension d'entrée à prendre entre 60 V et 300 V. Dans cette zone de fonctionnement, nous avons le coefficient proportionnel K_p du correcteur qui donné par la loi définie sur la figure 5.7.

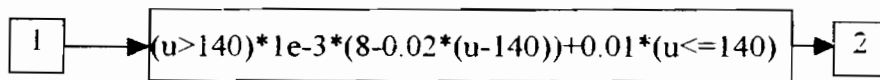


Figure 5.7 : Loi de variation du coefficient proportionnel du correcteur

5.1.2.2 Fonctionnement avec le régulateur

La loi de variation du coefficient proportionnel du correcteur a été insérée dans la chaîne d'élaboration de la référence sinusoïdale.

Pour tester son fonctionnement, nous avons fait varier la tension d'entrée de manière sinusoïdale avec une très basse fréquence et nous avons observé la tension de sortie. Le résultat est présenté sur la figure 5.8.

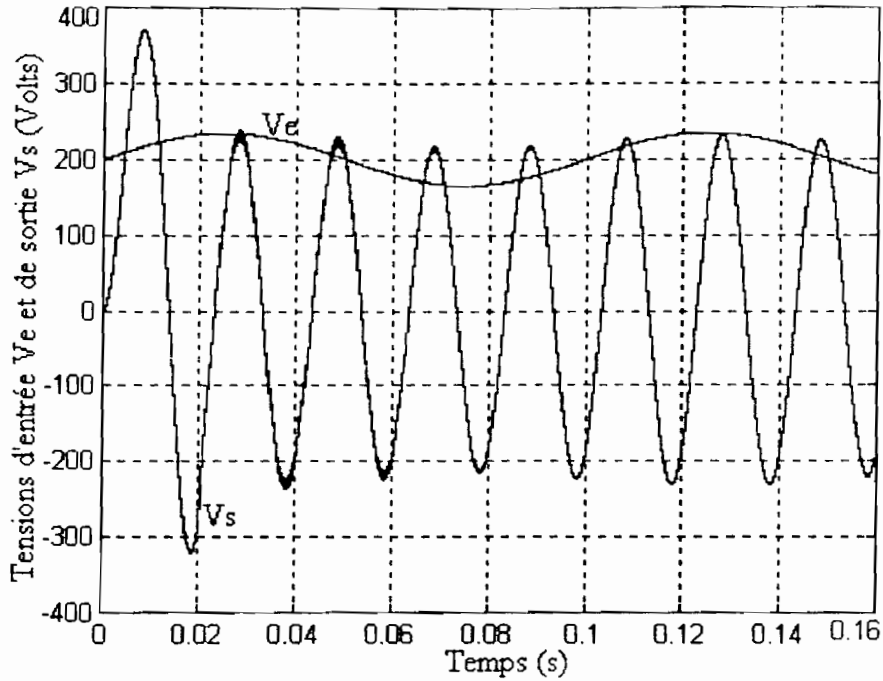


Figure 5.8 : Tension de sortie lorsque la tension d'entrée varie

Nous avons le régime transitoire qui dure environ une période de la sinusoïde de référence. Après cela, la sortie s'établit autour de la valeur efficace souhaitée.

Nous avons représenté la tension de sortie $V_s / \sqrt{2}$ de l'onduleur (Figure 5.8). Cette tension varie légèrement autour de la valeur de 310 V au régime permanent. Cette variation est telle que la valeur efficace de la tension de sortie est comprise entre 200 et 240 V. La régulation de la tension de sortie fonctionne donc correctement.

V.2 COUPLAGE DE L'ONDULEUR AUX GENERATEURS

Nous cherchons dans ce paragraphe à montrer la possibilité d'obtenir un fonctionnement stable du couplage de l'onduleur au noeud continu. Quel rôle peut jouer le condensateur dans ce dispositif ? Peut-il être source d'instabilité ? Comment le dimensionner pour un fonctionnement correct.

5.2.1 ROLE DU CONDENSATEUR DU NOEUD CONTINU

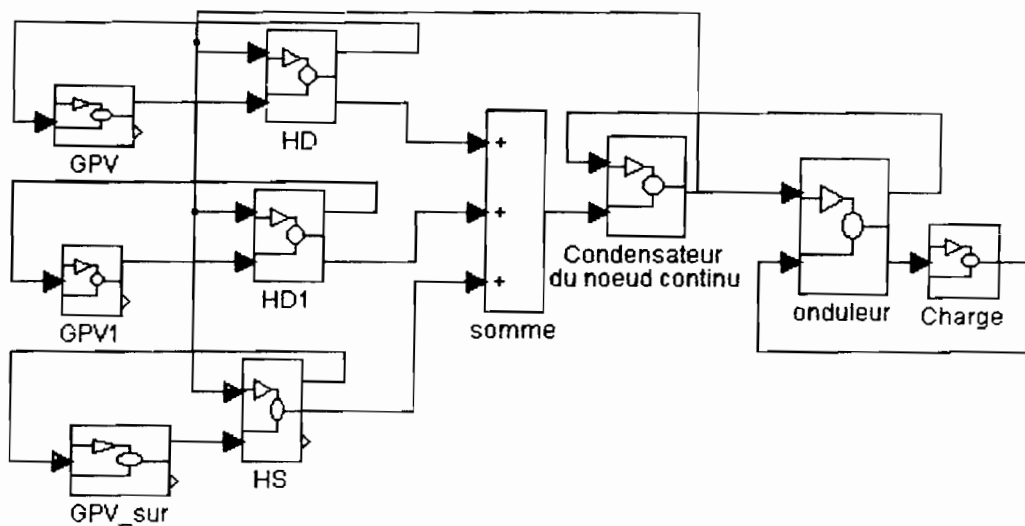


Figure 5.9 : Modèle de la centrale multigénérateurs

Le courant au niveau du noeud continu est très important de l'ordre de 400 A. De plus, les ondulations de courant vont être plus importantes que dans le cas uniquement des sources continues. En effet, en plus des ondulations introduites par les hacheurs dévolteurs, nous avons aussi le retour du courant de l'onduleur. Nous avons un courant provenant de l'inductance du filtre de l'onduleur pendant la phase de récupération. Ces courants expliquent la valeur très importante de l'intensité.

Ces valeurs du courant entraînent par conséquent, de ondulations plus importantes de la tension du noeud continu. Il est nécessaire que le condensateur au niveau du noeud soit important pour que l'ondulation soit réduite.

En effet, nous devons avoir pour une ondulation de tension $\Delta U \leq 2V$ et une fréquence de fonctionnement de $F = 20 \text{ KHz}$, le condensateur C qui est donné par :

$$C \geq \frac{I}{4 * \pi * F * \Delta U}$$

$$C \geq 2..5\text{mF}$$

Cette valeur est supérieure à la valeur déterminée précédemment car elle ne prenait pas en compte les ondulations introduites par les hacheurs.

Nous avons finalement choisi pour le condensateur de couplage, une valeur de 20 mF.

Pour tester le bon fonctionnement du système, nous avons procédé à des variations de la charge. Avec une perturbation de la charge, comme nous l'avons montré au paragraphe 5.1.1.1, la tension de sortie ne subit pas une perturbation significative.

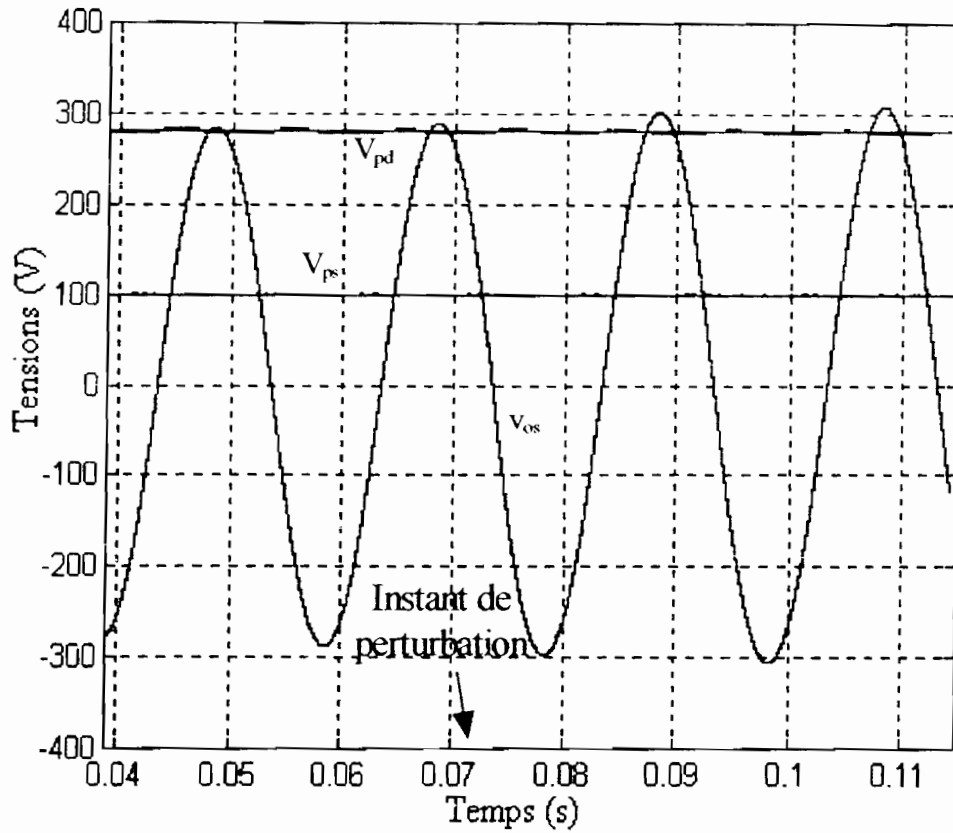


Figure 5.10: Tensions du système après une diminution de la charge de 18 %

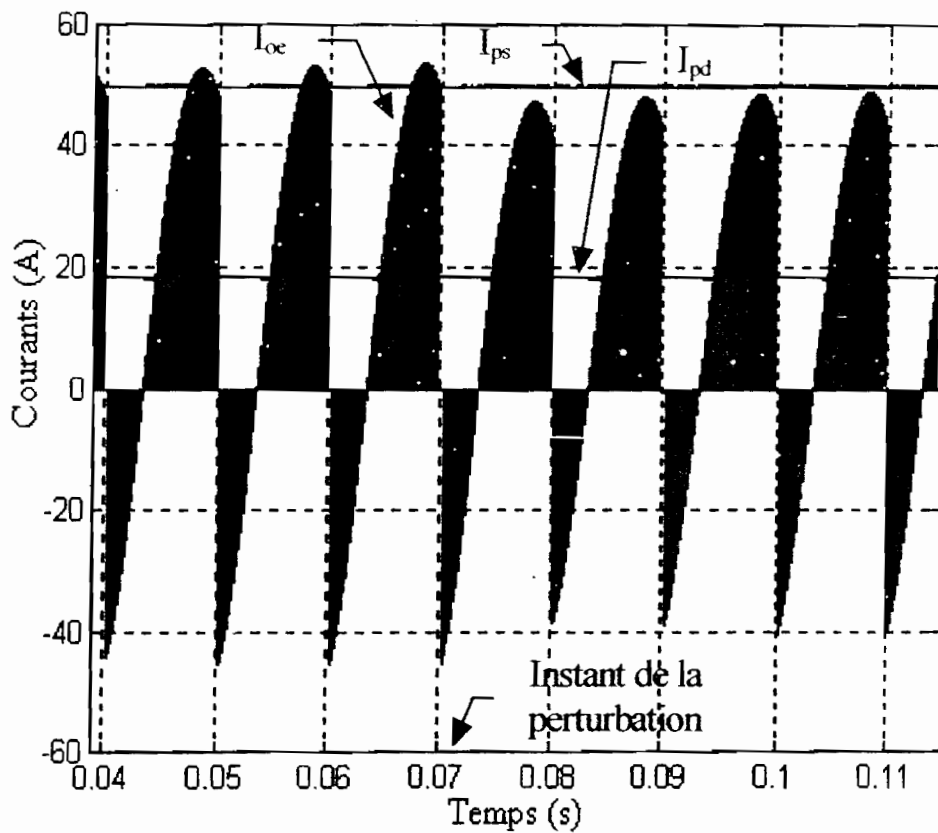


Figure 5.11: courants du système après une diminution de la charge de 18 %

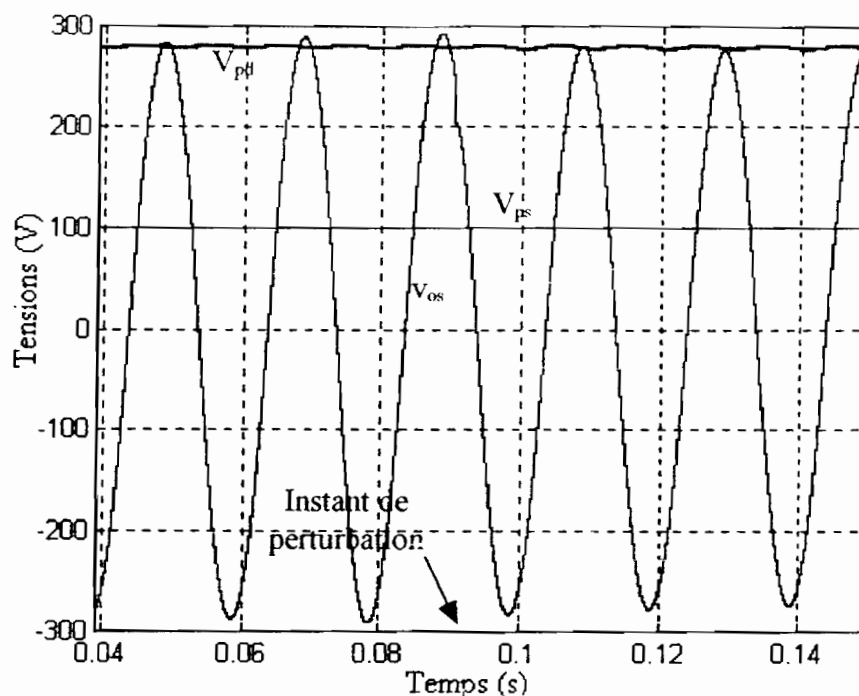


Figure 5.12: Tensions du système après une augmentation de la charge de 18 %

Les formes d'onde des tensions des générateurs photovoltaïques avec leur régulateur sont présentées sur les figures 5.11 et 5.12. Nous avons procédé à une perturbation de la charge. Nous ne constatons pas de perturbations notoires au niveau des générateurs.

La tension de sortie garde sa même allure. Nous constatons une légère déformation lorsque la charge diminue. Nous avons montré dans les paragraphes précédents que lorsque la charge diminuait, le système tendait à diminuer son degré de stabilité et qu'une charge plus importante améliorer son degré de stabilité.

C'est ce phénomène que nous observons sur le couplage des systèmes photovoltaïques avec l'onduleur. Les variations observées étant très faibles, nous pouvons en déduire que la possibilité d'une connexion avec le réseau existe.

5.2.2 CONCLUSION

Le fonctionnement du système est caractérisé par une stabilité satisfaisante. Nous avons constaté que le condensateur utilisé au niveau du noeud continu satisfait aux conditions de

fonctionnement. Nous avons un découplage du fonctionnement quasi parfait des générateurs pour une bonne plage de la tension du noeud continu. Les perturbations de la charge ne sont pas transmises aux générateurs. L'optimisation des générateurs est réalisée aussi bien en présence de perturbation de la charge que de l'ensoleillement.

Cette régulation permettant l'asservissement de la tension de sortie de l'onduleur à une consigne, nous permettra d'envisager le couplage de l'onduleur avec le réseau. L'objectif de la réalisation de la microcentrale entreprise par le Laboratoire des Energies Renouvelables au sein de son groupe de recherche E³PIA comporte aussi la gestion de l'échange d'énergie entre la centrale et le réseau.

La présence du réseau dans la réalisation de la microcentrale est primordiale. Il n'y a pas de stockage d'énergie au niveau de la microcentrale donc pour une optimisation du transfert d'énergie des générateurs à énergie renouvelable, il nous faut une charge suffisante pour consommer toute la puissance produite, rôle que peut jouer parfaitement le réseau.

L'absence de stockage permanent d'énergie au niveau du noeud continu impose l'utilisation d'un autre système de couplage. Nous avons ainsi utilisé un condensateur et avons étudié dans ce chapitre la stabilité de fonctionnement d'un tel système.

La valeur du condensateur a une importance fondamentale dans le fonctionnement du système. Sa valeur doit être suffisante pour un filtrage satisfaisant de l'ondulation de la tension au niveau du noeud continu. Ce condensateur permet aussi de réaliser en instantané un découplage quasi parfait des générateurs, donc une possibilité d'optimisation de chaque générateur indépendamment des autres. Nous avons donc des degrés de liberté pour chaque générateur ainsi que pour l'onduleur aussi.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans ce document ont porté essentiellement sur la conception de modèles des systèmes à base de générateurs photovoltaïques. Ces systèmes comportent la plupart du temps des convertisseurs statiques qui ont un fonctionnement non linéaire. La connaissance du comportement global de ces systèmes est fondamentale pour le dimensionnement des différents éléments les constituant.

Pour la détermination des modèles, nous avons utilisé la méthode des schémas équivalents moyens. Cette méthode nous a permis d'utiliser les outils de l'automatique pour une détermination de manière systématique, des correcteurs nécessaires permettant d'obtenir des performances appréciables des systèmes. Par rapport à la méthode empirique utilisée pour déterminer les correcteurs, nous avons ainsi montré que la modélisation par schéma équivalent moyen permet d'avoir un outil scientifique rigoureux pour étudier le comportement des convertisseurs statiques.

Dans les systèmes photovoltaïques, les batteries constituent des éléments importants tant dans la stabilisation du fonctionnement que du découplage des générateurs qui lui sont connectés. Mais ces batteries contribuent à dégrader les performances du système, surtout lorsqu'elles vieillissent. Elles ont aussi un coût assez conséquent dans l'investissement du système et aussi un encombrement, sans compter les problèmes de recyclage qu'elles posent en fin d'usage.

Pour pallier à ces inconvénients, nous avons cherché à remplacer les batteries par un condensateur électrochimique. Le condensateur présentant un encombrement moindre que les batteries, se prête à une intégration plus aisée. Mais cette substitution aura comme conséquence une augmentation du degré d'instabilité du système.

Pour ce faire, il faut que le condensateur associé aux asservissements et régulations permette un fonctionnement stable du système. Nous avons montré dans nos travaux que le couplage par un condensateur électrochimique était possible. Il est possible, en utilisant une batterie de condensateurs (de capacité raisonnable) de stabiliser le fonctionnement du système. Nous avons montré aussi que la valeur du condensateur a une importance

fondamentale. Son rôle de filtre doit permettre de réduire les ondulations de la tension du noeud continu, les ondulations pouvant induire à un fonctionnement instable

De plus, nous avons montré la possibilité d'asservir de manière précise la tension de sortie de l'onduleur ce qui ouvre des perspectives pour son couplage avec le réseau de distribution d'électricité. La tension de sortie a été asservie à une consigne qui peut être la tension d'une autre source d'énergie en particulier le réseau d'électricité.

Nous avons dans cette chaîne énergétique un ensemble de degré de liberté qui peuvent être utilisés pour une amélioration des performances dans le fonctionnement du système. Nous avons réalisé l'optimisation du transfert d'énergie des générateurs photovoltaïques vers le noeud continu. Cette optimisation engendre une variabilité de la tension du noeud continu d'où la nécessité de l'asservissement de la tension de sortie de l'onduleur.

Cependant, pour que l'optimisation du transfert d'énergie soit possible, il faut que la charge soit capable de consommer toute la puissance disponible au niveau du noeud continu. Cette condition impose l'utilisation de charge suffisante ou de transférer le surplus d'énergie vers d'autres utilisations par l'intermédiaire du réseau national.

Ce couplage au réseau national constitue une possibilité et devra être menée dans le cadre d'études au niveau du Laboratoire. La mise en pratique de ces résultats se fera dans le cadre de la réalisation de la microcentrale multigénérateurs en cours actuellement au niveau du groupe de recherche E³PIA du LER.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : **B. CHABOT** (ADEME - ADR) : « Electrification rurale ; Méthode et outils d'analyse ». Systèmes solaires, Juillet - Août 1997, N° 120, pp 49-57.
- [2] **E. G. ERDIL** : « Rooftop electricity generating capacity of photovoltaic systems in North Cyprus », 13th EPEC, 23-24 October 1995, Nice France, pp 494-495.
- [3] **G. SOW, K. TALL, L. PROTIN** : « Dynamic behaviour of a static converter coupled to a renewable energy generator », World Renewable Energy Congress. 11-12 September 1994, Reading U. K. pp 1678-1681.
- [4] **H. BÜHLER** : « Conception de systèmes automatiques, Complément au Traité d'Electricité », Presses Polytechniques Romandes, Première édition, 1988.
- [5] **B. WILLER, C. SCHMITZ, M. WOLLNY** : « battery units for autonomous energy supply systems », The World Directory of Renewable Energy, Suppliers and Services, 1997, pp 104-107.
- [6] **L. P. LANGEVINE** : « The rehabilitation of photovoltaic systems at rural health centres in Guyana », The World Renewable Energy Suppliers and Services, 1997, pp 104 - 107.
- [7] **G. SEGUIER** : « L'électronique de puissance, les fonctions et leurs principales applications », édition Bordas, Paris, 1990.
- [8] **J.P. CARON, J. P. HAUTIER** : « Le pont monophasé en commutation », Revue 3EI, n°0, Juin 1994
- [9] **Y. MIKO** : « Contribution à la mise en œuvre d'un onduleur monophasé de 2.5 KVA en modulation sinusoïdale déphasée à commande numérique », Mémoire de fin d'études, Diplôme d'Ingénieur Technologue, ENSUT, Juillet 1991.

-
- [10] **T. HOUNGAN** : « Simulateur d'un variateur de vitesse à commande vectorielle pour moteur asynchrone : contribution à l'optimisation de la conversion électromécanique pour l'entraînement d'une pompe centrifuge », Thèse Docteur - Ingénieur, ESP, Dakar, Juillet 1996.
- [11] **M. METZ** : « Méthode d'analyse des convertisseurs statiques par simulation analogique, Modèles de convertisseurs statiques. Simulation à câblage topologiquement conforme. » Thèse Docteur - Ingénieur, Université P. Sabatier Toulouse 1976.
- [12] **O. SAHRAOUI, L. GERBAUD, O. NORMAND ET J. ROUDET** : « Contribution à la modélisation des convertisseurs statiques pour la simulation à topologie variable. » Journal de Physique III, France 3, June 1993, pp 1221-1241.
- [13] **D. MATT, F. PRIEUR, G. GLAIZE** : simulation numérique en électronique de puissance : méthode de la topologie variable. » Journal de Physique III, France 4, January 1994, pp 55 - 73.
- [14] **THE MATH WORKS Inc** : « MATLAB high performance numeric computation and visualization software for Microsoft Windows », The Math Works, Inc. Natick, Mass, USA 1993.
- [15] **THE MATH WORKS, Inc** : « SIMULINK dynamic system simulation software for Microsoft Windows », The Math Works, Inc. Natick, USA, 1993.
- [16] **J. M. FAUCHER** : « Quelques aspects de la MLI », note interne, ENSEEITH-LEEI, Toulouse, Février 1993.
- [17] **J. PERARD, E. TOUTAIN ET M. NOUZARET** : « Modélisation des convertisseurs d'énergie par schéma équivalent. Proposition d'une méthode de calcul permettant de connaître le comportement d'un convertisseur en fonction des phénomènes extérieurs », L'Onde Electrique, 1979, Vol 59, N° 12, pp 81-88.
- [18] **C. BOISVINEAU, E. TOUTAIN, J. PERARD** : « Modélisation des hacheurs : Application à un système adaptateur d'impédance pour générateur photovoltaïque », Mesures - Régulation - Automatismes ; Avril 1980, pp 95-100.

- [19] **J. M ROLLAND** : « Contribution à l'étude des groupes de pompage photovoltaïque. Expérimentation et analyse de fonctionnement d'un moteur auto - synchrone à commutation naturelle alimenté par photopiles solaires ». Thèse Docteur INP Grenoble 1985.
- [20] **B. C KUO** : « Automatic Control Systems », Printice - Hall Book Company, Englewood Cliffs, New - York, 1991, 6^{ème} édition.
- [21] **Z. ZINGER, A. BRAUNSTEIN** : « Dynamic matching of a solar electrical (photovoltaic) system. An estimation of the minimum requirements of the matching system », IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol, PAS 100, N° 3 March 1981.
- [22] **L. MARET** : « Régulation automatique, Complément au Traité d'Electricité », Presses Polytechniques Romandes, Première édition 1987.
- [23] **R. HANGNILO** : « Contribution à l'étude par modèle équivalent moyen d'un onduleur de tension destiné au couplage du générateur photovoltaïque au réseau », Rapport D.E.A, Université de Paris XII - ENSUT, 1992

Khaly TALL : Modélisation, Méthode de détermination systématique des correcteurs et simulation d'une chaîne énergétique

RESUME

Ce mémoire porte sur la détermination des régulateurs des systèmes à énergies renouvelables comportant des convertisseurs statiques, en vue de la mise en place d'une microcentrale multigénérateurs couplable sur le réseau.

Dans un premier temps, l'auteur fait une description des systèmes énergétiques composant la microcentrale pour dégager des points de fonctionnement autour desquels seront développés des modèles servant à la détermination des régulateurs.

Ces correcteurs sont déterminés de manière systématique en utilisant les outils classiques de l'automatique après une modélisation du système par schémas équivalents moyens. L'auteur dégage des résultats des possibilités d'étude des régulateurs des systèmes à énergie renouvelable comportant des convertisseurs statiques.

La dernière partie est consacrée à l'application des régulateurs au système de la microcentrale.

Une étude du couplage des générateurs par une batterie de condensateurs plutôt que par un système de stockage par accumulateurs est réalisée notamment l'obtention d'un fonctionnement stable grâce à l'utilisation des régulateurs.

L'auteur a aussi montré la faisabilité du couplage de la microcentrale au réseau électrique, grâce à l'asservissement de la tension de sortie de l'onduleur à une consigne qui peut être le signal du réseau électrique. Dans cette partie aussi, l'auteur donne les résultats de la simulation avec les régulateurs déterminés à partir des modèles par schéma équivalent moyen.

MOTS - CLEFS

- générateur photovoltaïque
- convertisseurs statiques
- modélisation
- simulation
- régulateurs
- optimisation