

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية +
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf -Msila

Faculté de Technologie

Département : Génie Électrique



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

كلية التكنولوجيا

قسم : الهندسة الكهربائية

Réf : CE-05

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Option : Commande Électrique

Présentés par :

DJAGHLOUL YASSER

DERRADJI MEHDI SEDDIK

Thème :

**ÉTUDE D'UN SYSTEME DE POMPAGE
PHOTOVOLTAIQUE**

Devant le jury composé de:

| | | | | |
|---------------------|-------------------|--------------|------------------|----------------------------|
| Dr. ZOUGGAR | Eloualid | M.C.B | President | Université de Msila |
| Dr.BENDAIKHA | Abdelmalik | M.C.A | Encadreur | Université de Msila |
| Dr. LAAMARI | Yahia | M.C.A | Examineur | Université de Msila |

Année Universitaire: 2021/2022

REMERCIEMENT

Nous remercions Allah tout puissant, qui nous a donné la force et la patience pour l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions mes chers parents qui nous ont donné la volonté pour la réussite de ce travail.

*Nous exprimons toutes nos gratitudees à **Mr. Bendaikha Abdelmalik** pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi. Cela a été un plaisir et un honneur de travailler avec lui.*

Nous adressons également nous remerciments à tous nous enseignants, pour leurs aides inestimables, qui nous ont donné.

Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineurs.

Nous tenons à remercier aussi l'ensemble du personnel de la faculté des sciences et technologies surtout le département Génie Électrique.

Nous remercions aussi toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail

Dédicaces

On dédie ce modeste travail à qui nous sont les plus chers.

A nos très chères mères, nos pères, à nos très chers frères
et sœurs.

A toute la famille et à tous mes amis.

A tous mes amis de la promotion.

A tous qui me sont chères.

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 11 |
| I. Chapitre 01 : État de l'art d'un system de pompage photovoltaïque..... | 14 |
| I.1 Introduction : | 14 |
| I.2 Historique de l'Energie photovoltaïque : | 15 |
| I.2.1 L'Energie renouvelable en Algérie : | 15 |
| I.3 Le rayonnement solaire : | 16 |
| I.4 Les principales technologies de cellules photovoltaïques :..... | 17 |
| I.4.1 Cellules solaires : | 17 |
| I.4.2 Cellules monocristallines : | 18 |
| I.4.3 Cellules polycristallines : | 18 |
| I.4.4 Association en série : | 19 |
| I.4.5 Association en parallèle : | 19 |
| I.4.6 Association mixte : | 20 |
| I.5 Les systèmes solaires PV :..... | 20 |
| I.5.1 Systèmes PV autonomes : | 20 |
| I.5.2 Systèmes PV raccordés au réseau électrique | 20 |
| I.5.3 D Systèmes PV hybrides : | 21 |
| I.6 Méthodes de pompage PV : | 21 |
| I.6.1 Pompage au fil du soleil :..... | 21 |
| I.6.2 Pompage avec stockage électrochimique :..... | 22 |
| I.7 Les composants d'un système de pompage photovoltaïque :..... | 23 |
| I.7.1 Générateur photovoltaïque :..... | 24 |
| I.7.2 Convertisseurs continu/continu (DC/DC) : | 24 |
| I.7.3 Convertisseur DC/AC (onduleur) : | 25 |
| I.7.4 Groupe motopompe : | 26 |
| I.8 Les types des pompes : | 28 |
| I.8.1 La pompe volumétrique : | 29 |
| I.8.2 La pompe centrifuge : | 29 |
| I.8.3 Choix d'une pompe : | 30 |
| I.9 Conclusion | 31 |
| II. Chapitre 02 : Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque..... | 32 |
| II.1 Introduction : | 32 |
| II.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïques :..... | 32 |
| II.2.1 Modélisation et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque : | 32 |
| II.3 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour conditions atmosphériques standards : | 34 |
| II.4 Influence des conditions atmosphériques sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension : | 35 |
| II.4.1 Influence de l'éclairement : | 35 |
| II.4.2 Influence de la température : | 36 |
| II.5 Modélisation de Le hacheur (BOOST) :..... | 36 |
| II.6 Modélisation de L'onduleur : | 38 |
| II.6.1 Stratégie de commande MLI sinusoïdale : | 39 |
| II.7 Modélisation de la MAS :..... | 42 |
| II.7.1 Description des bobinages statoriques et rotoriques : | 42 |
| II.7.2 Hypothèses simplificatrices : | 43 |
| II.7.3 Équations de la MAS dans le repère (abc) : | 43 |
| II.8 Transformation de Park : | 47 |
| II.9 Choix référentiel : | 49 |

| | | |
|---------------|---|-----------|
| II.10 | Modélisations de la pompe centrifuge : | 49 |
| II.10.1 | Pertes de charges linéaires : | 50 |
| II.10.2 | Pertes de charges singulières (locale) : | 51 |
| II.10.3 | Calcul de puissance : | 52 |
| II.10.4 | Calcul du rendement : | 52 |
| II.11 | Conclusion : | 52 |
| III. | Chapitre 03 : Stratégie de commande d'un système de pompage photovoltaïque | 53 |
| III.1 | Introduction : | 53 |
| III.2 | Technique de la commande MPPT : | 53 |
| III.2.1 | Méthodes de la commande MPPT : | 54 |
| III.2.2 | Principes de fonctionnement de l'algorithme P&O : | 54 |
| III.3 | Commande DTC de la machine asynchrone : | 56 |
| III.3.1 | Concept du « FOC » contre le concept du « DTC » : | 56 |
| III.4 | Principes généraux de la commande DTC d'un MAS | 57 |
| III.4.1 | Contrôle du vecteur flux statorique : | 58 |
| III.4.2 | Contrôle du vecteur flux électromagnétique : | 59 |
| III.5 | Descriptions de la structure du DTC : | 59 |
| III.5.1 | Sélection du vecteur de tension : | 59 |
| III.5.2 | Estimation du flux statorique : | 60 |
| III.5.3 | Estimation du couple électromagnétique : | 62 |
| III.6 | Correcteurs d'hystérésis : | 62 |
| III.6.1 | Correcteurs d'hystérésis de flux (à 2 niveaux) : | 62 |
| III.6.2 | Correcteurs d'hystérésis de couple (à 3 niveaux) : | 63 |
| III.7 | Élaborations des tables de commutation : | 64 |
| III.8 | Simulation avec la commande MLI | 65 |
| III.8.1 | Résultats de simulation : | 65 |
| III.9 | Résultats de simulation en utilisant la DTC | 71 |
| III.10 | Conclusion : | 77 |
| | Conclusion générale : | 78 |
| | Référence bibliographique : | 80 |
| | ANNEXE : | 83 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----------|
| TABLEAU I-1 POTENTIEL SOLAIRE EN ALGERIE | 16 |
| TABLEAU I-2 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE DIFFERENTS TYPES DES MOTEURS ELECTRIQUES | 27 |
| TABLEAU III-1 COMPARAISON QUALITATIVE ENTRE LES DEUX METHODES DE COMMANDE. | 57 |
| TABLEAU III-2 TABLE DE SELECTION DE V_s..... | 60 |
| TABLEAU III-3 STRATEGIE DE COMMANDE AVEC UN COMPARETEUR A HYSTERESIS A TROIS NIVEAUX (AVEC LES VECTEURS TENSION NULS) | 64 |
| TABLEAU III-4 STRATEGIE DE COMMANDE AVEC UN COMPARETEUR A HYSTERESIS A TROIS NIVEAUX (SANS LES VECTEURS TENSION NULS) | 64 |

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

| | |
|--|----|
| FIGURE I-1 REPONSE SPECTRALE D'UNE CELLULE (PV) | 16 |
| FIGURE I-2 CONSTITUTION D'UNE CELLULE PV TYPIQUE..... | 17 |
| FIGURE I-3 CELLULES IDENTIQUES EN SERIE | 19 |
| FIGURE I-4 CELLULES IDENTIQUES EN PARALLELES..... | 19 |
| FIGURE I-5 ASSOCIATION MIXTE $N_S * N_P$ MODULES SOLAIRES..... | 20 |
| FIGURE I-6 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DU POMPAGE AU FIL DU SOLEIL..... | 22 |
| FIGURE I-7 POMPAGE PV AVEC STOCKAGE D'ENERGIE..... | 22 |
| FIGURE I-8 SCHEMA SYNOPTIQUE DE LA CHAINE POMPAGE D'EAU PV | 23 |
| FIGURE I-9 PRESENTATION D'UNE CELLULE, D'UN MODULE ET D'UN CHAMP PV. ... | 24 |
| FIGURE I-10 STRUCTURE D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE..... | 26 |
| FIGURE I-11 POMPES A PISTON..... | 29 |
| FIGURE I-12 POMPE CENTRIFUGE | 30 |
| FIGURE I-13 CHOIX D'UNE POMPE SELON LA HAUTEUR ET LE DEBIT DEMANDES ... | 31 |

CHAPITRE 2

| | |
|---|----|
| FIGURE I. 1 CIRCUIT EQUIVALENT D'UNE SEULE CELLULE PV | 32 |
| FIGURE II. 2 SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE PV MODELE A DEUX DIODES . | 34 |
| FIGURE II. 3 CARACTERISTIQUES DU MODULE PV POUR CONDITIONS ATMOSPHERIQUES STANDARDS (A) CARACTERISTIQUE IGPV-VGPV (B) CARACTERISTIQUE PGPV VGPV | 34 |
| FIGURE II. 4 CARACTERISTIQUES IGPV-VGPV ET PGPV-VGPV POUR DIFFERENTS ECLAIREMENTS A 25 °C. | 35 |
| FIGURE II. 5 CARACTERISTIQUES IGPV-VGPV ET PGPV-VGPV DIFFERENTES TEMPERATURES A 1000 W/M2. | 36 |
| FIGURE II. 6 SCHEMA DE PRINCIPE D'UN CONVERTISSEUR BOOST. | 37 |
| FIGURE II. 7 : SCHEMAS EQUIVALENTS DE L'HACHEUR SURVOLTEUR (A) : K FERME,(B) OUVERT | 37 |
| FIGURE II. 8 SUIVANTE REPRESENTE LA MODELISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE..... | 38 |
| FIGURE II. 9 SCHEMA DE SIMULATION DE LA COMMANDE MLI SINUSOÏDALE | 40 |
| FIGURE II. 10 (A) REPRESENTATION DE LA PORTEUSE ET LA MODULANTE, (B) RESULTATS DE SIMULATION DE SIGNALES DE COMMANDE..... | 41 |
| FIGURE II. 12 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES ENROULEMENTS DE LA MAS. | 42 |
| FIGURE II. 13 DISPOSITION DES ENROULEMENTS TRIPHASES | 43 |
| FIGURE II. 14 PRINCIPE DE LA TRANSFORMEE DE PARK MAS (TRIPHASE VERS LE DIPHASE). | 47 |

CHAPITRE 3

| | |
|--|----|
| FIGURE III.1 ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME PERTURBATION ET OBSERVATION (P&O) | 54 |
| FIGURE III.2 CARACTERISTIQUE PUISSANCE–TENSION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE. | 55 |
| FIGURE III.3 CONVERTISSEUR BOOST DC/DC AVEC REGULATEUR PID | 55 |
| FIGURE III.4 LA COMMANDE A FLUX ORIENTE DE LA MACHINE ASYNCHRONE | 56 |
| FIGURE III.5 LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE | 56 |
| FIGURE III.6 SCHEMA STRUCTUREL DE LA COMMANDE DTC. | 57 |
| FIGURE III.7 ÉVOLUTION DU VECTEUR Φ_s DANS LE REPERE (A, B) | 59 |
| FIGURE III.8 SELECTION DU VECTEUR TENSION SELON LA ZONE N=1. | 60 |
| FIGURE III.9 COMPARATEUR A HYSTERESIS A DEUX NIVEAUX POUR LE CONTROLE DU FLUX..... | 62 |
| FIGURE III.10 COMPARATEUR A HYSTERESIS A TROIS NIVEAUX POUR LE REGLAGE DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE | 63 |
| FIGURE III.11 TENSION ET COURANT DE SORTIE DU GPV(V) | 65 |
| FIGURE III.12 ZOOM DE LA TENSION ET LE COURANT DE SORTIE DU GPV(V) | 65 |
| FIGURE III.13 TENSION DE SORTIE DE L'HACHEUR BOOST AVEC SA REFERENCE ... | 66 |
| FIGURE III.14 LES TENSIONS DE SORTIE DE L'ONDULEUR..... | 66 |
| FIGURE III.15 LES TROIS COURANTS STATORIQUES | 66 |
| FIGURE III.16 ZOOM DES TROIS COURANTS STATORIQUES | 67 |
| FIGURE III.17 SPECTRE DE FREQUENCE DU COURANT STATORIQUE ET THD (%). | 67 |
| FIGURE III.18 LE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE ET LE COUPLE RESISTANT..... | 68 |
| FIGURE III.19 ZOOM DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE..... | 68 |
| FIGURE III.20 REPONSE DE LA VITESSE DE ROTATION | 68 |
| FIGURE III.21 FLUX STATORIQUE..... | 68 |
| FIGURE III.22 LA TRAJECTOIRE DU FLUX STATORIQUE..... | 69 |
| FIGURE III.23 L'EVOLUTION DU DEBIT QV EN FONCTION DU TEMPS | 69 |
| FIGURE III.24 L'EVOLUTION DE LA HAUTEUR MANOMETRIQUE EN FONCTION DU TEMPS..... | 70 |
| FIGURE III.25 L'EVOLUTION DE LA PUISSANCE UTILE EN FONCTION DU TEMPS. | 70 |
| FIGURE III.26 TENSION DE SORTIE DE L'HACHEUR BOOST AVEC SA REFERENCE ... | 71 |
| FIGURE III.27 LES TENSIONS A LA SORTIE DE L'ONDULEUR..... | 71 |
| FIGURE III.28 LES TROIS COURANTS STATORIQUES | 72 |
| FIGURE III.29 ZOOM DES TROIS COURANTS STATORIQUES | 72 |
| FIGURE III.30 SPECTRE DE FREQUENCE DU COURANT STATORIQUE ET THD (%). | 72 |
| FIGURE III.31 LE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE ET LE COUPLE RESISTANT..... | 73 |
| FIGURE III.32 ZOOM DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE..... | 73 |
| FIGURE III.33 REPONSE DE LA VITESSE DE ROTATION | 73 |
| FIGURE III.34 FLUX STATORIQUE..... | 74 |
| FIGURE III.35 LA TRAJECTOIRE DU FLUX STATORIQUE..... | 74 |
| FIGURE III.36 L'EVOLUTION DU DEBIT QV EN FONCTION DU TEMPS | 75 |
| FIGURE III.37 L'EVOLUTION DE LA HAUTEUR MANOMETRIQUE EN FONCTION DU TEMPS..... | 75 |
| FIGURE III.38 L'EVOLUTION DE LA PUISSANCE UTILE EN FONCTION DU TEMPS. | 75 |

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

ABREVIATION :

| | |
|-----------------|---------------------------------------|
| PV | Photovoltaïque. |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking. |
| PPM | Point de puissance maximale. |
| MLI | Modulation en Largeur d'Impulsion. |
| Sa,Sb,Sc | Axes statoriques du repère triphasé. |
| Ra,Rb,Rc | Axes rotoriques du repère triphasé. |
| Vdc | Tension du bus continu de l'onduleur. |
| MAS | Machine Asynchrone. |
| IGBT | Insulated Gate Bipolare Transistor. |
| P&O | Perturbation et Observation. |
| DTC | Direct Torque Control. |

SYMBOLES :

| | |
|------------------------|--|
| VGPV | La tension aux bornes de générateur PV (V). |
| IGPV | Le courant fourni par le générateur PV (A). |
| PGPV | La puissance fournie par le générateur PV (A). |
| I | Le courant fourni par la cellule (A). |
| I_{ph} | Photo-courant de la cellule (A). |
| ID | Courant de la diode (A). |
| I_{sh} | Courant circulant dans la résistance shunt de la cellule PV (A). |
| G | Eclairement (flux incident). |
| G_r | Eclairement standard (1000 W/m ²). |
| I_{ccr} | Courant de court-circuit dans les conditions atmosphériques standards (A). |
| T | Température de fonctionnement de la jonction en Kelvin (K). |
| T_r | Température standard (K). |
| λ | Coefficient de température du photo-courant (ou courant de court-circuit). |
| q | Charge d'électron ($q= 1,6.10^{-19} C$). |
| k | Constante de Boltzmann ($k= 1,38.10^{-23} J/K$). |

| | |
|-----------------------------------|--|
| α | Rapport cyclique. |
| v_s | Tension statorique (V). |
| i_s | Courant statorique (A). |
| ϕ_s | Flux statorique (Wb). |
| v_r | Tension rotorique (V). |
| i_r | Courant rotorique (A). |
| ϕ_r | Flux rotorique (Wb). |
| C_e | Couple électromagnétique (Nm). |
| J | Moment d'inertie. |
| C_r | Couple résistant (Nm). |
| f | Coefficient du frottement visqueux. |
| Ω | Vitesse mécanique de rotation (tr/min). |
| Q | Le débit d'eau (m ³ /s). |
| H | La hauteur totale (m). |
| ρ | Masse volumique (1000 kg/m ³). |
| g | Accélération de la pesanteur (9.81 m ² /s). |
| γ | Angle entre le vecteur flux rotorique et le vecteur flux statorique. |
| N_s | Vitesse de synchrone de rotation du champ tournant en tr/s |
| F | Fréquence des courants alternatifs en Hz, et $\omega = 2.\pi.f$ en rad/s |
| P | Nombre de paires de pôles. |
| V | Tension à la borne de la cellule [V] |
| I_s | Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A] |
| R_s | Résistance série [Ω]. |
| R_{sh} | Résistance shunt (ou parallèle) [Ω]. |
| L_s | Inductance cyclique statorique. |
| L_r | Inductance cyclique rotorique. |
| M | Inductance mutuelle cyclique entre le rotor et le stator. |
| θ_s | Angle électrique entre \vec{S}_a, \vec{d} . |
| θ_r | Angle électrique entre \vec{R}_a, \vec{d} . |
| $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ | Vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au stator. |
| $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ | Vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au rotor. |
| $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ | Vitesse angulaire de l'axe \vec{R}_a , par rapport à l'axe \vec{S}_a |

INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie. Cette consommation ne cesse de croître alors que les ressources non renouvelables comme le charbon, les hydrocarbures et l'uranium, aisément exploitables mais épuisables, ne cessent de diminuer car leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. D'autre part, cette consommation rapide des combustibles fossiles engendre des effets secondaires (augmentation de la pollution, dérèglement climatique ...) pouvant hypothéquer l'avenir de l'humanité. Ce constat associé au souci croissant de protection de notre environnement entraîne une montée en puissance des énergies renouvelables, en particulier solaires et éoliennes, justement pour la production d'électricité renouvelables. En revanche, cette production se caractérise par un coût important, un rendement relativement faible et une intermittence de la ressource ayant un comportement aléatoire.[1]

L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables à part entière. Ainsi, nous pouvons considérer cette source d'énergie comme une des énergies renouvelables capable de produire de l'électricité en grande quantité sur le long terme sans trop émettre de gaz à effet de serre. Un système de pompage photovoltaïque est un système écologique ayant une longue durée de fonctionnement. La configuration la plus simple de ce type de système est composée d'un panneau photovoltaïque et d'une pompe représentant le couplage direct entre une source et une charge. Malheureusement cette configuration ne permet pas toujours d'extraire la puissance maximale dont un panneau peut fournir vu que les paramètres météorologiques (ensoleillement et température) varient avec le temps. Cette perte de puissance peut être réduite en utilisant un module de poursuite du point de puissance maximale. Ce module peut être un convertisseur statique de type hacheur pour une pompe composée d'un moteur à courant continu ou d'un onduleur dans le cas d'une pompe à courant alternatif.[1]

Il existe deux principaux types d'applications pouvant être alimentées par l'énergie photovoltaïque, à savoir : les systèmes de production autonomes pour l'alimentation de sites isolés non connectés au réseau et les systèmes de production connectés à la distribution d'énergie. L'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire photovoltaïque

est le pompage de l'eau, en particulier dans les zones rurales très exposées au rayonnement solaire et sans accès au réseau. Deux méthodes de pompage d'eau photovoltaïque ont été utilisées, stockage électrochimique dans des batteries, et en l'absence de batteries (en plein soleil). Le système qu'on a choisi d'étudier dans le cadre du travail de ce mémoire est celui dit au fil du soleil (sans batteries). Ce système est plus simple et largement utilisé puisque l'énergie PV est utilisée directement à partir des panneaux PV.[2]

Les avantages de l'utilisation de pompes à eau alimentées par des systèmes photovoltaïques comprennent le faible entretien, la facilité d'installation, la fiabilité et l'adéquation entre les puissances générées et les besoins d'utilisation de l'eau. De plus, les réservoirs d'eau peuvent être utilisés à la place des batteries dans le système de pompage photovoltaïque [3].

Les travaux présentés dans ce mémoire c'est l'étude d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale et énergétiquement autonome. Le cas étudié, dans ce mémoire, concerne la commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque. Dans ce sens, et pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation associé à un algorithme MPPT. Dans notre étude, nous avons utilisé un algorithme MPPT, l'algorithme "Perturb and Observe" (P&O). Dans quelques applications industrielles, il est parfois nécessaire de maintenir la tension délivrée par le système photovoltaïque constante. Pour cela, un système de contrôle de cette tension est présenté. Nous avons étudié le cas d'une chaîne de pompage utilisant un moteur asynchrone triphasé comme moteur d'entraînement. Dans le but d'avoir la possibilité de régler le débit d'eau, et en se basant sur la caractéristique de proportionnalité entre la vitesse et le débit, la méthode de contrôle direct du couple, Direct Torque Control - DTC est utilisée pour la commande de la vitesse du moteur asynchrone. [4]

I. Chapitre 01 : État de l'art d'un system de pompage photovoltaïque

I.1 Introduction :

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement.

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Le système de pompage PV est généralement composé d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe. La machine asynchrone occupe un domaine très important dans l'industrie et les transports. Elle est appréciée pour sa robustesse, son faible coût d'achat et d'entretien. Sa commande est par contre plus difficile à réaliser que pour d'autres machines électriques [&]

Ce chapitre présentera les concepts de base de l'énergie solaire et de la production d'électricité par effet photovoltaïque. Les principaux éléments des systèmes photovoltaïques seront étudiés et un aperçu des différents types de systèmes photovoltaïques sera donné. Nous donnerons également un aperçu théorique des stratégies de pompage photovoltaïque en introduisant les composants qui composent ces types de systèmes et les éléments qui peuvent déterminer leurs dimensions.

I.2 Historique de l'Énergie photovoltaïque :

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur L'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Peason et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules Solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à L'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie

I.2.1 L'Énergie renouvelable en Algérie :

Les réalisations algériennes dans le domaine des énergies renouvelables sont très limitées en Comparaison avec l'actuelle évolution du parc d'énergie renouvelable mondial ou européen, qui A atteint des stades très avancés.

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant cinq décennies d'indépendance, malgré la position géographique stratégique du pays qui dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an, et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700kwh/m²/an au Nord et 2263kwh/m²/an au Sud.

[4] [5]

Le Tableau I-1 présente Potentiel solaire en Algérie.

| Régions | Région côtière | Hauts Plateaux | Sahara |
|--|----------------|----------------|--------|
| Superficie (%) | 4 | 10 | 86 |
| Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an) | 2650 | 3000 | 3500 |
| Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an) | 1700 | 1900 | 2650 |

Tableau I-1 Potentiel solaire en Algérie

I.3 Le rayonnement solaire :

Le soleil est l'origine de toute forme d'énergie sur terre. La production d'électricité photovoltaïque dépend de l'ensoleillement du lieu et de la température, autrement dit de sa localisation géographique, de la saison et de l'heure de la journée. Le spectre solaire est similaire à un corps noir à une température de 5800 K qui est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm . Il se décompose en trois bandes distinctes comme suit :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$)

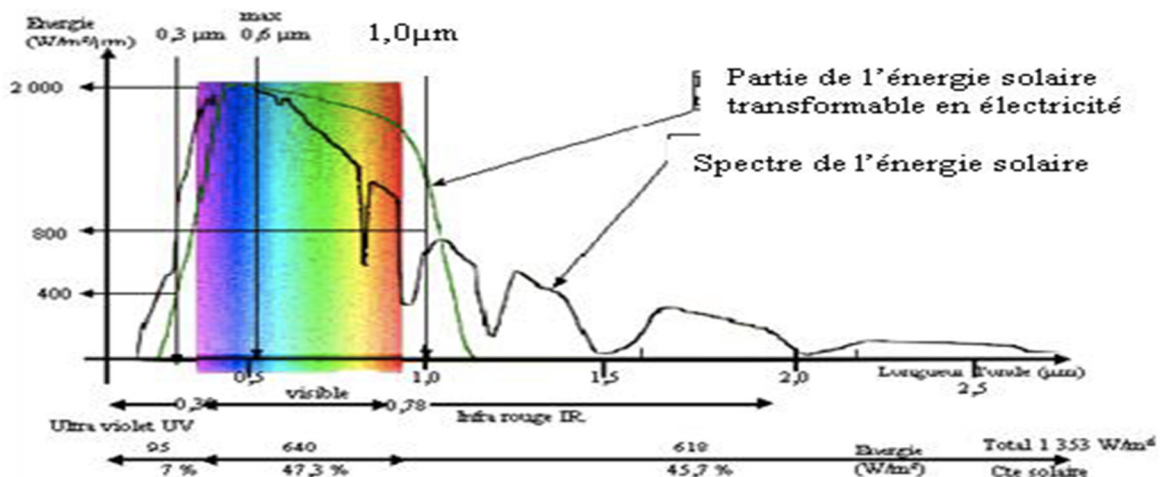


Figure I.1 Réponse spectrale d'une cellule (PV)

La densité de la puissance solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m^2 . Cependant, en traversant l'atmosphère, cette quantité s'atténue et perd son intensité. A la surface de la terre, la densité de puissance solaire est égale à 1000 W/m^2 . Elle variera par la suite en fonction de la localisation géographique

du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologique (poussière, humidité...), l'altitude du lieu [6].

Constitution d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules PV sont des composants électroniques semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont irradiés par le rayonnement solaire, génèrent une force électromotrice capable de transmettre du courant dans un circuit externe. Dans la plupart des cas, ces cellules sont en silicium. La cellule PV est l'élément de base de la conversion PV, qui se compose principalement de deux couches semi-conductrices de silicium dopées différemment, comme le montre la figure 1.2. Le silicium et les composés qui composent la première couche (couche N) (généralement Phosphore) a plus d'électrons que le silicium naturel. C'est ce qu'on appelle le silicium dopé N. Le silicium qui compose la deuxième couche (la couche P) est couplé à un élément (généralement du bore) qui a moins d'électrons que le silicium à l'état naturel. On dit alors silicium dopé P, à la frontière des couches P et N, une jonction PN avec une barrière de potentiel apparaît. Lorsque les cellules photovoltaïques sont exposées au rayonnement solaire.

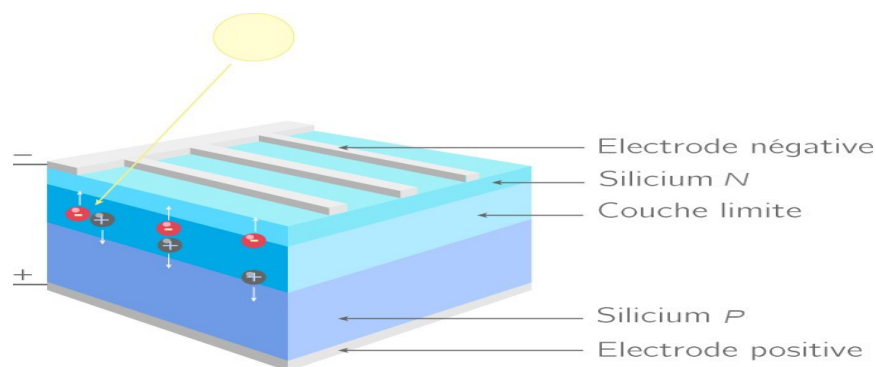


Figure I.2 Constitution d'une cellule PV typique.

I.4 Les principales technologies de cellules photovoltaïques :

Le générateur photovoltaïque est composé particulièrement par :

I.4.1 Cellules solaires :

Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), Capable de convertir directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet Photovoltaïque. Il existe trois types principaux de cellules [7] [8] [9] :

I.4.2 Cellules monocristallines :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %.

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients suivants :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère ;
- Il faut une grande quantité d' énergie pour obtenir un cristal pur ;
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée ;
- Rendement de (12 - 16%) jusqu'à 23% au laboratoire.

I.4.3 Cellules polycristallines :

Les cellules polycristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi Proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Les cellules poly- cristallines est caractérisées par :

- Coût de production moins élevée ;
- Nécessite moins d'énergie ;
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % au laboratoire.

De la cellule au module PV :

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.[10]

I.4.4 Association en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série (voir figure 1.3).

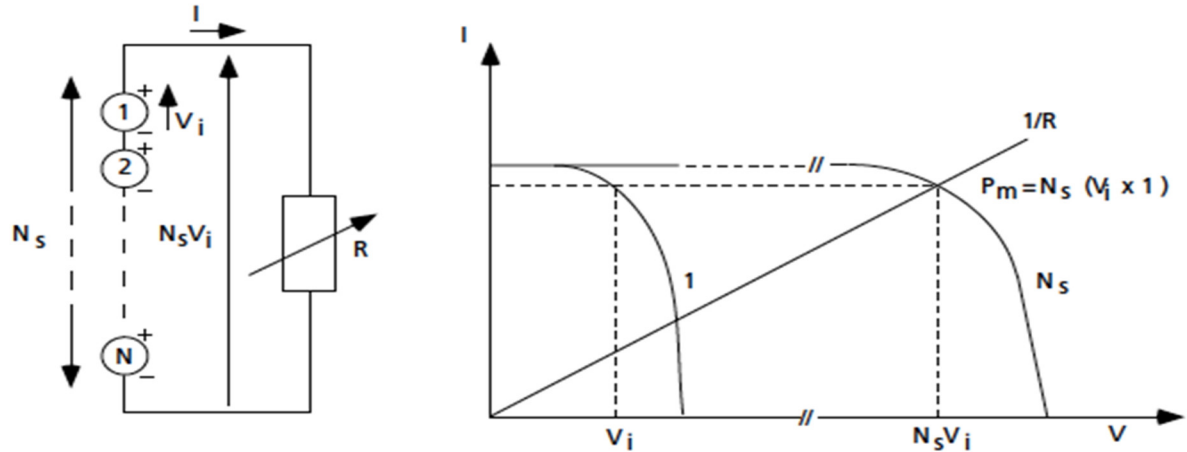


Figure I.3 Cellules identiques en série

I.4.5 Association en parallèle :

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche (voir figure I.4).

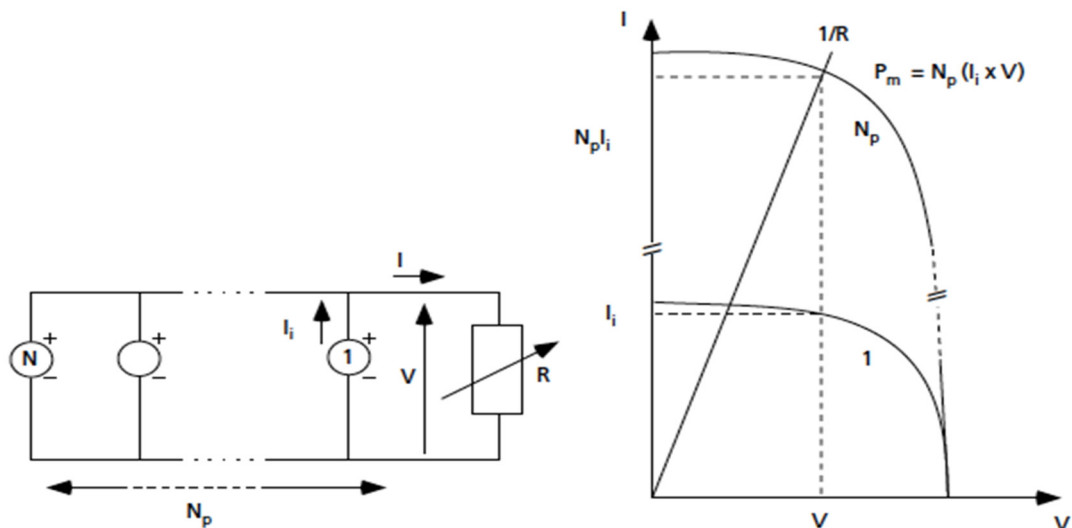


Figure I.4 Cellules identiques en parallèles

I.4.6 Association mixte :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle (voir figure I.5). [11]

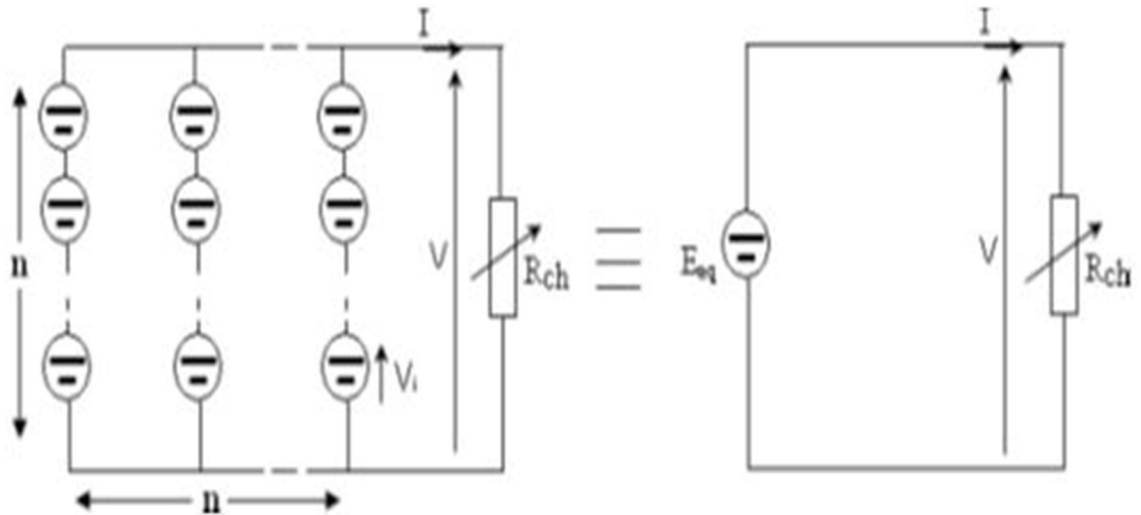


Figure I.5 Association mixte $N_s * N_p$ modules solaires

I.5 Les systèmes solaires PV :

Les trois types d'un system PV catégories [2,12].

I.5.1 Systèmes PV autonomes :

Ces systèmes sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recourir à d'autres sources d'énergie. Souvent, ces systèmes sont utilisés dans des zones éloignées du réseau et, selon l'utilisation, ils peuvent être installés soit sans alimentation, soit sur batteries pour assurer une alimentation adéquate pendant les longues journées nuageuses.

I.5.2 Systèmes PV raccordés au réseau électrique

En termes d'énergie et de coût, une unité connectée au réseau (ou à un centre de distribution) est souvent la meilleure solution pour la production d'énergie solaire. Ces installations sont constituées de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleurs. L'onduleur convertit le courant continu généré par les modules photovoltaïques et génère du courant alternatif en fonction du réseau.

I.5.3 D Systèmes PV hybrides :

Les systèmes hybrides sont généralement des systèmes photovoltaïques dans lesquels des panneaux solaires sont combinés à d'autres sources d'énergie, telles que des centrales électriques indépendantes hybrides combinées à des champs photovoltaïques, des éoliennes et des générateurs diesel (générateurs de secours de groupe), dont la combinaison en fait un Consommer des ressources naturelles renouvelables sur les sites de production pour assurer la sécurité d'approvisionnement et minimiser les perturbations environnementales quelles que soient les conditions atmosphériques

I.6 Méthodes de pompage PV :

« L'eau solaire » consiste à capter l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité qui alimente une pompe électrique permettant d'assurer l'exhaure de l'eau, le plus souvent, utilisée dans les zones rurales non desservies par le réseau électrique.

I.6.1 Pompage au fil du soleil :

Le pompage au fil du soleil utilise un réservoir pour stocker de l'eau jusqu'au moment de son utilisation. Cette installation est constituée d'un panneau photovoltaïque, alimentant une pompe assistée par un régulateur contrôleur. Cela rend le principe de fonctionnement relativement simple. Cette solution est moins couteuse, mais il est impossible de pomper au-dessus d'un certain niveau d'éclairement, la pompe, ne pouvant être amorcée sous une certaine puissance fournie, il y a donc pertes d'énergie au début et à la fin de la journée (voir figure I.6). [13]

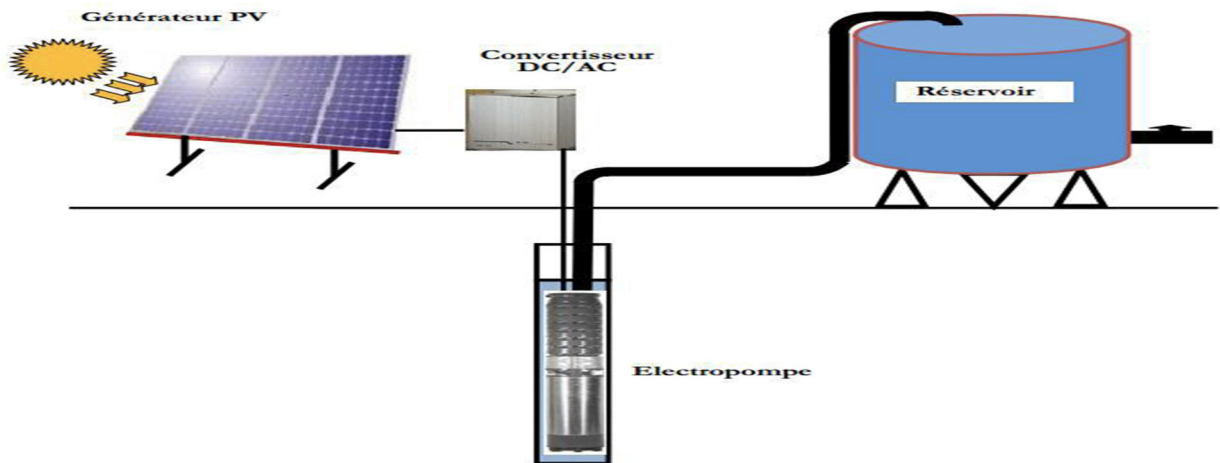


Figure I.6 Principes de fonctionnement du pompage au fil du soleil

I.6.2 Pompage avec stockage électrochimique :

Ce système utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée. La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et moto pompe. Dans notre application, nous avons choisi d'utiliser un système autonome sans stockage électrochimique, car les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Le pompage au fil de soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batteries [14].



Figure I.7 Pompage PV avec stockage d'Énergie

I.7 Les composants d'un système de pompage photovoltaïque :

Le système de pompage d'eau PV est généralement composé de :

- Générateur PV.
- Électronique de commande et de contrôle.
- Groupe motopompe.

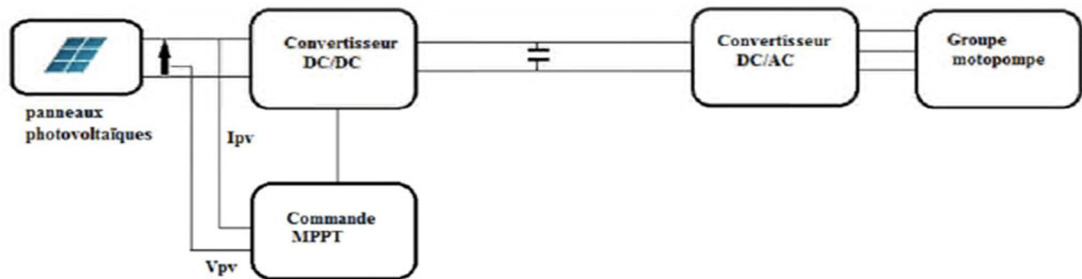


Figure I.8 Schéma synoptique de la chaîne pompage d'eau PV

Les performances d'un système de pompage solaire de l'eau dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température, situation géographiques, ...), et des caractéristiques des équipements (rendement, durée de vie, ...). Dans notre travail le système de pompage photovoltaïque est constitué de (voir Figure (I.8)):[15]

Des panneaux solaires photovoltaïques qui convertissent les rayonnements solaires en énergie électrique, interconnectés électriquement pour constituer une unité de production de courant continu.

Une unité de commande et contrôle de puissance, constituée d'un convertisseur (hacheur) et un convertisseur (onduleur), capable d'assurer des tensions à amplitudes et fréquences réglables en fonction de la puissance disponible du générateur solaire.

Un groupe électropompe immergé, constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.

Un câblage électrique, par lequel transitent l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité.

Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau du puits, jusqu'aux points de distribution.

I.7.1 Générateur photovoltaïque :

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV ou le générateur PV [16]

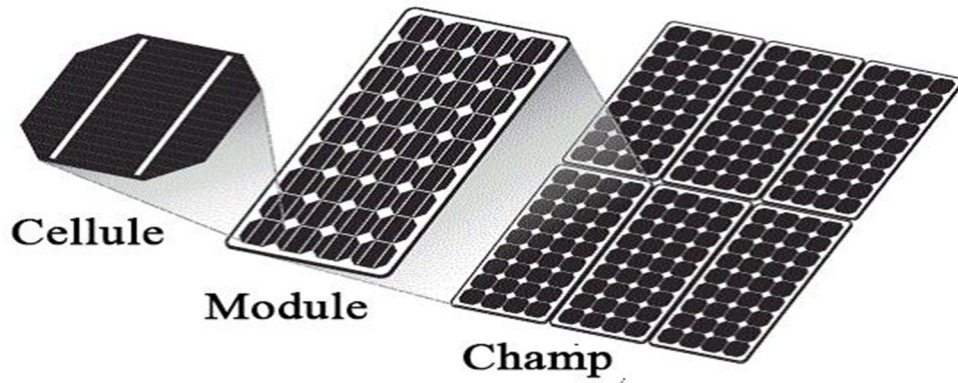


Figure I.9 Présentation d'une cellule, d'un module et d'un champ PV.

I.7.2 Convertisseurs continu/continu (DC/DC) :

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle les rendements sont bons. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT. Pendant le fonctionnement de le hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture égal à $(d.T_s)$ et un temps d'ouverture égal $(1-(d.T_s))$. [17]

Il y a différents types de convertisseurs DC/DC, nous distinguons :

I.7.2.1 Hacheur abaisseur (Buck) dans lesquels $\frac{V_s}{V_e} = d$

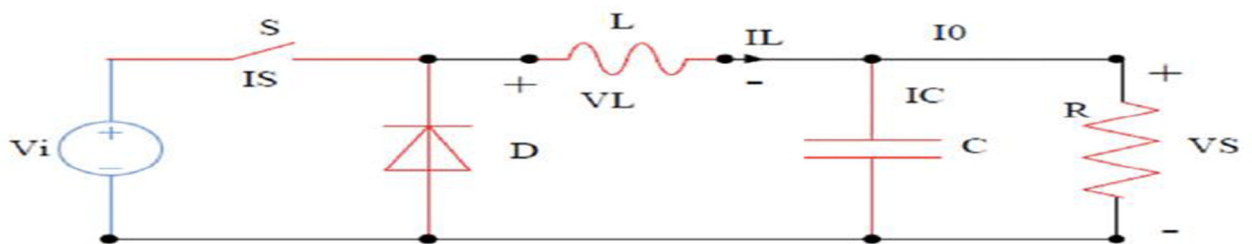


Figure I-10 Hacheur abaisseur (Buck).

I.7.2.2 Hacheur élévateur (Boost) dans lesquels : $\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-d}$

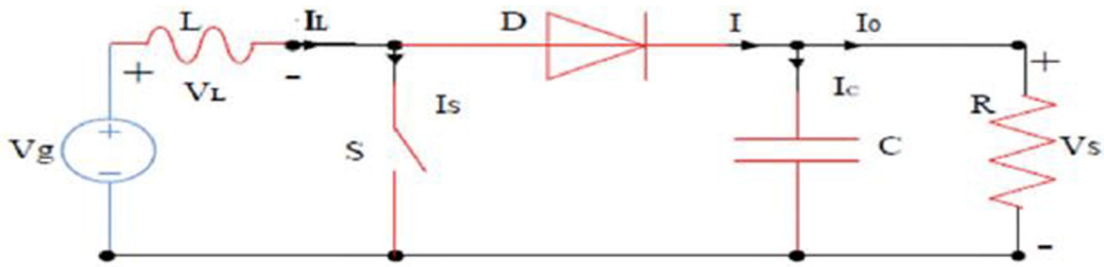


Figure I-11 Hacheur élévateur (Boost).

I.7.2.3 Hacheur abaisseurs/élévateur (Buck /Boost) dans les quels : $\frac{V_s}{V_e} = \frac{d}{1-d}$

I.7.3 Convertisseur DC/AC (onduleur) :

I.7.3.1 Définition :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé.

On distingue deux grands types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension, alimentés par une source de tension continue,
- Les onduleurs de courant, alimentés par une source de courant continu

I.7.3.2 Onduleur de tension :

Comme le montre la figure (I.12), l'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture ; ce sont des transistors de type IGBT auxquels sont placés des diodes en antiparallèle. L'onduleur est alors constitué de trois bras, dont les deux interrupteurs de chaque bras conduisent de manière complémentaire [18]. Les séquences de commutation des interrupteurs sont fonction de la commande à utiliser (commande en pleine onde, commande en MLI « Modulation de Largeur D'Impulsion »).

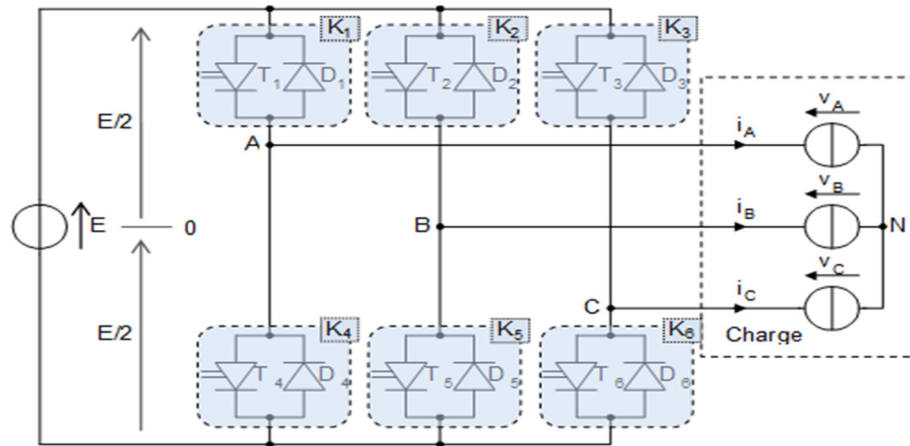


Figure I.10 Structure d'un onduleur de tension triphasé

I.7.4 Groupe motopompe :

I.7.4.1 Moteur :

- Critères du choix du type du moteur :

La pompe nécessite une énergie mécanique en entrée pour fonctionner. Cette énergie mécanique est fournie dans la plupart des cas par un moteur.

Généralement, trois types de moteurs sont utilisés dans les systèmes de pompage PV :

- Moteurs à courant continu.
- Les moteurs à courant alternatif (asynchrones).
- Les moteurs à courant continu, sans balais, à commutation électronique (Brushless permanent magnet DC Motor)

Les critères qui permettent d'établir le choix le plus judicieux du moteur sont les suivants [19]

:

- Bon rendement.
- Souplesse de fonctionnement.
- Robustesse du matériel afin de limiter au maximum l'entretien et les risques de pannes.
- Fiabilité et autonomie de l'installation.
- Faible puissance au démarrage.

- **Avantages et inconvénients des moteurs :**

Quelques avantages et inconvénients de chacun de ces moteurs [19]

| | Avantages | Inconvénients |
|--|---|--|
| Moteur asynchrone | <ul style="list-style-type: none"> - Disponible dans le marché avec un coût bas. - Son entretien est nul de fait de l'absence complète de pièces en frottement. - Son utilisation augmente l'autonomie et la fiabilité de l'installation. - Disponible pour une large plage de charge. - Le rapport puissance / poids est Élevé. | <ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'utiliser un onduleur avec des spécifications photovoltaïques (Coût supplémentaire). - Chute de rendement aux faibles puissances. - Appel de courant au démarrage qui peut atteindre cinq fois l'intensité normale. |
| Moteurs à courant continu avec balais | <ul style="list-style-type: none"> - Simplicité et facilité de régulation (variation de vitesse, couple,..) - Couplage direct avec le générateur (sans onduleur). -Rendement élevé pour les faibles charges. | <ul style="list-style-type: none"> - Présence de balais et collecteur qu'il faut vérifier périodiquement. - Plus lourd et plus coûteux. |
| Moteurs à courant continu sans balais (brushless DC) | <ul style="list-style-type: none"> - Rendement élevé pour une large gamme de vitesse. - Couplage directe avec le générateur photovoltaïque. -Moins de maintenance avec une bonne fiabilité. - Un rapport couple / poids élevé, d'où un volume modéré. | <ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un système de commutation (coût supplémentaire). |

Tableau I-2 Avantages et inconvénients de différents types des moteurs électriques

- Constitution et principe de fonctionnement :

Le moteur asynchrone est constitué de deux parties distinctes : le stator et le rotor. L'espace entre le stator et le rotor est appelé entrefer.

Le stator (partie fixe du moteur) est constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paires de pôles. Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme :

$$N_s = \frac{f}{p}$$

N_s : vitesse de synchronisme de rotation du champ tournant en tr/s.

F : fréquence des courants alternatifs en Hz, et $\omega = 2.\pi.f$ en rad/s

P : nombre de paires de pôles.

Le rotor, soumis à ce champ tournant, génère des courants induits qui, conformément à la loi de Lenz, s'opposent à cette rotation en entraînant la rotation du rotor dans le même sens, à la vitesse Ω (à la fréquence n).

Remarque : En charge, cette vitesse Ω est toujours légèrement inférieure à N_s , Rotor (partie mobile du moteur) : Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il existe deux types de rotor. [20]

Rotor à cage d'écureuil : Il porte un ensemble de barres conductrices, très souvent en aluminium, logées dans un empilement de tôles. Les extrémités des barres sont réunies par deux couronnes conductrices. Le rotor en cage d'écureuil présente une résistance très faible : on dit qu'il est court-circuité.

Rotor bobiné : Le rotor comporte des encoches dans lesquelles sont logés des conducteurs formant un enroulement triphasé. Les enroulements sont généralement accessibles par l'intermédiaire de 3 bagues et de 3 balais, permettant ainsi de modifier les caractéristiques de la machine.

I.8 Les types des pompes :

Les pompes véhiculant des liquides se divisent en deux catégories principales : les pompes volumétriques et centrifuges. En fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée, nous pouvons aussi distinguer deux autres types de pompes : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement. La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 10 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours

installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau. Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé

avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface et la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur [10].

I.8.1 La pompe volumétrique :

Les pompes volumétriques fonctionnent en deux temps : remplissage puis vidange d'un volume de liquide, d'où leur appellation. Elles permettent des pressions importantes pour des débits relativement faibles et nécessitent un moteur qui a un couple de démarrage important. Une pompe volumétrique permet en général d'aspirer l'air contenu dans la tuyauterie, on dit alors qu'elle est auto-amorçante [21]. La multitude des différents modes de fonctionnement les classe en deux catégories : les pompes alternatives et les pompes rotatives. La plus connue des pompes alternatives est la pompe à piston (fig.1.13). Elle comporte une soupape d'admission et une soupape d'échappement, le pompage se fait en deux temps : aspiration puis refoulement, et le débit n'est pas régulier. Dans les pompes rotatives, le débit est régulier (pompes à engrenages, à lobes, à palettes). Cette deuxième catégorie de pompes a aussi l'avantage de ne comporter, en général, ni soupape ni clapet.

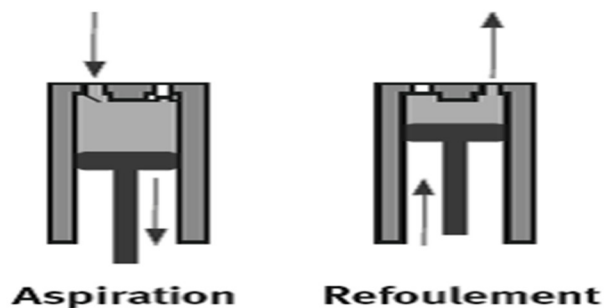


Figure I.11 Pompes à piston

I.8.2 La pompe centrifuge :

Les pompes centrifuges ont beaucoup d'avantages par rapport aux précédentes. Leur construction est également plus simple : deux parties principales, pas de clapet. Dans ces pompes, l'énergie mécanique est tout d'abord transformée en énergie cinétique, le liquide est mis en vitesse dans un impulseur (roue et aube) L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie potentielle (de pression) par ralentissement de la vitesse du liquide dans une volute. La pression que peut donner une pompe centrifuge est liée à la vitesse de rotation de son axe et au diamètre de son impulseur [22].

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont très différentes des précédentes :

Le couple de démarrage est faible, principalement lié à l'inertie des éléments mobiles, La pompe offre, pour une vitesse donnée, différentes possibilités de débit et de pression. Une pompe centrifuge est mal adaptée pour de faibles débits et de grandes hauteurs contrairement à sa cousine volumétrique. Signalons enfin que la pompe centrifuge ne peut pas aspirer l'air et donc elle n'est pas auto-amorçant.

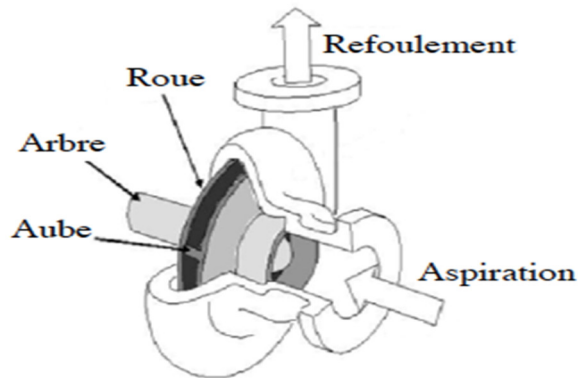


Figure I.12 Pompe centrifuge

I.8.3 Choix d'une pompe :

Les pompes volumétriques à main peuvent s'avérer plus intéressantes pour de petites hauteurs et de faibles débits journaliers ($H \times Q < 25 \text{ m}^4$). L'utilisation de pompes mécaniques sur cette plage d'utilisation se limitera principalement aux pompes volumétriques de faible puissance [10]. Il est conseillé d'utiliser des pompes à aspiration pour les hauteurs de moins de 7 mètres ce qui correspond généralement au type centrifuge à ailettes. Pour de faibles débits et une puissance disponible variable (par exemple, couplage éolien), l'emploi d'une pompe volumétrique permet un débit plus constant.

Pour une hauteur moyenne, comprise entre 10 et 50 mètres, la pompe immergée centrifuge est généralement la plus efficace. Mais son rendement est très étroitement lié à la hauteur et son dimensionnement est critique. Pour les hauteurs supérieures à 35 mètres et de faibles débits journaliers ($< 20 \text{ m}^3$), la pompe volumétrique sera la plus utilisée. Pour des débits plus élevés, l'emploi d'une pompe centrifuge est souvent le seul choix possible (Fig.1.15).

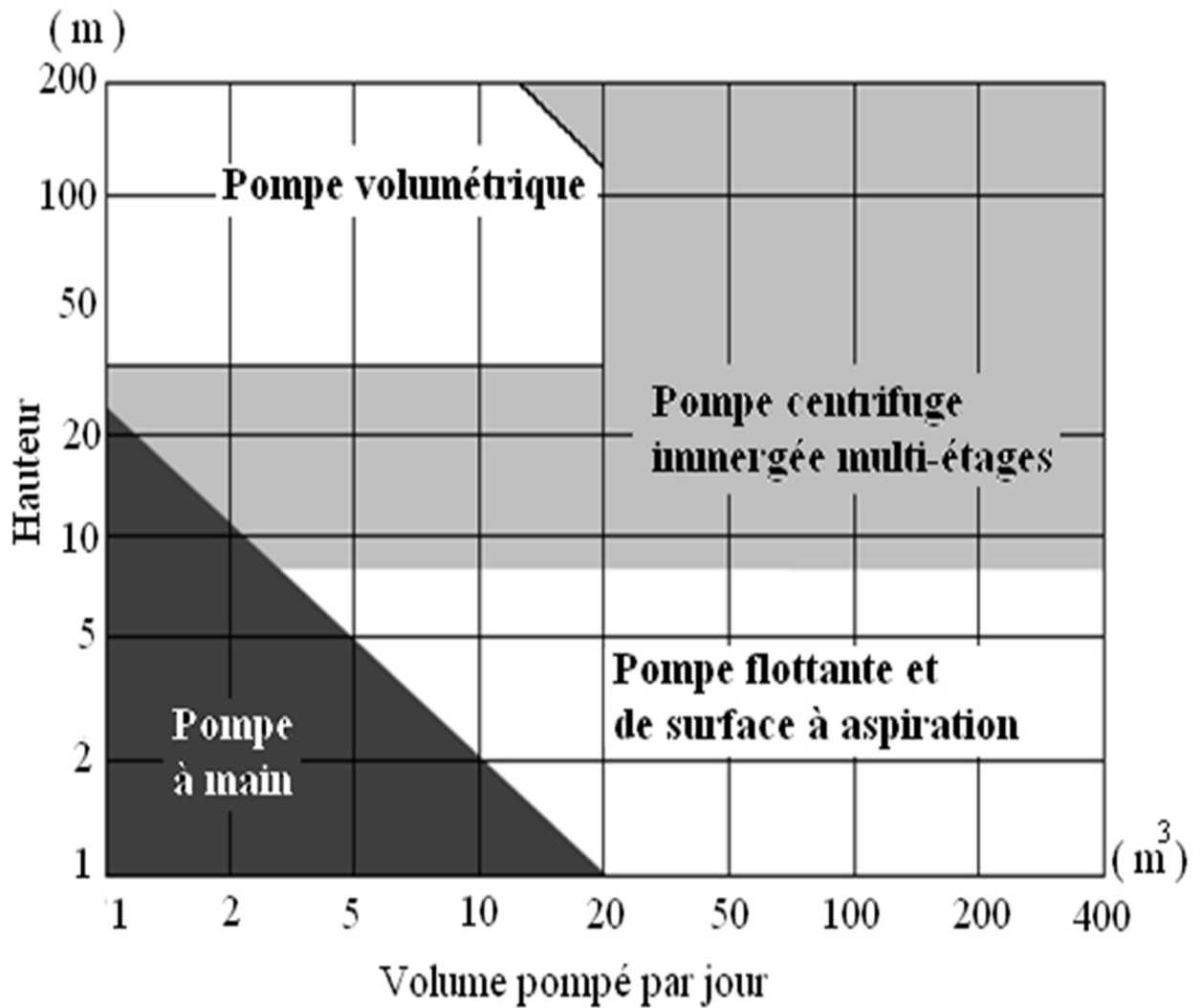


Figure I.13 Choix d'une pompe selon la hauteur et le débit demandés

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes notions qui composent une constitution d'un système de pompage photovoltaïque.

On a expliqué aussi le fonctionnement de chaque élément, Cela permet d'introduire la modélisation et l'analyse de ce système, que nous allons présenter dans chapitre deux.

II. Chapitre 02 : Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation des différents éléments constituant un système de pompage photovoltaïque tel que : générateur photovoltaïque, hacheur, onduleur et un groupe motopompe.

II.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque :

II.2.1 Modélisation et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :

- **Modèle à une diode :**[23]

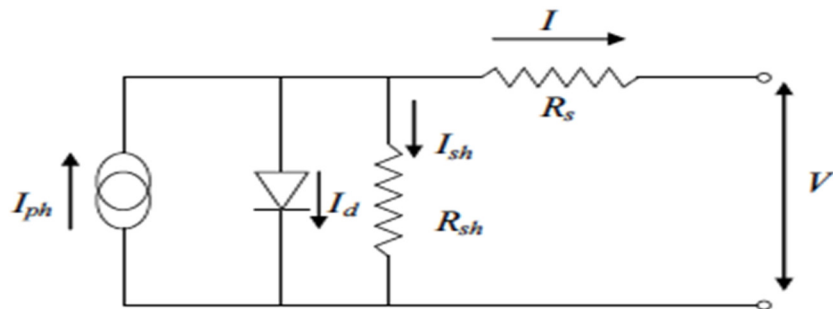


Figure I. 1 Circuit équivalent d'une seule cellule PV

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{A k T} \right\} - 1 \right]$$

I : Courant fourni par la cellule [A]

V : Tension à la borne de la cellule [V]

I_{ph} : Photo courant [A], proportionnel à l'irradiance F, avec correction selon T

I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

R_s : Résistance série [Ω].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω].

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser Rs de telle sorte que Rsh soit très important.

Le photocourant I_{ph} varie avec l'irradiance, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence:

$$I_{ph} = \frac{\Phi}{\Phi_{ref}} \cdot [I_{phref} + \mu_{Ics} \cdot (T - T_{ref})] \quad (2.2)$$

Où

F et F_{ref} : Irradiance effective et de référence [W/m²].

T et T_{ref} : Température effective et de référence [K].

μ_{Ics} : coefficient de température du photocourant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible.

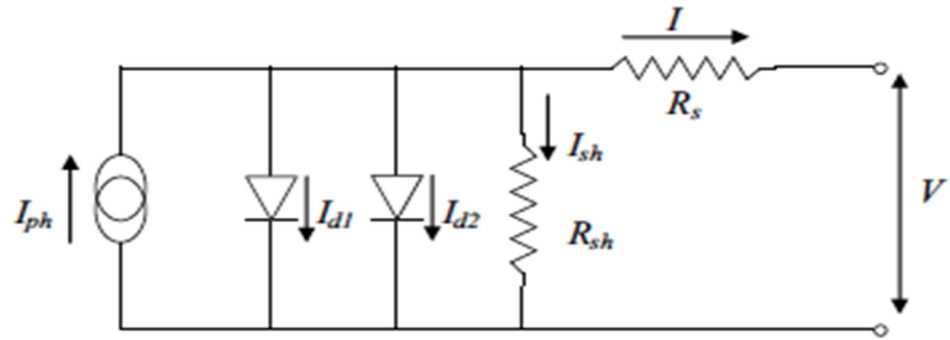
Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon L'expression :

$$I_s = I_{sref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}}\right) - \left(\frac{1}{T}\right) \right] \quad (2.3)$$

Où :

E_g : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin E_g = 1,12 eV, Silicium amorphe E_g = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV).

Les conditions de référence F et F_{ref} sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (V_{co}, I_{co}, V_{max}, I_{max}), se sont soit les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard Test Conditions, 1000 W/m², 25°C, spectre AM1,5), soit des valeurs issues d'une mesure du module.



- **Modèle a deux diodes** :[24].

Figure II. 2 schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes

Le courant fournit par la cellule est donné par la relation (2.4)

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{A k T} \right\} - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{2 A k T} \right\} - 1 \right] \quad (2.4)$$

II.3 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour conditions atmosphériques standards :

Ce que on peut voir cette partie après avoir simuler le module PV dans le Matlab-Simulink on obtient c'est résultats

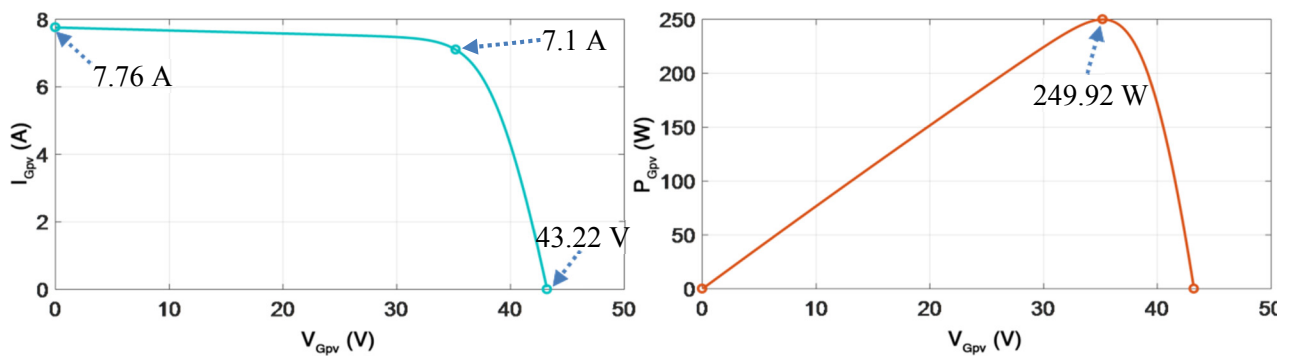


Figure II. 3 Caractéristiques du module PV pour conditions atmosphériques standards (a) caractéristique I_{Gpv} - V_{Gpv} (b) caractéristique P_{Gpv} V_{Gpv}

La figure 2.3 montre les principales caractéristiques I_{Gpv} - V_{Gpv} et P_{Gpv} - V_{Gpv} des modules PV dans des conditions atmosphériques standard. Ces propriétés décrivent le comportement des modules PV.

La courbe I_{Gpv} - V_{Gpv} d'un module PV, la figure 2.3(-a) passe par trois points importants :

- Courant de court-circuit $I_{cc} = 7,76$ A
- Tension à circuit ouvert $V_{oc} = 43,22$
- Le point de fonctionnement optimal $V_{mpp} = 35,2$ V et $I_{mpp} = 7.1$ A qui correspond à la puissance maximale délivrée par le module PV $P_{mpp} = 249.92$ W (à partir de la courbe P_{Gpv} - V_{Gpv} de la figure 2.3-(b)).

II.4 Influence des conditions atmosphériques sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension :

II.4.1 Influence de l'éclairement :

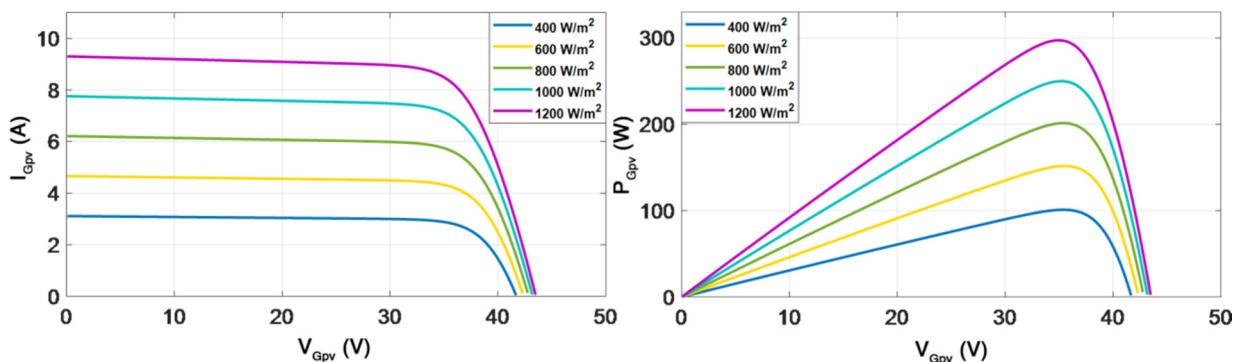


Figure II. 4 Caractéristiques I_{Gpv} - V_{Gpv} et P_{Gpv} - V_{Gpv} pour différents éclairements à 25 °C.

La (Figure 2.4) représentent les caractéristiques I_{Gpv} - V_{Gpv} et P_{Gpv} - V_{Gpv} de modules PV à température constante ($T=25^{\circ}C$) et éclairement variable (400 W/m^2 ; 600 W/m^2 ; 800 W/m^2 ; 1000 W/m^2 et $1200W/m^2$). On a observé que la valeur du courant de court-circuit était proportionnelle à l'intensité du rayonnement (flux lumineux). En revanche, la tension en circuit ouvert ne change pas dans la même proportion, mais reste quasiment constante même en faible éclairement. Cela signifie donc :

- La puissance optimale P_{ppm} est en fait proportionnelle à l'éclairement.
- La tension au point de puissance maximale est approximativement la même.

II.4.2 Influence de la température :

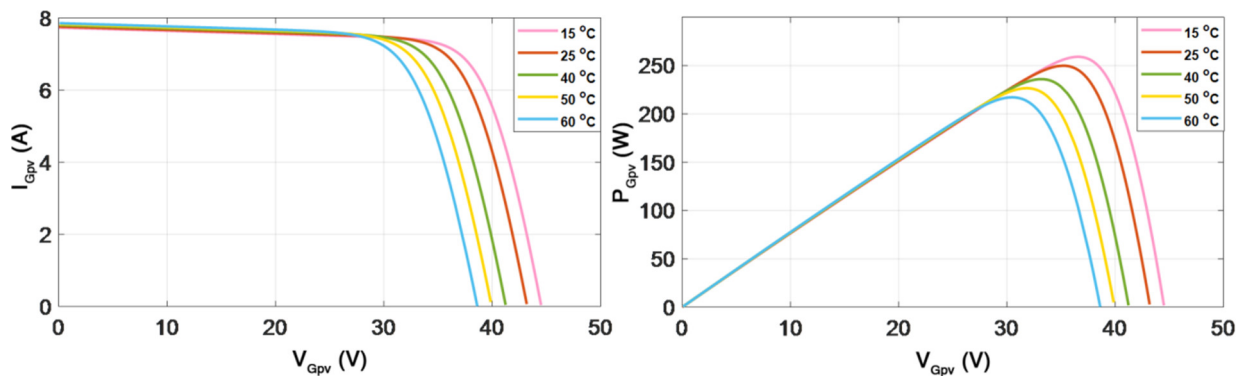


Figure II. 5 Caractéristiques I_{Gpv} - V_{Gpv} et P_{Gpv} - V_{Gpv} différentes températures à 1000 W/m^2 .

La figure 2.5 montre les courbes I_{Gpv} - V_{Gpv} et P_{Gpv} - V_{Gpv} à un éclairage constant de 1000 W/m^2 pour différentes températures de fonctionnement du module PV (15°C ; 25°C ; 40°C ; 50°C et 60°C). Il est évident que l'effet de la température sur la valeur du courant de court-circuit est négligeable. En revanche, lorsque la température augmente, la tension en circuit ouvert diminue assez fortement. Pour chaque augmentation de température de 25°C , la puissance maximale des modules PV diminue d'environ $0,85\%$.

II.5 Modélisation de Le hacheur (BOOST) :

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (2.6) , représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), le transistor (K) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (K) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (IL), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D).[24]

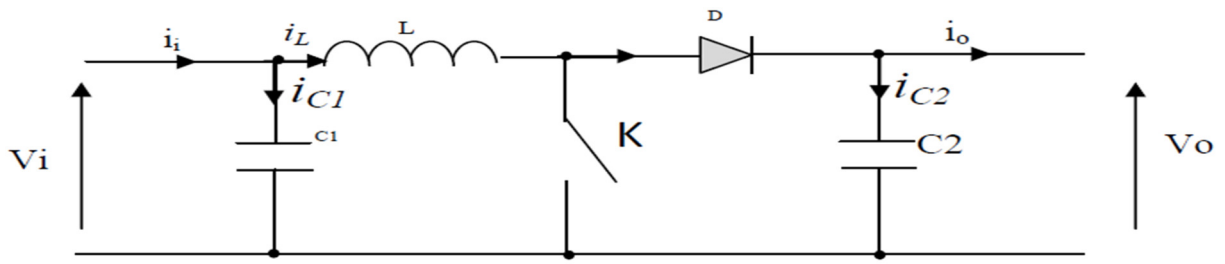


Figure II. 6 Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne :

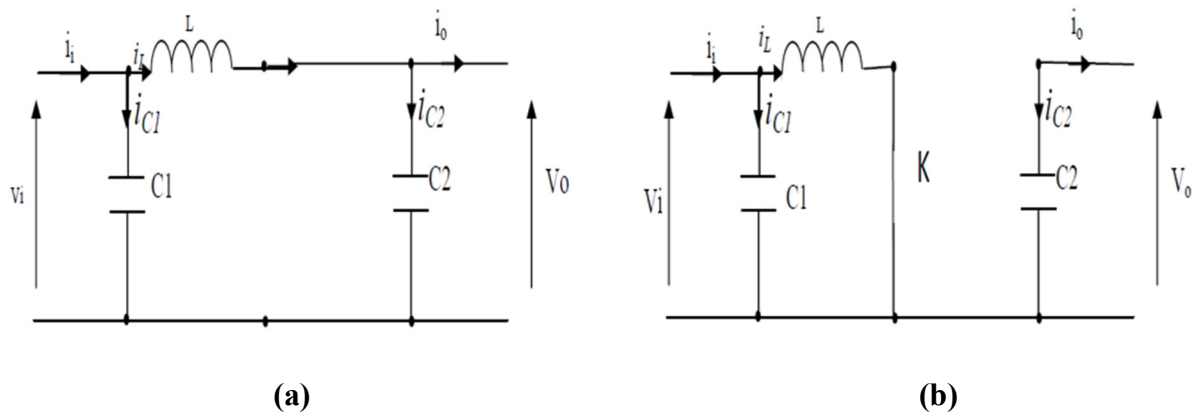


Figure II. 7 : Schémas équivalents de l'hacheur survolteur (a) : K fermé,(b) ouvert

Pour la première période dT_s :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (2.5)$$

Pour la deuxième période $(1-d) T_s$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

II.6 Modélisation de L'onduleur :

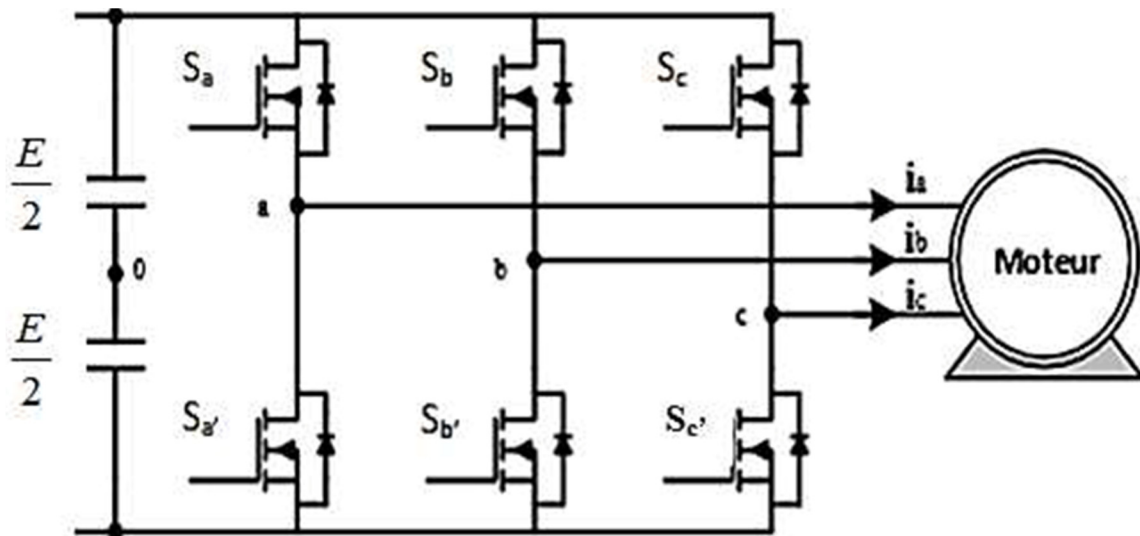


Figure II. 8 Suivante représente la modélisation de l'onduleur de tension triphasé

L'état des interrupteurs, supposés parfaites, peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_i avec $i = a, b, c$.

- Si le transistor supérieur est en conduction, les variables $S_i = 1$;
- Si le transistor inférieur est en conduction, les variables $S_i = 0$;

Les tensions simples appliquées aux trois phases statoriques sont obtenues à partir des relations suivantes en tenant compte du point fictif « o » [25] :

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} + V_{on} \\ V_{bn} = V_{bo} + V_{on} \\ V_{cn} = V_{co} + V_{on} \end{cases} \quad (2.7)$$

Par addition on a:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3V_{on} \quad (2.8)$$

Le système de la tension triphasée statorique est symétrique donc :

$$V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3V_{on} = 0 \quad (2.9)$$

D'où, on obtient :

$$V_{on} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.10)$$

En remplaçant l'équation (2.10) dans le système d'équation (2.7), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2.V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2.V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2.V_{co}) \end{cases} \quad (2.11)$$

Après arrangement les équations des deux systèmes on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Avec :

$$\begin{aligned} V_{ao} &= ES_a \\ V_{bo} &= ES_b \\ V_{co} &= ES_c \end{aligned} \quad (2.13)$$

Finalement :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

II.6.1 Stratégie de commande MLI sinusoïdale :

Pour déterminer les instants de fermeture et de d'ouverture des interrupteurs on fait appel à la technique de PWM (MLI : modulation de largeur d'impulsion). Le principe de la commande PWM sinusoïdale consiste à comparer trois tensions de référence appelée modulantes à un signal triangulaire de haute fréquence appelé porteuse (onde de modulation). Les signaux de références sont donnés par l'équation suivante :[32]

$$\begin{aligned}
 v_{\text{saref}}(t) &= r * \frac{v_{dc}}{2} \sin(\omega_r t) \\
 v_{\text{sbref}}(t) &= r * \frac{v_{dc}}{2} \sin\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \text{ avec } \omega_r = 2\pi f_r \\
 v_{\text{scref}}(t) &= r * \frac{v_{dc}}{2} \sin\left(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Notre schéma de simulation de la commande MLI sinusoidale est illustré par la figure (II.9)

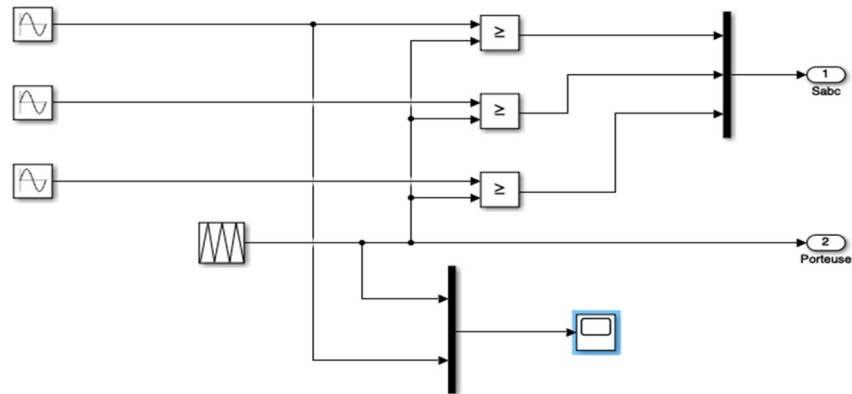
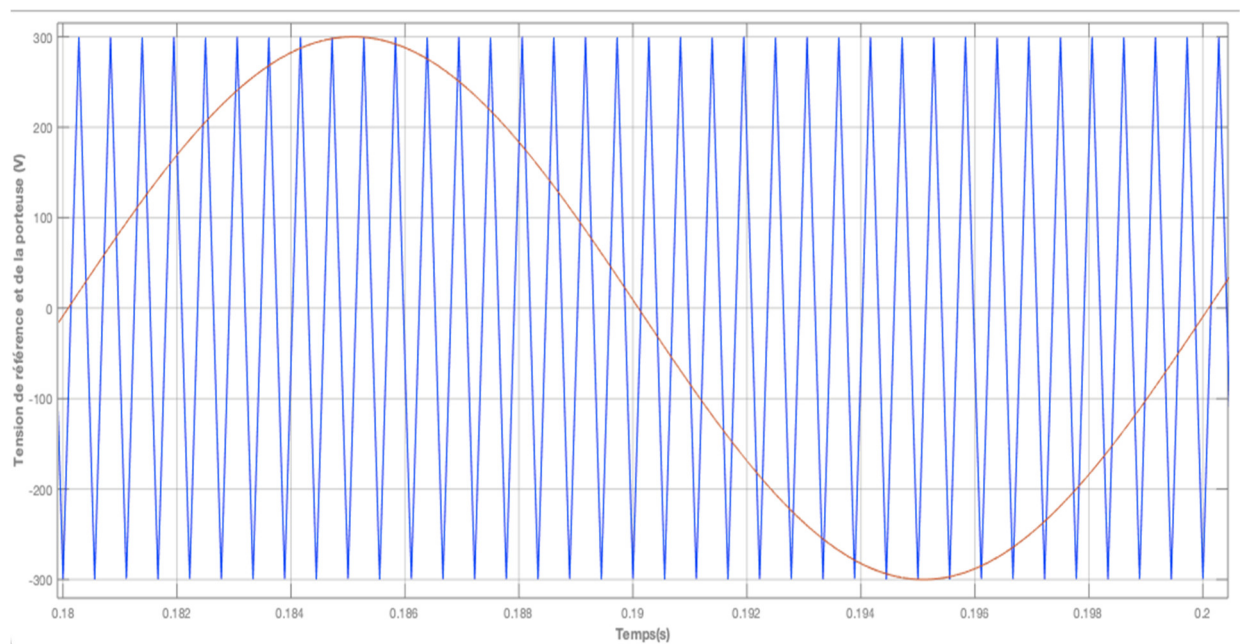
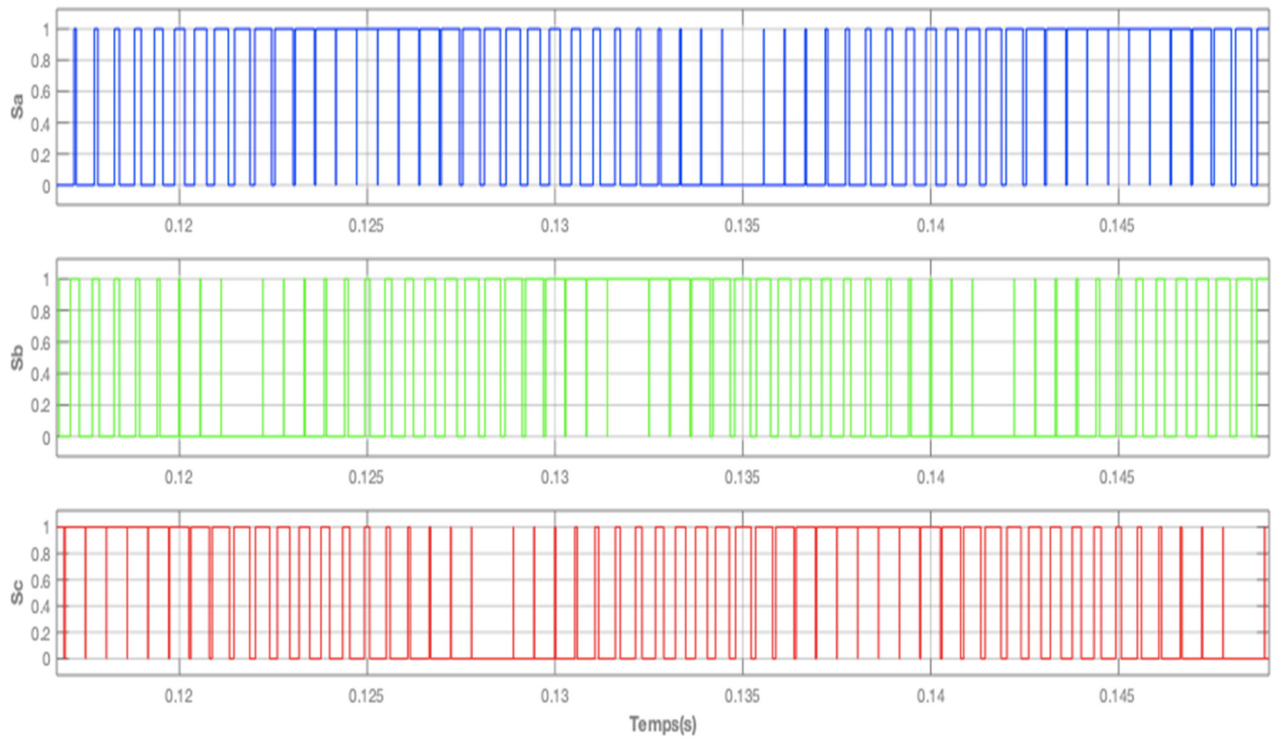


Figure II. 9 Schéma de simulation de la commande MLI sinusoidale



(a) Représentation de la porteuse et la modulante



(b) Résultats de simulation de signales de commande

Figure II. 10 (a) Représentation de la porteuse et la modulate, (b) Résultats de simulation de signales de commande

Deux paramètres caractérisent la commande à savoir :

L'indice de modulation "m" égale au rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence de la référence :

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (2.16)$$

Le coefficient de réglage en tension "r" égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse. :

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (2.17)$$

II.7 Modélisation de la MAS :

Comme tout système, l'étude des machines électriques, s'appuie sur un modèle de représentation. Ainsi, la modélisation est primordiale pour l'étude et la commande des machines électriques [26].

Il existe deux méthodes pour établir un modèle pour une machine à courant alternatif : [27].

- en utilisant un formalisme matriciel.
- en utilisant la notion de vecteur spatial complexe.

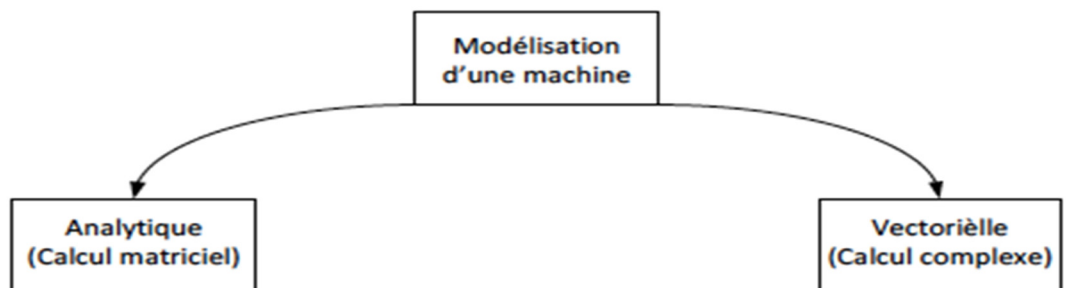


Figure II.11 Méthodes de modélisations d'une machine à courant alternatif

II.7.1 Description des bobinages statoriques et rotoriques :

La machine asynchrone est formée de :

Trois bobines statoriques fixes décalées de 120° ;

Trois bobines rotoriques mobiles décalées de 120° ;

Chaque enroulement est considéré en convention récepteur comme il est montré la figure ci-dessous. On admet aussi que les bobinages statoriques et rotoriques sont couplés en étoile avec neutre isolé.

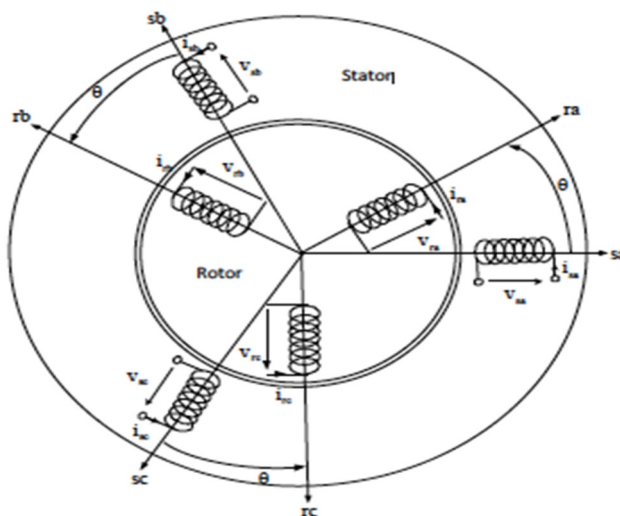


Figure II. 11 Représentation schématisée des enroulements de la MAS

II.7.2 Hypothèses simplificatrices :

La parfaite symétrie de la machine ;

Le circuit magnétique n'est pas saturé et les pertes fer sont négligeables ;

Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température ;

La densité du courant dans la section des conducteurs est uniforme ;

La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est parfaitement sinusoïdale ;

L'entrefer est constant et l'effet des encoches est négligeable.

Conséquences :

- L'additivité des flux générés par les différents courants ;
- Les inductances propres sont constantes ;
- Une variation sinusoïdale des inductances mutuelles.

II.7.3 Équations de la MAS dans le repère (abc) :

Le comportement de la MAS est entièrement défini par ses équations électriques, magnétiques et mécaniques.

Dans la figure ci-dessous, les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles-mêmes. Θ est l'angle électrique entre l'axe d'une phase du stator et l'axe de la phase correspondante du rotor.

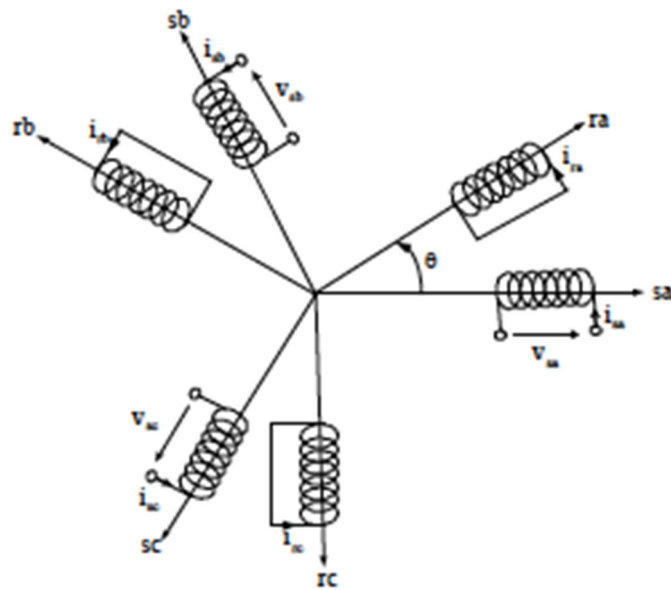


Figure II. 12 Disposition des enroulements triphasés

II.7.3.1 Les Équations électriques :

Les lois de Faraday et d'Ohm permettent d'écrire :

Coté Stator :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (2.17)$$

Où R_s est la résistance d'un enroulement statorique.

Coté Rotor:

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} = 0 \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} = 0 \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

Où R_r est la résistance d'un enroulement rotorique.

Les deux équations précédentes peuvent être mises sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{aligned} [v_{sabc}] &= R_s [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \\ [v_{rabc}] &= R_r [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] = [0] \end{aligned} \quad (2.19)$$

$[V_{sabc}]$ et $[V_{rabc}]$ sont les vecteurs regroupent les tensions du stator et du rotor respectivement

$[I_{sabc}]$ et $[I_{rabc}]$ sont les vecteurs regroupent les courants du stator et du rotor respectivement.

$[\phi_{sabc}]$ et $[\phi_{rabc}]$ sont les vecteurs regroupent les flux du stator et du rotor respectivement.

II.7.3.2 Les Équations Magnétiques :

Les expressions des flux en fonction des courants sont données :

Coté Stator :

$$\begin{aligned}\phi_{sa} &= l_s i_{sa} + m_s i_{sb} + m_s i_{sc} + m_{sr} \cos(\theta) i_{ra} + m_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{rb} + m_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{rc} \\ \phi_{sb} &= m_s i_{sa} + l_s i_{sb} + m_s i_{sc} + m_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{ra} + m_{sr} \cos(\theta) i_{rb} + m_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{rc} \\ \phi_{sc} &= m_s i_{sa} + m_s i_{sb} + l_s i_{sc} + m_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{ra} + m_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{rb} + m_{sr} \cos(\theta) i_{rc}\end{aligned}\quad (2.20)$$

Où l_s est l'inductance d'une phase statorique, m_s est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques, m_{sr} est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

Coté rotor :

$$\begin{aligned}\phi_{ra} &= l_r i_{ra} + m_r i_{rb} + m_r i_{rc} + m_{sr} \cos(\theta) i_{sa} + m_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{sb} + m_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{sc} \\ \phi_{rb} &= m_r i_{ra} + l_r i_{rb} + m_r i_{rc} + m_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{sa} + m_{sr} \cos(\theta) i_{sb} + m_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{sc} \\ \phi_{rc} &= m_r i_{ra} + m_r i_{rb} + l_r i_{rc} + m_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{sa} + m_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{sb} + m_{sr} \cos(\theta) i_{sc}\end{aligned}\quad (2.21)$$

Où l_r est l'inductance d'une phase rotorique, m_r est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

Posons :

$$\begin{aligned}m_1 &= m_{sr} \cos(\theta) \\ m_2 &= m_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_3 &= m_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\quad (2.22)$$

Ou m_1, m_2, m_3 sont les mutuelles inductances entre les phases statoriques et rotoriques.

-Les expressions des flux deviennent donc :

$$\begin{aligned}\phi_{sa} &= l_s i_{sa} + m_s i_{sb} + m_s i_{sc} + m_1 i_{ra} + m_3 i_{rb} + m_2 i_{rc} \\ \phi_{sb} &= m_s i_{sa} + l_s i_{sb} + m_s i_{sc} + m_2 i_{ra} + m_1 i_{rb} + m_3 i_{rc} \\ \phi_{sc} &= m_s i_{sa} + m_s i_{sb} + l_s i_{sc} + m_3 i_{ra} + m_2 i_{rb} + m_1 i_{rc} \\ \phi_{ra} &= l_r i_{ra} + m_r i_{rb} + m_r i_{rc} + m_1 i_{sa} + m_2 i_{sb} + m_3 i_{sc} \\ \phi_{rb} &= m_r i_{ra} + l_r i_{rb} + m_r i_{rc} + m_3 i_{sa} + m_1 i_{sb} + m_2 i_{sc} \\ \phi_{rc} &= m_r i_{ra} + m_r i_{rb} + l_r i_{rc} + m_2 i_{sa} + m_3 i_{sb} + m_1 i_{sc}\end{aligned}\quad (2.23)$$

Sous formes Matricielle

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sc} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1 & m_3 & m_2 \\ m_2 & m_1 & m_3 \\ m_3 & m_2 & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_3 & m_1 & m_2 \\ m_2 & m_3 & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

Sous une forme plus compactée on obtient :

$$\begin{aligned} [\phi_{sabc}] &= [M_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)][i_{rabc}] \\ [\phi_{rabc}] &= [M_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)][i_{sabc}] \end{aligned} \quad (2.25)$$

Avec :

$$[M_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}, [M_{sr}] = \begin{bmatrix} m_1 & m_3 & m_2 \\ m_2 & m_1 & m_3 \\ m_3 & m_2 & m_1 \end{bmatrix} m_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$[M_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}, [M_{sr}(\theta)] = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_3 & m_1 & m_2 \\ m_2 & m_3 & m_1 \end{bmatrix} = [M_{Is}(\theta)]^t \quad (2.27)$$

II.7.3.3 Les Équations Mécaniques :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f\Omega - C_r \quad (2.28)$$

Avec :

C_{em} : couple électromagnétique

C_r : couple résistant qui peut être fonction de la vitesse

J : moment d'inertie des masses tournantes

f : coefficient de frottements visqueux

p : nombre de paires de pôles

$\Omega = \frac{\dot{\theta}}{p}$: Vitesse de rotation de la machine

II.8 Transformation de Park :

La transformation du moteur triphasé en un moteur biphasé consiste à remplacer tout enroulement triphasé $[(\vec{S}_a, \vec{S}_b, \vec{S}_c)$ ou $(\vec{R}_a, \vec{R}_b, \vec{R}_c)$] par deux enroulements, l'un sur l'axe direct (d) et l'autre sur l'axe en quadrature (q). La transformation qui traduit ce passage du système triphasé (a,b,c) au système biphasé (d,q) est dite de Park .

Les matrices de passage directe $[P(\theta)]$ et inverse $[P(\theta)]^{-1}$ sont données par :

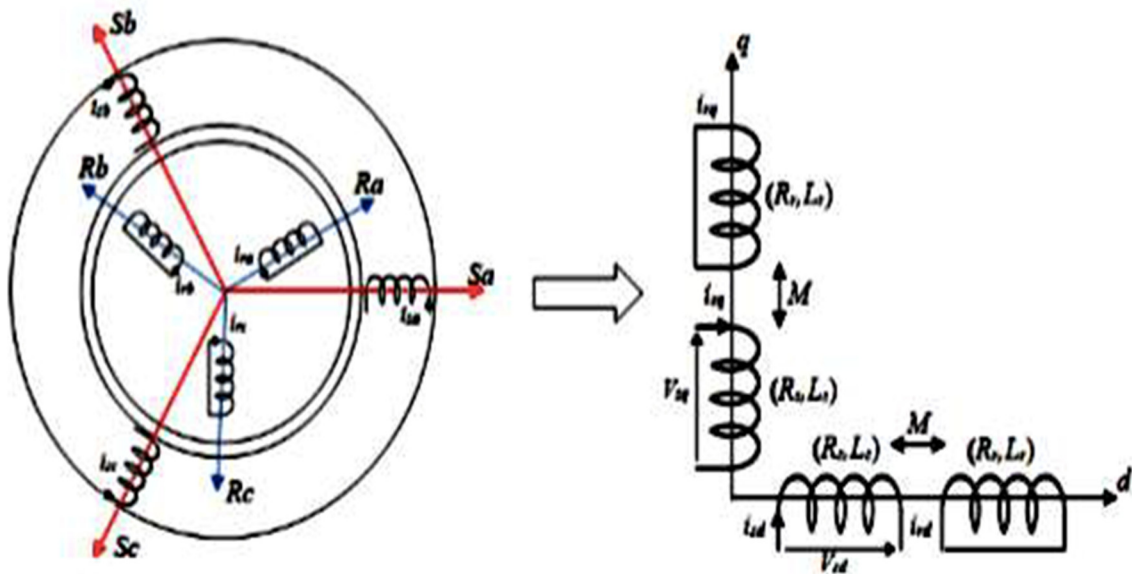


Figure II. 13 Principe de la transformée de PARK MAS (Triphasé vers le Diphasé).

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, [P(\theta)]^{-1}[P(\theta)]^t \quad (2.29)$$

$$\text{Et on a : } [X_d: X_q: X_0]^t = [P(\theta)][X_a: X_b: X_c]^t, [X_a: X_b: X_c]^t = [P(\theta)]^{-1}[X_d: X_q: X_0]^t$$

Le vecteur X peut être le vecteur de tension, de courant, ou de flux. Pour les grandeurs statorique $\theta = \theta_s$ et $\theta = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques

$$\theta_s = \theta + \theta_r$$

θ_s : Angle électrique entre \vec{S}_a, \vec{d} .

θ_r : angle électrique entre \vec{R}_a, \vec{d} .

$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$: vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au stator.

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au rotor.

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$: vitesse angulaire de l'axe \vec{R}_a , par rapport à l'axe \vec{S}_a

A partir de ce qui précède on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad \begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.30)$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases}, \quad \begin{cases} \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (2.31)$$

$L_s = \mathbf{l}_s - \mathbf{M}_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = \mathbf{l}_r - \mathbf{M}_r$: Inductance cyclique rotorique.

$\mathbf{M} = \frac{3}{2} \mathbf{M}_{rs}$: Inductance mutuelle cyclique entre le rotor et le stator.

En plus le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = \frac{3}{2} P \times (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (2.32)$$

P : nombre de pair de pole.

II.9 Choix référentiel :

La position du système d'axes (d,q) peut être fixée suivant les objectifs de l'application : [28]

- Référentiel immobile par rapport au stator (Référentiel lié au stator)
($\omega_s = 0$) : étude des grandeurs statoriques (système d'axes $(\alpha\beta)$).
- Référentiel immobile par rapport au rotor (Référentiel lié au rotor)
($\omega_s = \omega$) : étude des grandeurs rotoriques (système d'axes $(x ; y)$).
- Référentiel lié au champs tournant ($\omega_s - \omega = \omega_r$) étude de la commande (système d'axes d,q)

II.10 Modélisations de la pompe centrifuge :

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur.

$$C_r = K_{ch} \times \omega^2 \quad (2.33)$$

Avec K_{ch} : désigne la constante de proportionnalité et m : la vitesse de rotation du moteur.

Connaissant les performances d'une pompe centrifuge (Q, H et P) pour la vitesse N, les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q', H' et P') pour une vitesse N'en utilisant les relations suivantes :

$$Q' = Q \frac{N'}{N}, H' = H \left(\frac{N'}{N}\right)^2, P' = P \left(\frac{N'}{N}\right)^3 \quad (2.34)$$

Avec Q et Q' , les débits correspondants respectivement à la vitesse N et N' ; H et H' les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse N et N' ; et P et P' sont les puissances du moteur correspondant respectivement à la vitesse N et N' .

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation [29]

$$f(H, Q, \omega) = 0. \quad (2.35)$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des 3 paramètres constant, en générale c'est la vitesse qui est constante La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d \quad (2.36)$$

H : Hauteur totale du pompage. H_s : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puit jusqu'au le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau. H_d : est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :

II.10.1 Pertes de charges linéaires :

Ce sont des pertes d'eau dans la tuyauterie est donnée par la formule suivante :

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.37)$$

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s^2) qui est donnée par :

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi D^2} \quad (2.38)$$

Q: debit (m^3/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (2.39)$$

On remarque que les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de canalisation, ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation.

II.10.2 Pertes de charges singulières (locale) :

Sont dues essentiellement aux divers changements de section est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{8(Q^2)}{(\pi^2)(D^4)G} \quad (2.40)$$

ε : Coefficient de pertes de charges locales La hauteur dynamique est la somme des deux pertes

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2$$
$$H_d = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8(Q^2)}{(\pi^2)(D^4)G} \right) = K_{fr} \times (Q^2) \quad (2.41)$$

K_{fr} : Constante de la canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_s + K_{fr} \times (Q^2) \quad (2.42)$$

II.10.3 Calcul de puissance :

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_H = \rho g Q H (\omega) \quad (2.43)$$

L'autre expression à considérer est celle de la puissance absorbée par une pompe, c'est à dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique, qui est exprimé par la relation suivante :

$$P_m = \frac{9.81 * \rho Q H}{\eta_p} (\omega) \quad (2.44)$$

Où :

η_p : Le rendement de la pompe.

P_m : Puissance mécanique du moteur.

ρ : La masse volumique de l'eau (1000 Kg au m³).

II.10.4 Calcul du rendement :

- Pour les groupes électropompes (pompe et moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement globale.

$$\eta_{mp} = \frac{P_H}{P_a} \quad (2.45)$$

II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, On a Présenté la modélisation des différents composants d'un système de pompage photovoltaïque afin de faciliter l'accès aux simulations du système dans le prochain chapitre.

III. Chapitre 03 : Stratégie de commande d'un système de pompage photovoltaïque

III.1 Introduction :

L'objectif de la commande d'un système pompage photovoltaïque est de pouvoir fournir l'énergie requise par la charge, bien que le caractère aléatoire des sources renouvelables puisse entraîner de grandes variations dans l'énergie produite.

Dans ce chapitre nous allons voir les résultats de notre travail que nous avons simulé avec Matlab/Simulink nous avons vu dans le chapitre précédent toutes les modélisations des éléments d'un système pompage photovoltaïque nous allons voir ces résultats sachons que le système de pompage PV à base de MAS nécessite deux étages, le premier étage se compose d'un convertisseur DC/DC (BOOST) équipé d'une commande MPPT programmé avec l'algorithme "Perturbe and Observe" (P&O) comme on a évoqué dans l'introduction générale, le deuxième étage se compose d'un onduleur de tension triphasé à MLI permettant de transférer la puissance maximale fournie par le générateur PV pour faire fonctionner le groupe motopompe.

Les systèmes de pompage photovoltaïques se caractérisent par un fonctionnement à vitesse variable c'est pourquoi la commande du moteur asynchrone est assurée par la technique de commande DTC qui permet de contrôler directement le couple et le flux statorique.

III.2 Technique de la commande MPPT :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [31]

III.2.1 Méthodes de la commande MPPT :

La méthode utilisée pour contrôler le point de puissance maximale est la méthode de perturbation et d'observation (P&O). Cette dernière est une approche largement répandue pour la détermination du point PPM. Ce dernier utilise comme entrée les valeurs de la tension V du panneau et le courant I du panneau, et comme sortie soit la valeur de la tension de référence V_{ref} soit le rapport cyclique. Comme son nom indique la méthode de P&O, fonctionne par la perturbation du système soit par l'augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement et d'observer son impact sur la puissance de sortie du panneau [32].

III.2.2 Principes de fonctionnement de l'algorithme P&O :[32]

Cet algorithme est conçu de sorte qu'il fonctionne sur un ordinateur et donc à chaque cycle de l'algorithme, V et I sont mesurés pour calculer $P(k)$. Cette valeur $P(k)$ est comparée avec celle de $P(k-1)$. Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle. Si la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure, la tension V du GPV est perturbée dans la direction opposée à celle de l'itération précédente

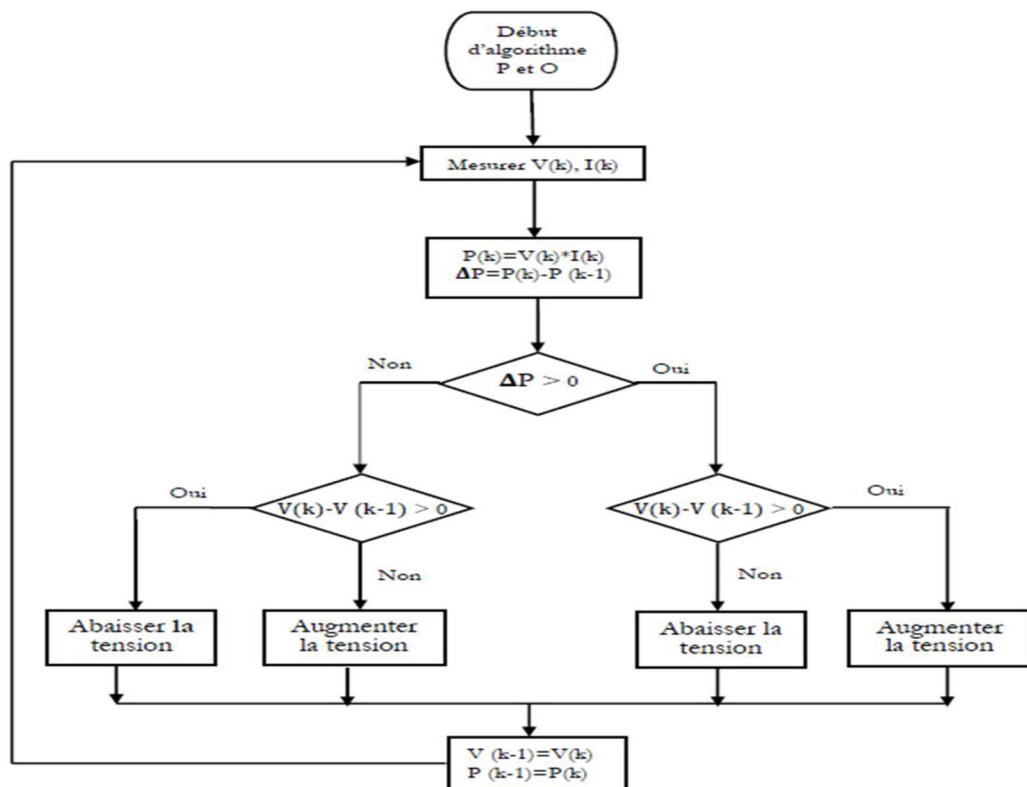


Figure III.1 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)

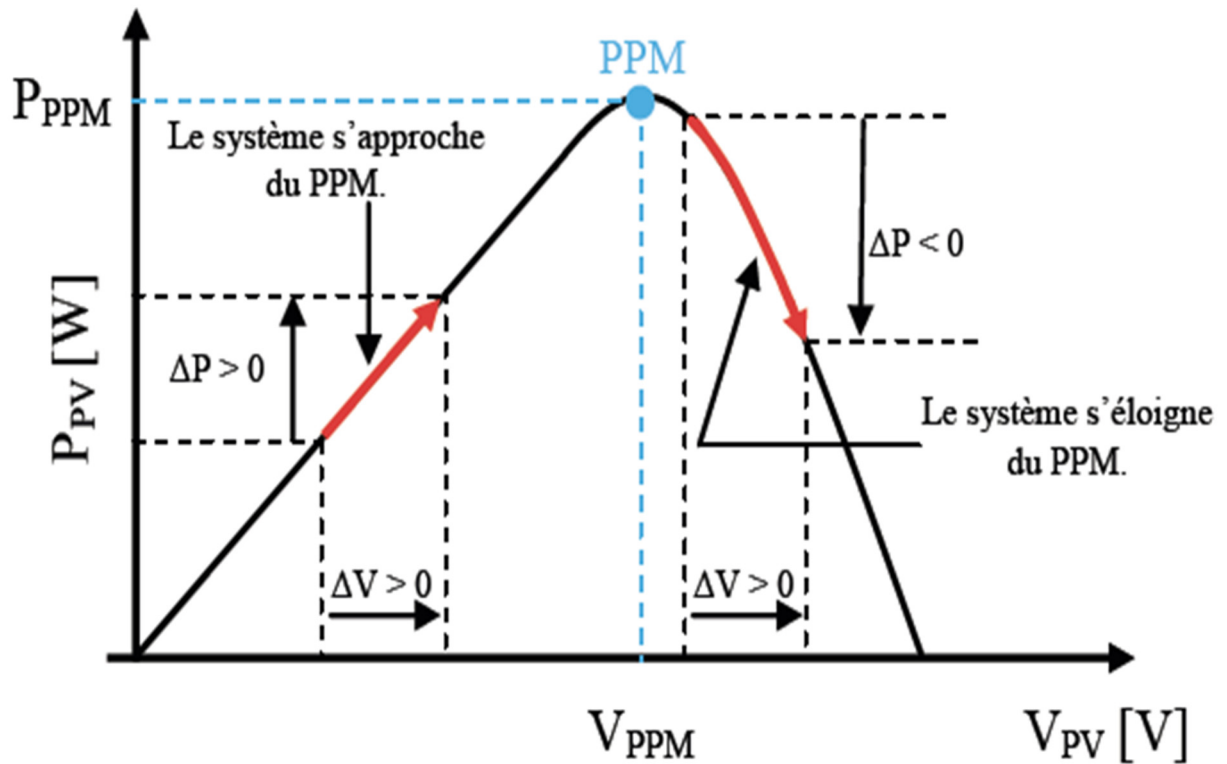


Figure III.2 Caractéristique puissance–tension d’un panneau photovoltaïque.

Remarque:

Nous avons essayé d’intégrer cette technique avec nos algorithmes, mais la tension de sortie de l’hacheur booste se diverge, pour éviter cette divergence et avoir une tension constante, on a utilisé un régulateur de tension de sortie de l’hacheur boost en imposant une tension de sortie de référence

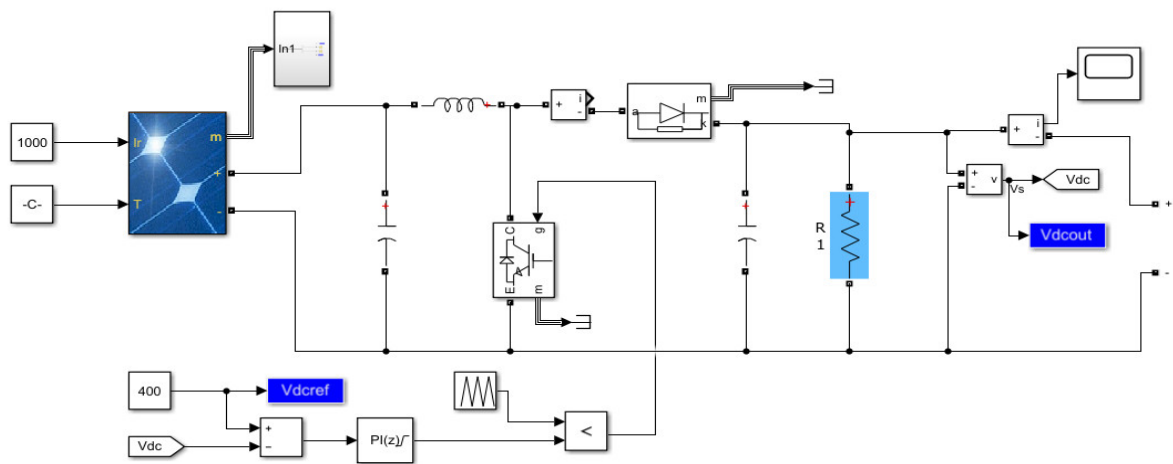


Figure III.3 Convertisseur Boost DC/DC avec régulateur PID

III.3 Commande DTC de la machine asynchrone :

Les structures de contrôle direct du couple (en anglais DTC : direct torque control) des machines asynchrones sont apparues dans la deuxième moitié des années 1980, par les chercheurs japonais et allemands M. TAKAHACHI et I. DEPENBORK comme concurrentielle des méthodes classiques.

Nous présentons les principes du contrôle direct du couple, nous analyserons en particulier, le couplage et la dynamique du contrôle entre le flux statorique et le couple électromagnétique. Puis, nous développons, l'estimation des deux grandeurs de contrôle qui sont le flux et le couple. Ensuite, nous élaborons le modèle des contrôleurs à hystérésis impliqués dans la structure générale de la commande.[33]

III.3.1 Concept du « FOC » contre le concept du « DTC » :[27]

La structure générale de la commande à flux orienté de la machine asynchrone est schématisée sur la figure ci-dessous.

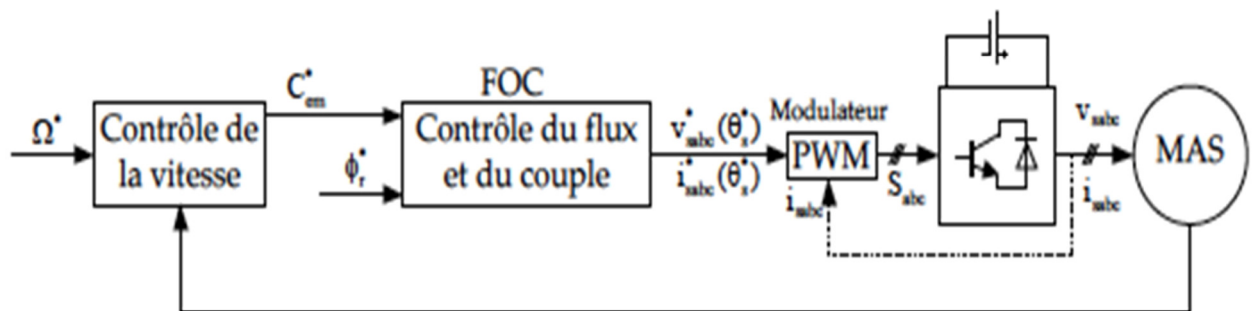


Figure III.4 La commande à flux orienté de la machine asynchrone

La commande à flux orienté permet le contrôle indirect du flux et du couple par action sur la tension (courant) et la fréquence moyennant un modulateur PWM qui approxime la tension (courant) de référence nécessaire pour imposer le flux et le couple désirés.

La structure générale de la commande directe du couple de la machine asynchrone est schématisée sur la figure ci-dessous.

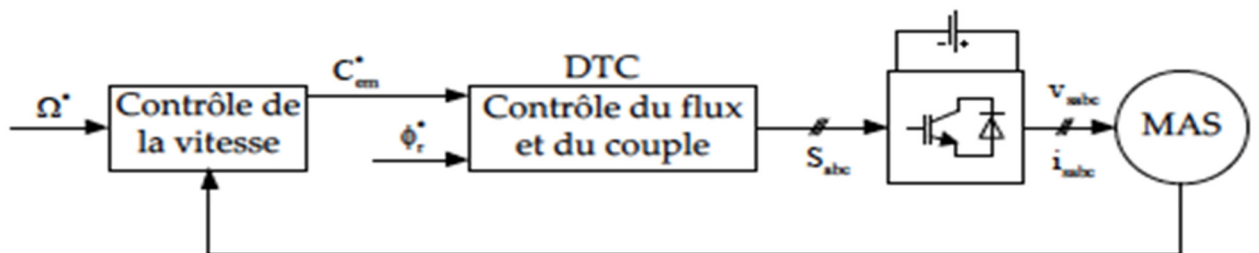


Figure III.5 La commande directe du couple de la machine asynchrone

La commande directe du couple permet le contrôle direct du flux et du couple par action sur la commande des interrupteurs de l'onduleur.

Le tableau (III. 1) illustre une comparaison qualitative entre les deux méthodes de commande.

| | FOC | DTC |
|--|-------------|----------------------|
| Commande scalaire ou vectorielle | Vectorielle | Vectorielle |
| Contrôle direct ou indirect du flux et du couple | Indirect | Direct |
| Modulateur PWM nécessaire ou non | Nécessaire | N'est pas nécessaire |

Tableau III-1 Comparaison qualitative entre les deux méthodes de commande.

III.4 Principes généraux de la commande DTC d'un MAS

Le contrôle direct du couple d'une machine asynchrone repose sur la détermination de la séquence de commande à appliquer aux interrupteurs de l'onduleur pour délivrer le vecteur tension statorique. Ces vecteurs sont choisis à partir d'une table de sélection qui remplace le générateur de MLI des structures classiques de contrôle des onduleurs de tension. Dans cette technique, on utilise des comparateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état des variables de contrôle du système, à savoir l'amplitude du flux statorique et du couple électromagnétique.[33]

Le schéma bloc de la figure III.6, représente le synoptique d'une commande DTC en vitesse appliquée à la machine asynchrone.

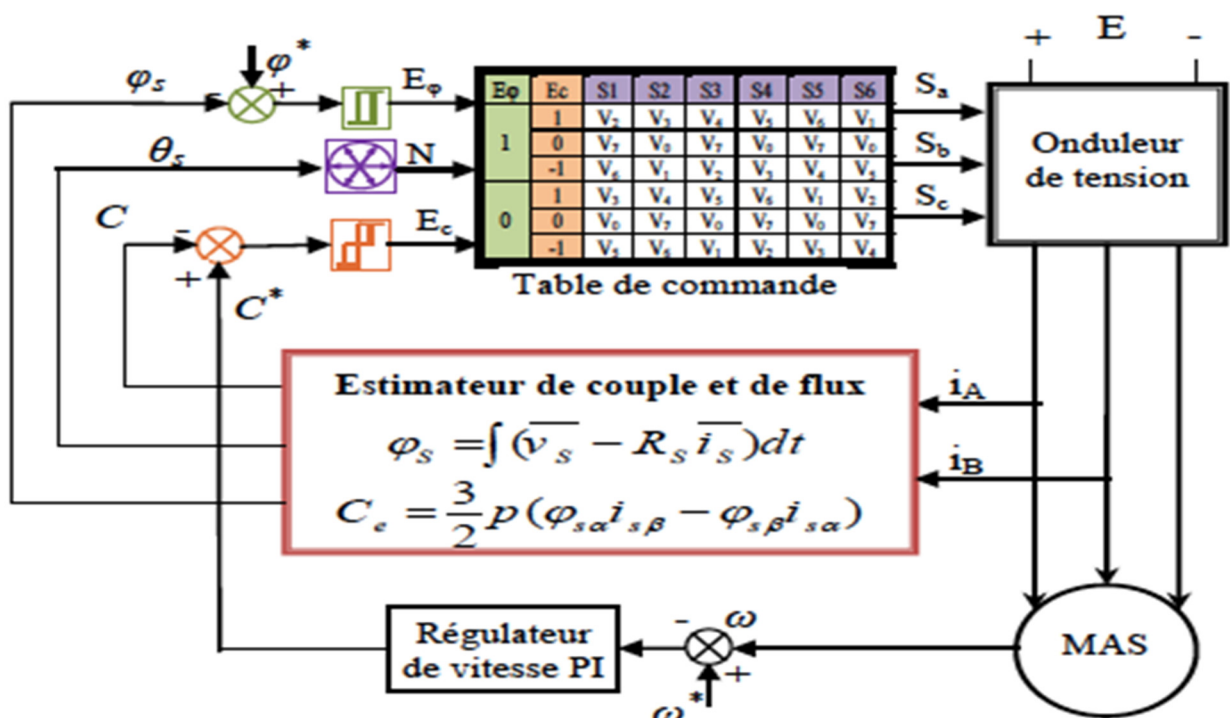


Figure III.6 Schéma structurel de la commande DTC.

III.4.1 Contrôle du vecteur flux statorique :

L'équation de la tension d'une phase statorique est donnée par :

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} \quad (3.1)$$

Ce qui permet de déduire l'expression de flux statorique par une simple intégration :

$$\bar{\varphi}_s = \int (\bar{V}_s - R_s \bar{i}_s) dt \quad (3.2)$$

En négligeant la chute ohmique, et après une période de commutation (le vecteur tension délivrée par l'onduleur est constant par période de commutation), l'expression de flux devient :

$$\bar{\varphi}_s = \bar{\varphi}_s(0) + \int \bar{V}_s dt. \quad (3.3)$$

La valeur de la tension reste constante pendant une période d'échantillonnage T_e , ce qui permet d'écrire :

$$\bar{\varphi}_s(k+1) = \bar{\varphi}_s(k) + \bar{V}_s T_e \quad (3.4)$$

$\bar{\varphi}_s(k)$: Est le vecteur de flux statorique au pas d'échantillonnage actuel.

$\bar{\varphi}_s(k+1)$: est le vecteur du flux statorique au pas d'échantillonnage suivant.

La variation du vecteur flux statorique est alors :

$$\Delta \bar{\varphi}_s = \bar{V}_s T_e \quad (3.5)$$

L'équation (3.5) montre que pour une période d'échantillonnage T_e constante l'erreur du flux statorique $\Delta \bar{\varphi}_s$ est proportionnelle au vecteur de tension \bar{V}_s . En plus, l'application d'un vecteur de tension constant engendre un déplacement de l'extrémité du vecteur flux statorique dans le temps sur la droite dont la direction est donnée par le vecteur \bar{V}_s sélectionné pendant l'intervalle $[0, T_e]$ [34]. Un exemple du déplacement de l'extrémité du vecteur $\bar{\varphi}_s$ dans le cas où $V_s = V_3$ est montré dans la Figure (III.7)

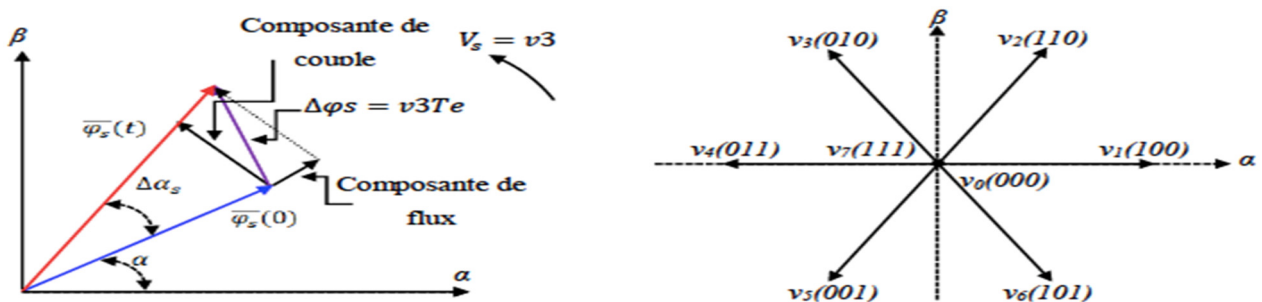


Figure III.7 Évolution du vecteur Φ_s dans le repère (α, β)

III.4.2 Contrôle du vecteur flux électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{PM}{\sigma L_s L_r} \varphi_s \varphi_r \sin \gamma \quad (3.6)$$

Où :

γ : Est l'angle entre les vecteurs flux statorique et rotorique.

L_s : Est l'inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Est l'inductance propre d'une phase rotorique.

σ : Est le coefficient de dispersion de Blondel.

M : Est la mutuelle inductance quand les axes des deux enroulements considérés coïncident.

En supposant que le flux statorique suit sa valeur de référence φ_s^* , vu qu'il est maintenu dans la bande d'hystérésis, l'expression du couple devient alors :

$$C_{em} = \frac{PM}{\sigma L_s L_r} \varphi_s^* \varphi_r \sin \gamma \quad (3.7)$$

A l'instant $t + \Delta t$, cette expression sera alors :

$$C_{em} = \frac{PM}{\sigma L_s L_r} \varphi_s^* \varphi_r \sin(\gamma + \Delta\gamma) \quad (3.8)$$

Un comparateur à hystérésis à trois niveaux, est utilisé pour contrôler le moteur dans les deux sens de rotation. L'écart ΔC_e entre le couple estimé et le couple de référence est introduit dans le comparateur qui va donner à sa sortie la valeur 1 pour augmenter le couple, -1 pour le réduire et 0 pour le maintenir constant [35].

III.5 Descriptions de la structure du DTC :[33]

III.5.1 Sélection du vecteur de tension :

Le choix de \bar{V}_s dépend de la variation souhaitée pour le module du flux statorique $\bar{\varphi}_s$ du sens de rotation de $\bar{\varphi}_s$, et par conséquent de l'évolution désirée pour le couple. Ainsi, nous pouvons délimiter l'espace d'évolution de $\bar{\varphi}_s$ dans le référentiel lié au stator en le décomposant en six zones i avec, $i = [1, \dots, 6]$ figure (III.7)

Lorsque le vecteur flux $\bar{\varphi}_s$ se trouve dans une zone numérotée « i », le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des quatre vecteurs de tension adéquat.

Il s'agit des vecteurs $\bar{V}_{i+1}, \bar{V}_{i-1}, \bar{V}_{i+2}, \bar{V}_{i-2}$, représentés sur la figure (III.8). Sur toute la Zone « i », parcourue par le vecteur flux statorique, le rôle du vecteur tension V sélectionné reste le même.

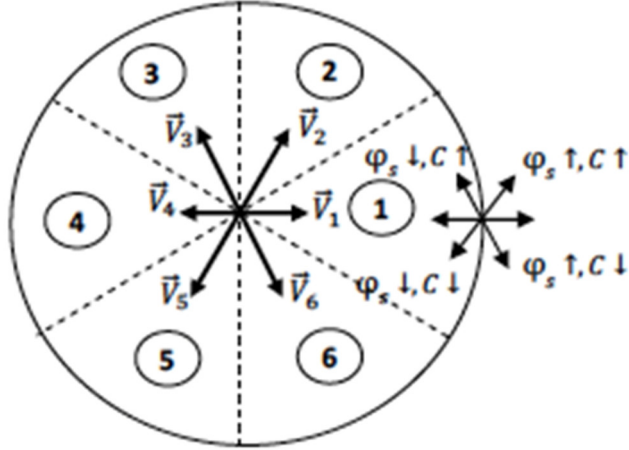


Figure III.8 Sélection du vecteur tension selon la zone N=1.

| | | |
|-------------------|---------|---|
| | | \bar{V}_s |
| $\bar{\varphi}_s$ | Croît | $\bar{V}_{i-1}, \bar{V}_i, \bar{V}_{i+1}$ |
| | Décroît | $\bar{V}_{i-2}, \bar{V}_{i+2}, \bar{V}_{i+3}$ |
| C_{em} | Croît | $\bar{V}_{i+1}, \bar{V}_{i+2}$ |
| | Décroît | $\bar{V}_{i-1}, \bar{V}_{i-2}$ |

Tableau III-2 Table de sélection de \bar{V}_s

III.5.2 Estimation du flux statorique :

Avant d'aborder l'étude du contrôleur du flux, on définit les étapes de calcul nécessaires à l'estimation de l'amplitude flux statorique est estimée à partir les composantes du flux suivant les axes (α, β) , soit :

$$\bar{\varphi}_s = \varphi_{\alpha s} + j\varphi_{\beta s} \quad (3.9)$$

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_{\alpha s} = \int_0^t (V_{\alpha s} - RI_{\alpha s}) dt + \varphi_{\alpha s}(0) \\ \varphi_{\beta s} = \int_0^t (V_{\beta s} - RI_{\beta s}) dt + \varphi_{\beta s}(0) \end{cases} \quad (3.10)$$

Le module du flux s'écrit :

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{\alpha s}^2 + \varphi_{\beta s}^2} \quad (3.11)$$

Les composantes des courants $I_{\alpha s}, I_{\beta s}$ sont obtenues par l'application de la transformation de Concordia aux courants mesurés I_a, I_b, I_c :

$$\bar{I}_s = I_{\alpha s} + jI_{\beta s} \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} I_{\alpha s} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{as} \\ I_{\beta s} = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{bs} - I_{cs}) \end{cases} \quad (3.13)$$

On reconstruit les composantes du vecteur de tension à partir de la mesure de la tension d'entrée de l'onduleur et les états des interrupteurs ($S_a S_b S_c$) en appliquant la transformation de Concordia :

$$\bar{V}_s = V_{\alpha s} + jV_{\beta s} \quad (3.14)$$

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(V_{as} - \frac{1}{2} (V_{bs} - V_{cs}) \right) = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} \left(S_a - \frac{1}{2} (S_b - S_c) \right) \\ V_{\beta s} = \frac{1}{\sqrt{2}} (V_{bs} - V_{cs}) = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (3.15)$$

Le choix du vecteur de tension convenable à appliquer à la machine repose sur la connaissance de la position du flux statorique dans l'un des six secteurs du plan (α, β). La détermination de cette position est basée sur le calcul de l'arc tangent du flux comme le montre l'équation suivante :

$$\theta = \arctg \left(\frac{\varphi_{\beta s}}{\varphi_{\alpha s}} \right) \quad (3.16)$$

III.5.3 Estimation du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir des grandeurs estimées du flux, et les grandeurs mesurées des courants de ligne, par l'équation :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \times (\varphi_{\alpha s} i_{\beta s} - \varphi_{\beta s} i_{\alpha s}) \quad (3.17)$$

On peut remarquer que l'exactitude de l'expression du couple dépend de la qualité d'estimation du flux et de la précision de la mesure des courants.

III.6 Correcteurs d'hystérésis : [36]

III.6.1 Correcteurs d'hystérésis de flux (à 2 niveaux) :

L'objectif de cette correction est de conserver l'amplitude du flux statorique dans une bande et de maintenir ainsi l'extrémité de ce dernier dans une couronne circulaire comme le montre la figure suivante :

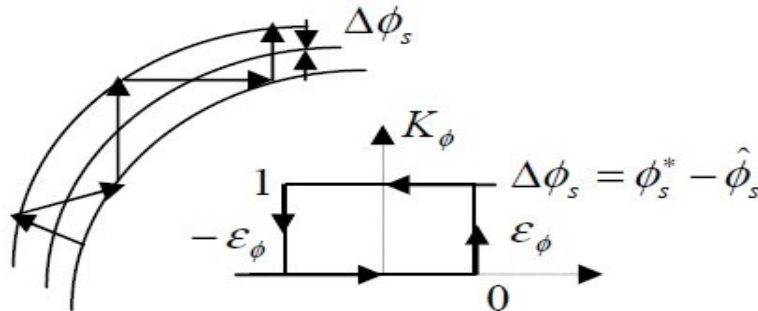


Figure III.9 Comparateur à hystérésis à deux niveaux pour le contrôle du flux

La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module du flux. Les deux seuils du comparateur sont choisis suivant l'ondulation tolérée par le flux statorique.

On peut écrire alors :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{si } \Delta\phi_s > \varepsilon_\phi & \text{alors } K_\phi = 1 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\phi_s \leq \varepsilon_\phi \text{ et } d\Delta\phi_s / dt > 0 & \text{alors } K_\phi = 0 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\phi_s \leq \varepsilon_\phi \text{ et } d\Delta\phi_s / dt < 0 & \text{alors } K_\phi = 1 \\ \text{si } \Delta\phi_s < -\varepsilon_\phi & \text{alors } K_\phi = 0 \end{array} \right.$$

$K_\phi : 0$ signifier qu'il faut réduire le flux.

$K_\phi : 1$ signifier qu'il faut augmenter le flux.

Ce régulateur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement pour avoir des bonnes performances dynamiques.

III.6.2 Correcteurs d'hystérésis de couple (à 3 niveaux) :

Le correcteur de couple a pour but de maintenir le couple dans sa bande d'hystérésis et d'imposer ainsi l'amplitude des ondulations du couple.

Pour mieux contrôler le couple dans les quatre cadrans de fonctionnement sans intervention sur la structure ; Takahashi a proposé un correcteur à hystérésis à trois niveaux.

Ce correcteur permet de commander la machine dans les deux sens de rotation avec un couple positif ou négatif.

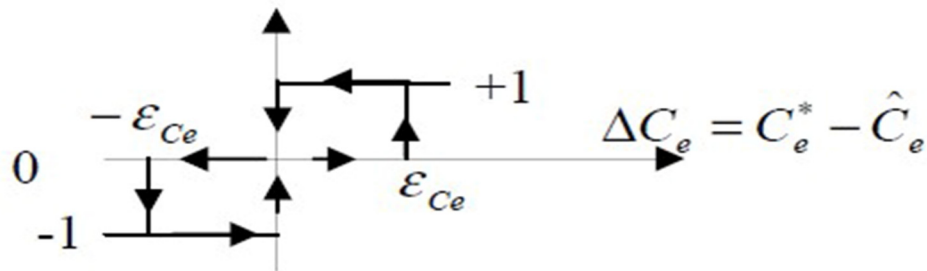


Figure III.10 Comparateur à hystérésis à trois niveaux pour le réglage du couple électromagnétique

Ce comparateur est modélisé par l'algorithme suivant :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Si } \Delta C_e > \varepsilon_{Ce} & \text{alors } K_c = 1 \\ \text{Si } 0 \leq \Delta C_e \leq \varepsilon_{Ce} \text{ et } d\Delta C_e / dt > 0 & \text{alors } K_c = 0 \\ \text{Si } 0 \leq \Delta C_e \leq \varepsilon_{Ce} \text{ et } d\Delta C_e / dt < 0 & \text{alors } K_c = 1 \\ \text{Si } \Delta C_e < -\varepsilon_{Ce} & \text{alors } K_c = -1 \\ \text{Si } -\varepsilon_{Ce} \leq \Delta C_e < 0 \text{ et } d\Delta C_e / dt > 0 & \text{alors } K_c = 0 \\ \text{Si } -\varepsilon_{Ce} \leq \Delta C_e < 0 \text{ et } d\Delta C_e / dt < 0 & \text{alors } K_c = -1 \end{array} \right.$$

$K_c = 1$ signifie que le couple est inférieur à la limite inférieure de la bande et il faut donc l'augmenter.

$K_c = -1$ signifie que le couple est supérieur à la limite supérieure de la bande et il faut le diminuer

$K_c = 0$ signifie que le couple est à l'intérieur de la bande et il faut donc l'y maintenir

On note aussi que l'utilisation d'un correcteur à deux niveaux est possible, mais il n'autorise le contrôle du couple que dans un seul sens de rotation.

Avec ce correcteur, pour inverser le sens de rotation de la machine il est nécessaire de croiser deux phases de la machine.

III.7 Élaborations des tables de commutation :

En se basant sur le tableau (III.3), la table de sélection du vecteur de tension est élaborée en fonction des variables de sorties des comparateurs à hystérésis C_{flx} . Et C_{cpl} , ainsi que du numéro de position du flux statorique N. Le tableau suivant montre la table de sélection [33].

| Flux | Couple | N=1 | N=2 | N=3 | N=4 | N=5 | N=6 | Contrôleur | |
|---------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|---------------|
| $C_{flx} = 0$ | $C_{cpl} = 1$ | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 | V_2 | Deux Niveaux | Trois Niveaux |
| | $C_{cpl} = 0$ | V_0 | V_7 | V_0 | V_7 | V_0 | V_7 | | |
| | $C_{cpl} = -1$ | V_5 | V_6 | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 | | |
| $C_{flx} = 1$ | $C_{cpl} = 1$ | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 | Deux Niveaux | Trois Niveaux |
| | $C_{cpl} = 0$ | V_7 | V_0 | V_7 | V_0 | V_7 | V_0 | | |
| | $C_{cpl} = -1$ | V_6 | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | | |

Tableau III-3 Stratégie de commande avec un comparateur à hystérésis a trois niveaux (avec les vecteurs Tension nuls)

On peut choisir des vecteurs tensions non nulles pour décroître plus rapidement le couple électromagnétique. On peut avoir besoin d'augmenter ou diminuer le couple électromagnétique de la machine mais aussi de maintenir constant.

| Flux | Couple | N=1 | N=2 | N=3 | N=4 | N=5 | N=6 | Contrôleur | |
|---------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|---------------|
| $C_{flx} = 0$ | $C_{cpl} = 1$ | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 | V_2 | Deux Niveaux | Trois Niveaux |
| | $C_{cpl} = 0$ | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 | V_2 | V_3 | | |
| | $C_{cpl} = -1$ | V_5 | V_6 | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 | | |
| $C_{flx} = 1$ | $C_{cpl} = 1$ | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 | Deux Niveaux | Trois Niveaux |
| | $C_{cpl} = 0$ | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_1 | | |
| | $C_{cpl} = -1$ | V_6 | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | | |

Tableau III-4 Stratégie de commande avec un comparateur à hystérésis a trois niveaux (sans les vecteurs tension nuls)

III.8 Simulation avec la commande MLI

III.8.1 Résultats de simulation :

Les figures suivantes illustrent les résultats de simulation de la MAS associé avec une pompe hydraulique, alimenté par un panneau solaire à travers un onduleur de tension commandé par MLI sinusoïdale. Après 0.5 sec de démarrage à vide on a appliqué un couple de charge de 15 N.m.

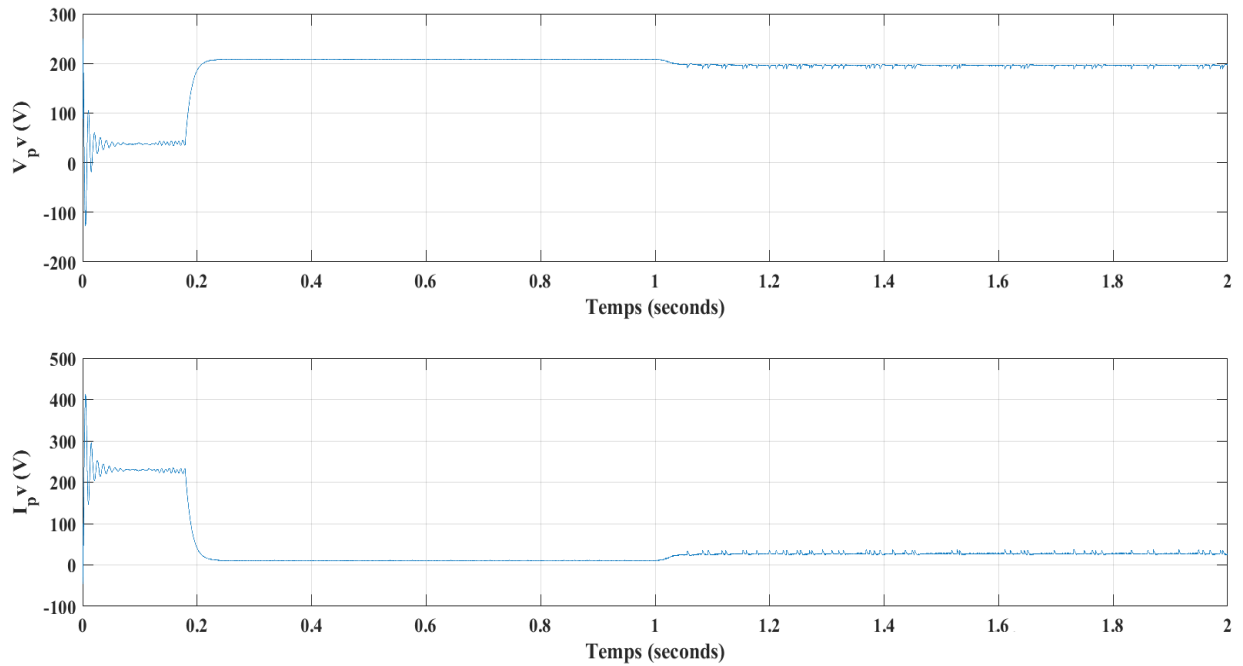


Figure III.11 Tension et courant de sortie du GPV(V)

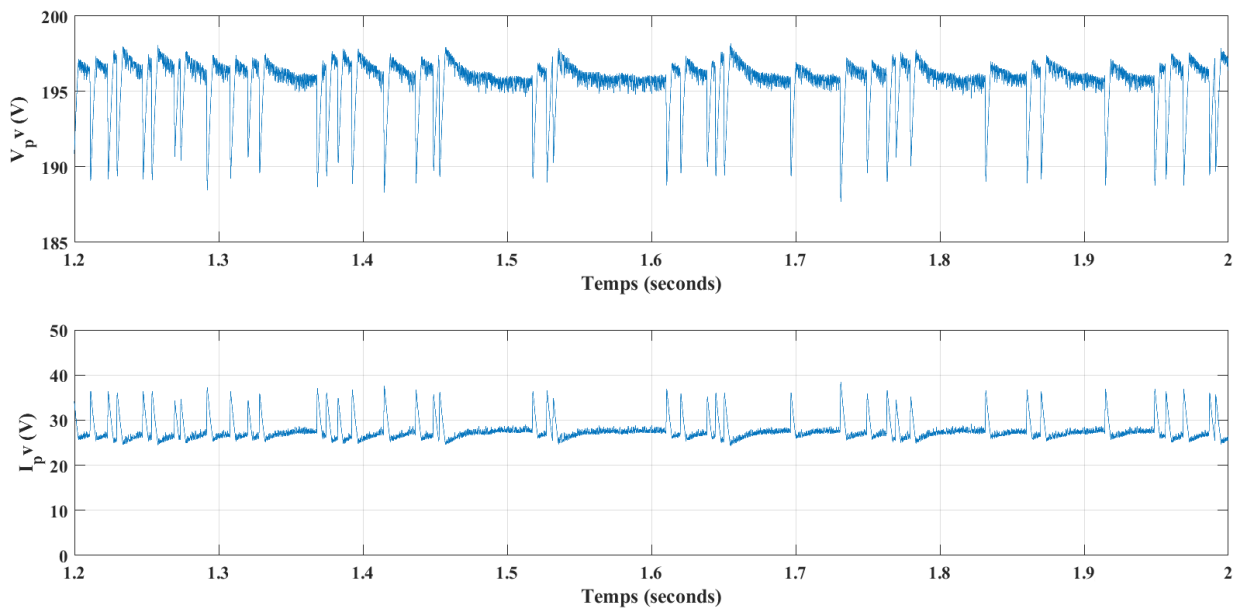


Figure III.12 Zoom de la tension et le courant de sortie du GPV(V)

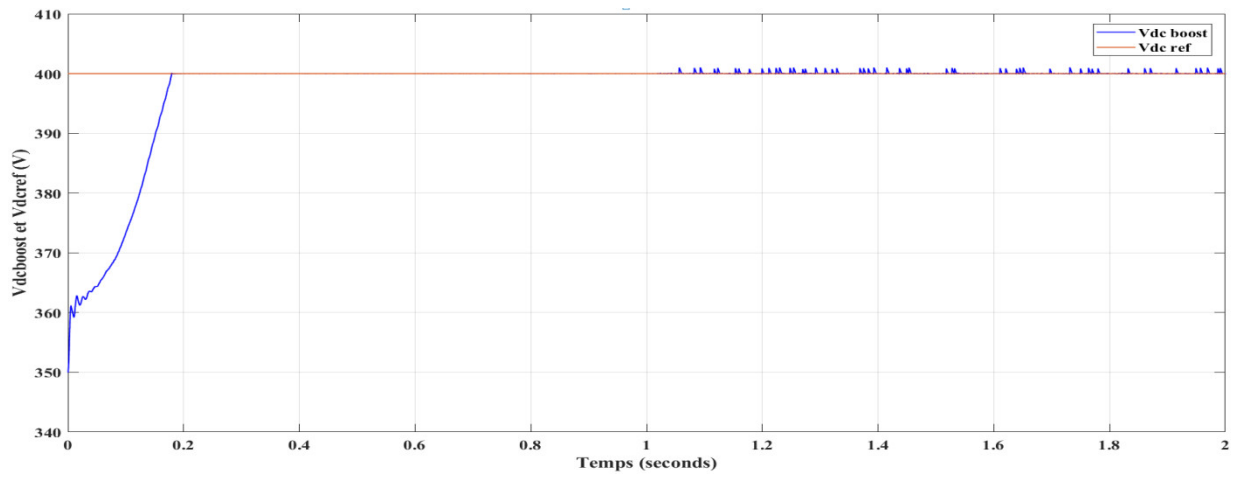


Figure III.13 Tension de sortie de l'hacheur Boost avec sa référence

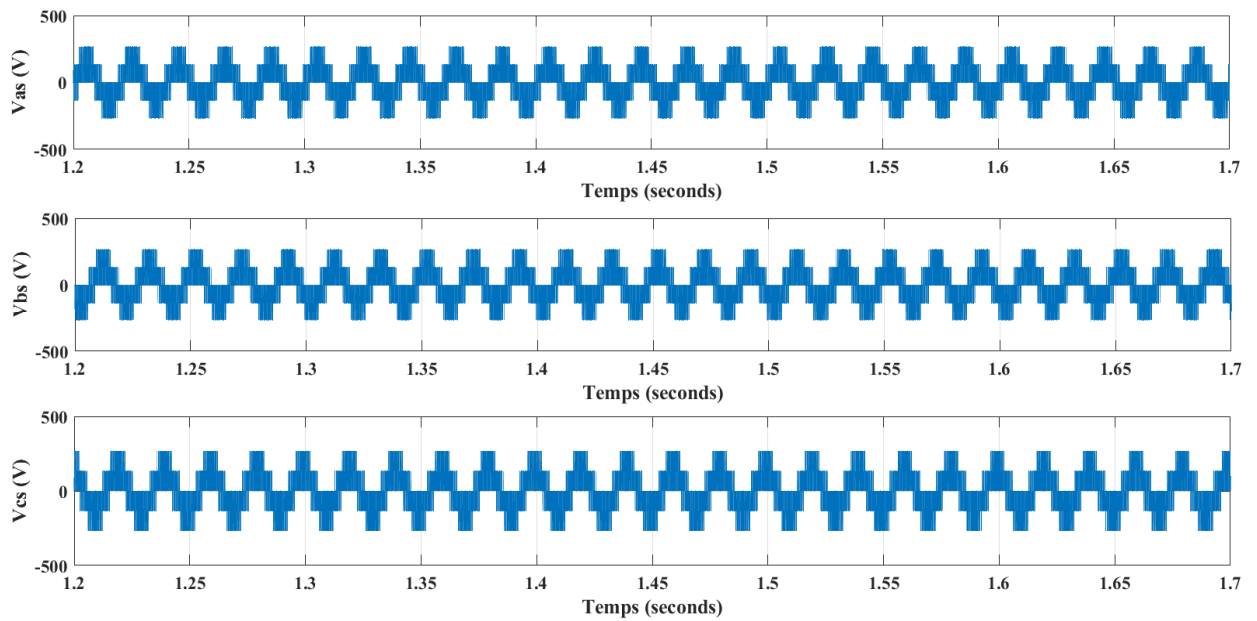


Figure III.14 Les tensions de sortie de l'onduleur

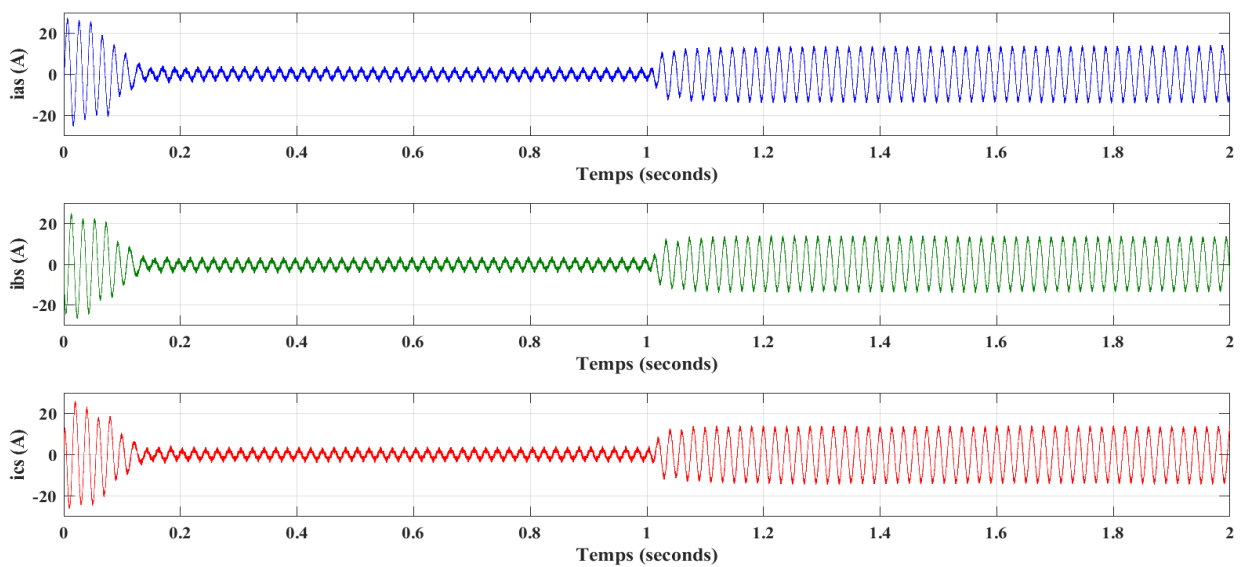


Figure III.15 Les trois courants statoriques

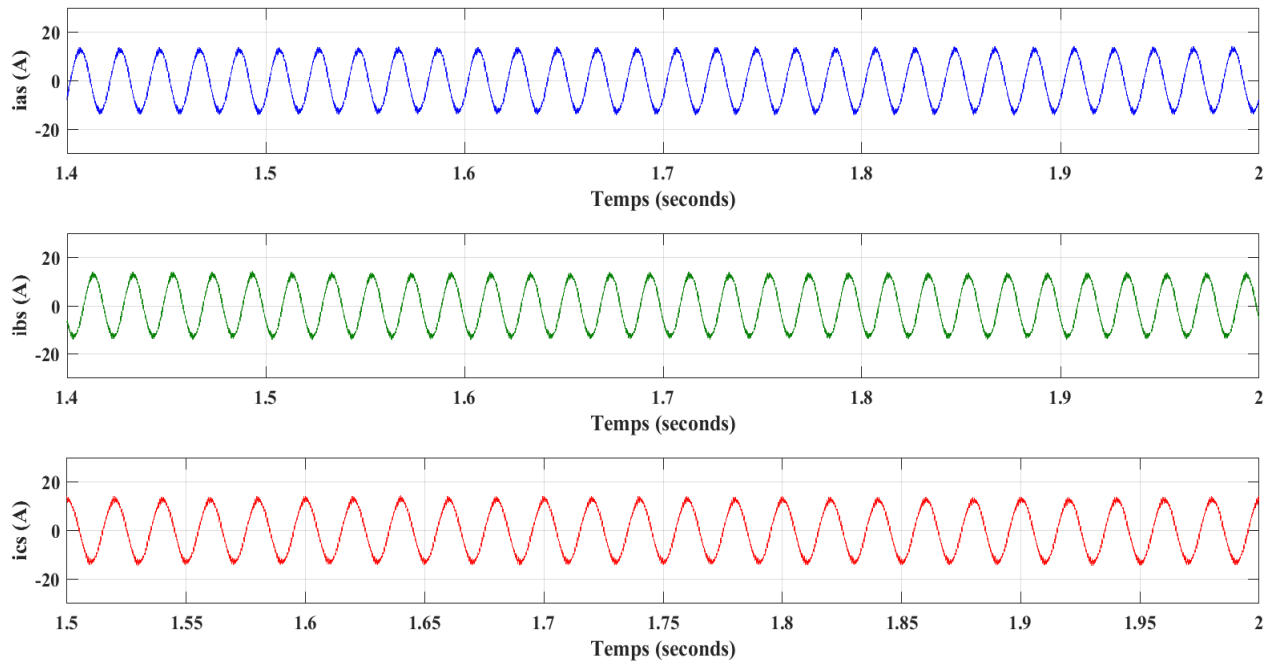


Figure III.16 Zoom des trois courants statoriques

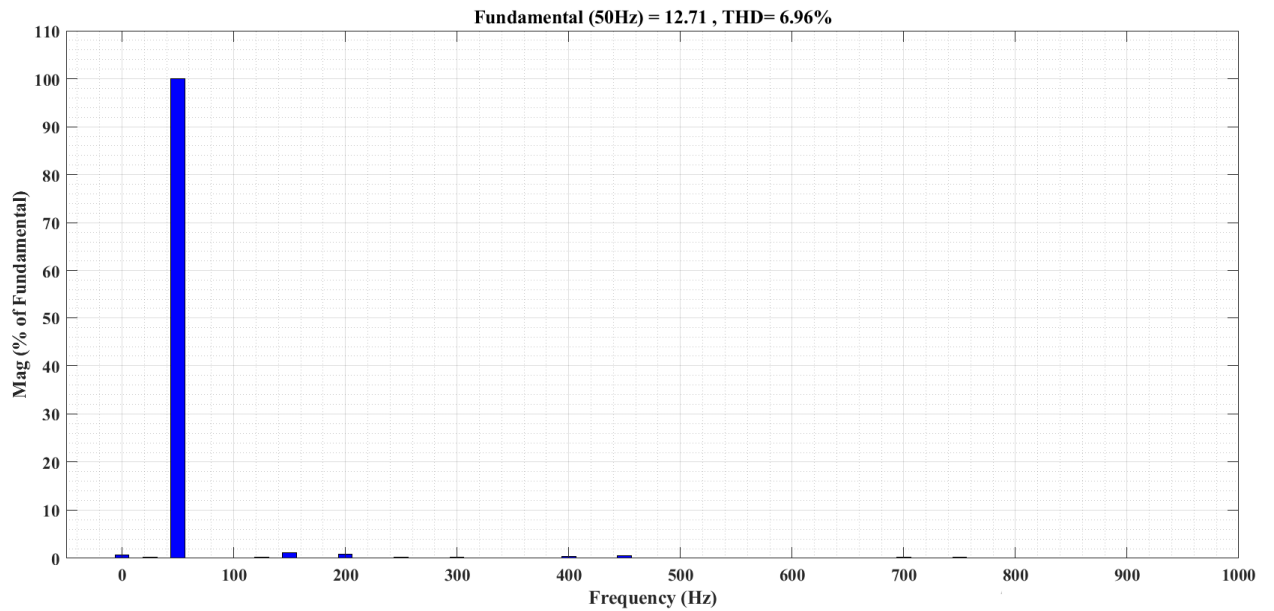


Figure III.17 Spectre de fréquence du courant statorique et THD (%).

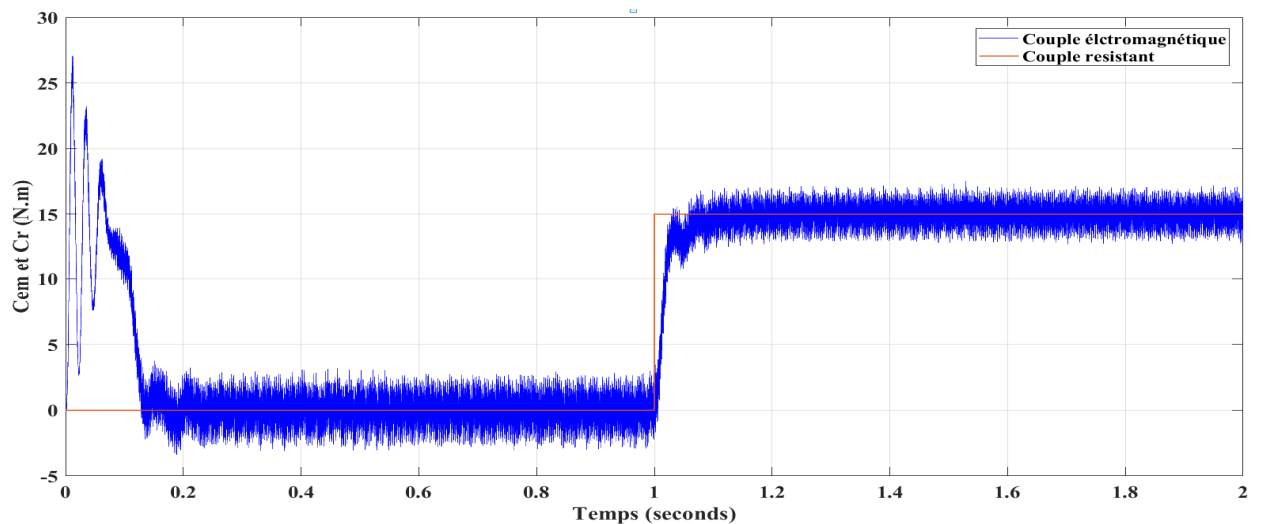


Figure III.18 Le couple électromagnétique et le couple résistant

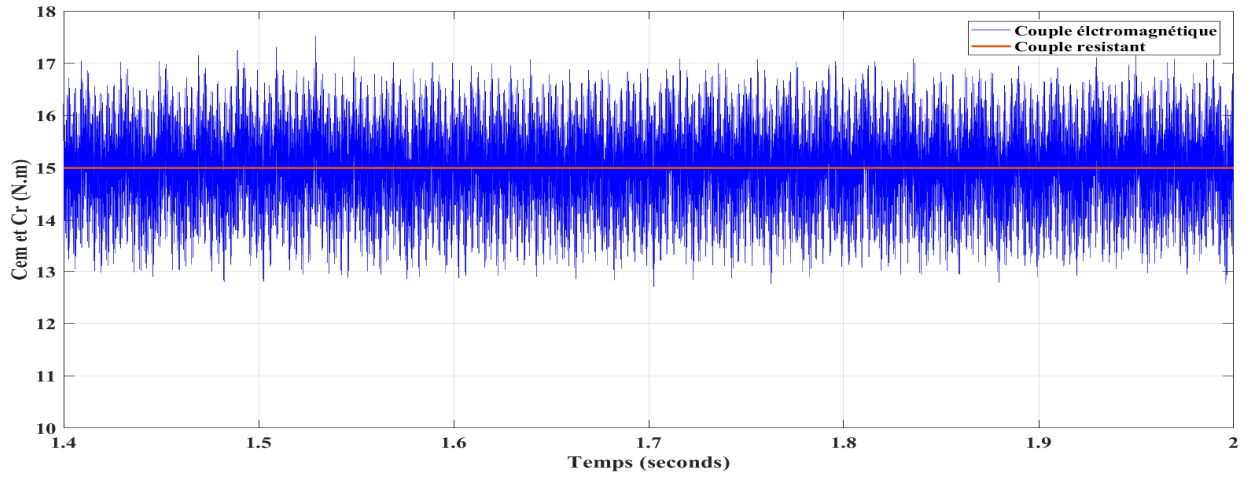


Figure III.19 Zoom du couple électromagnétique

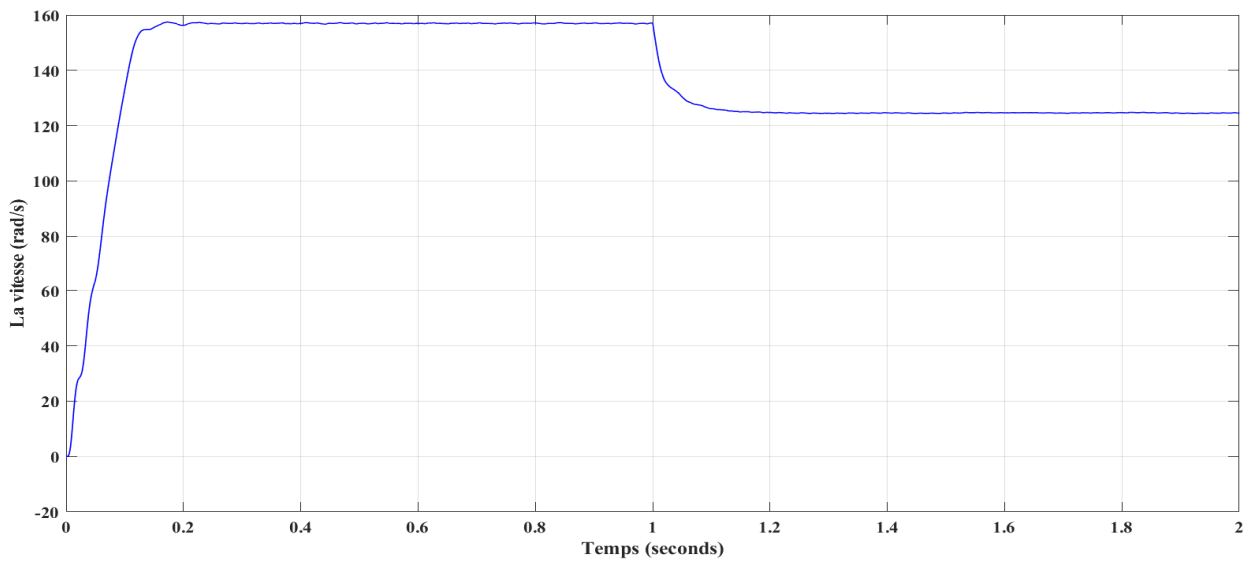


Figure III.20 Réponse de la vitesse de rotation

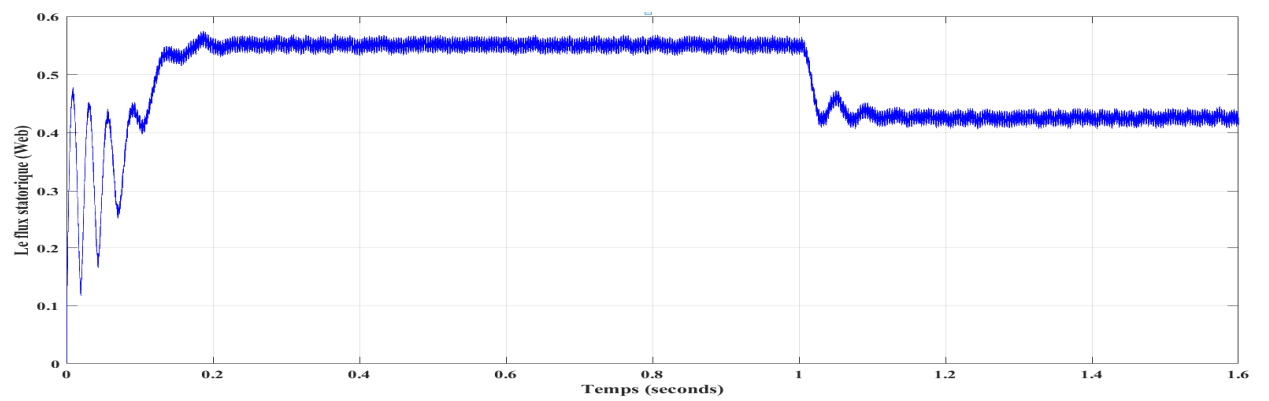


Figure III.21 Flux statorique

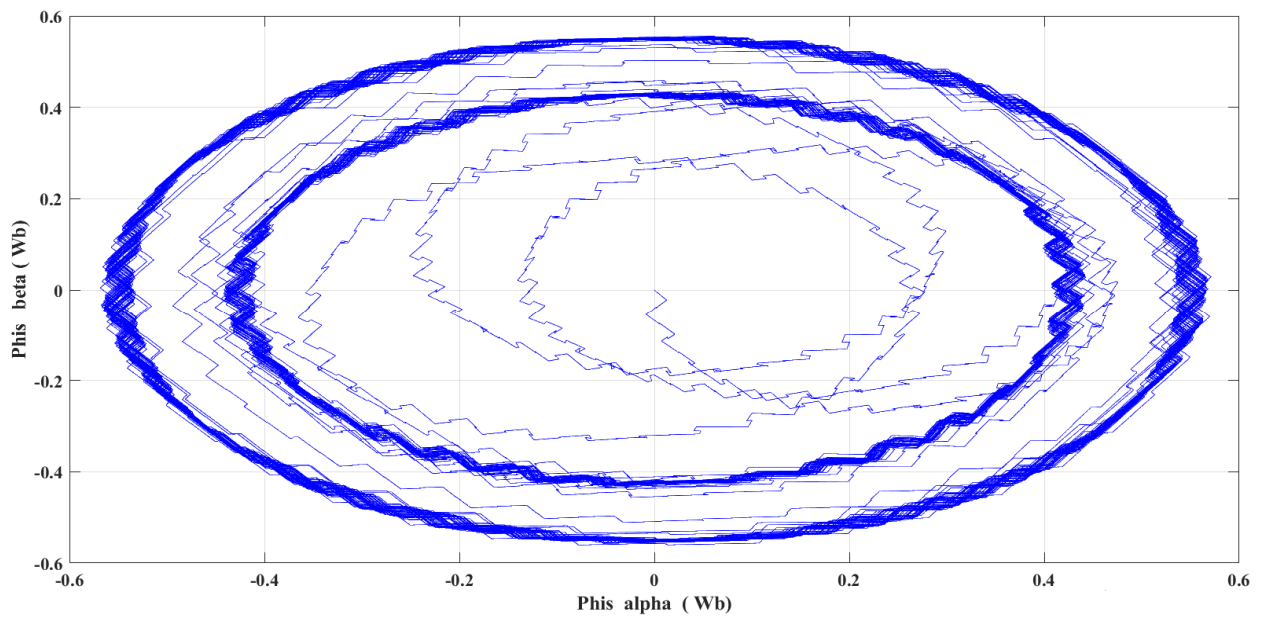


Figure III.22 La trajectoire du flux statorique

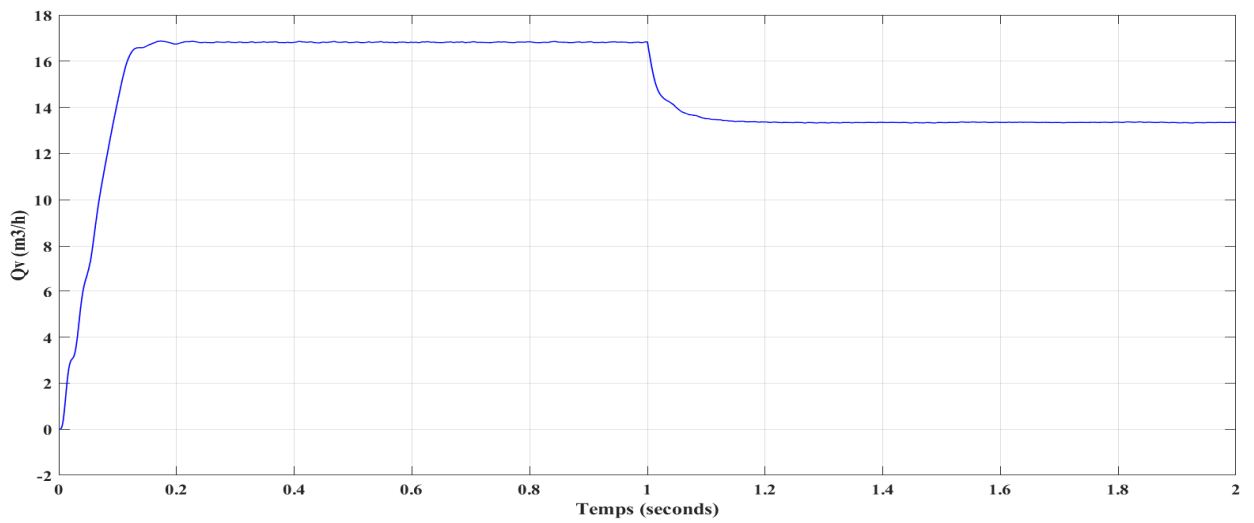


Figure III.23 L'évolution du débit Q_v en fonction du temps

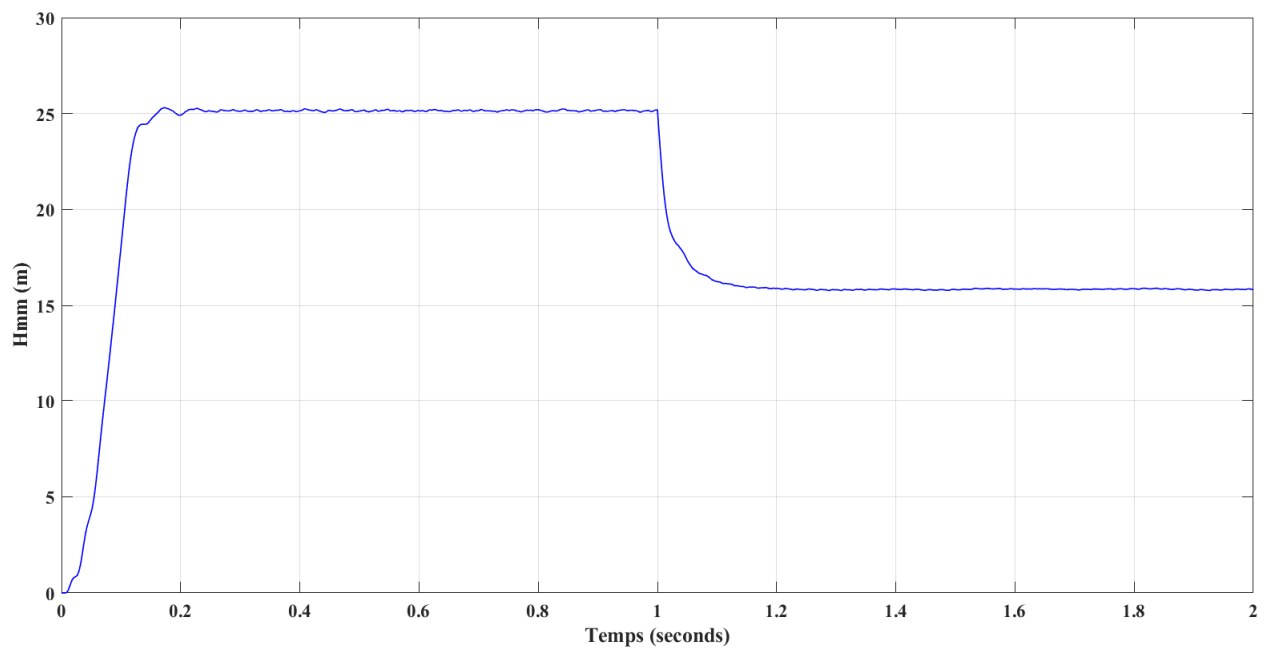


Figure III.24 L'évolution de la hauteur manométrique en fonction du temps.

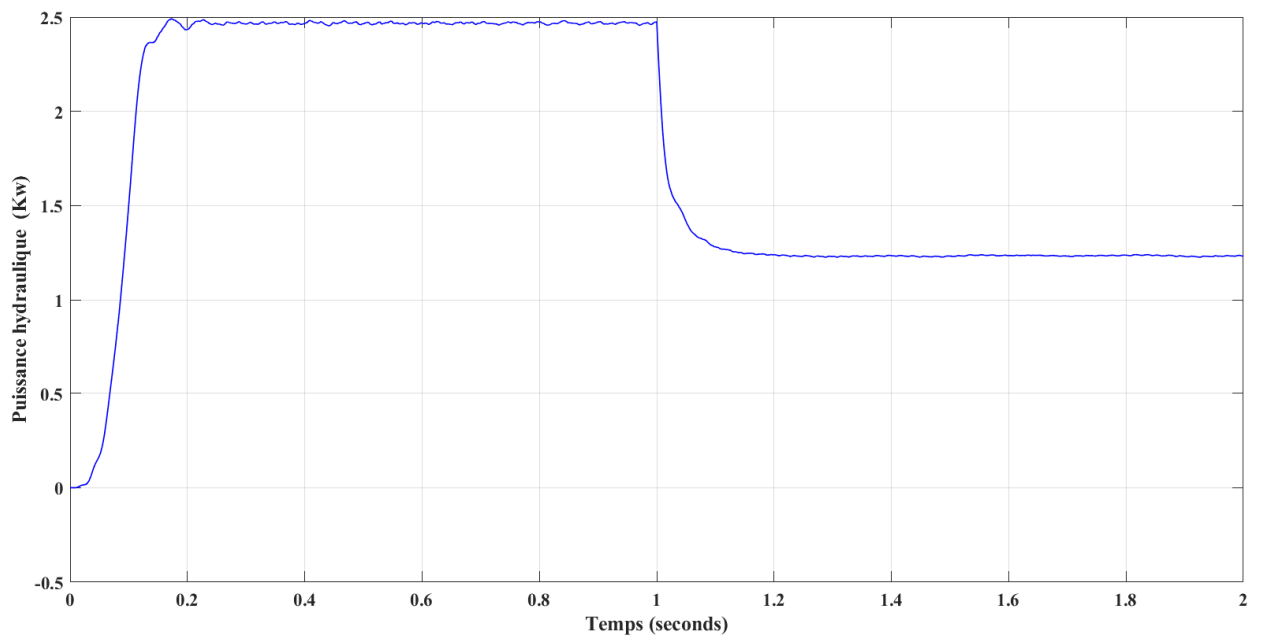


Figure III.25 L'évolution de la puissance utile en fonction du temps.

III.9 Résultats de simulation en utilisant la DTC

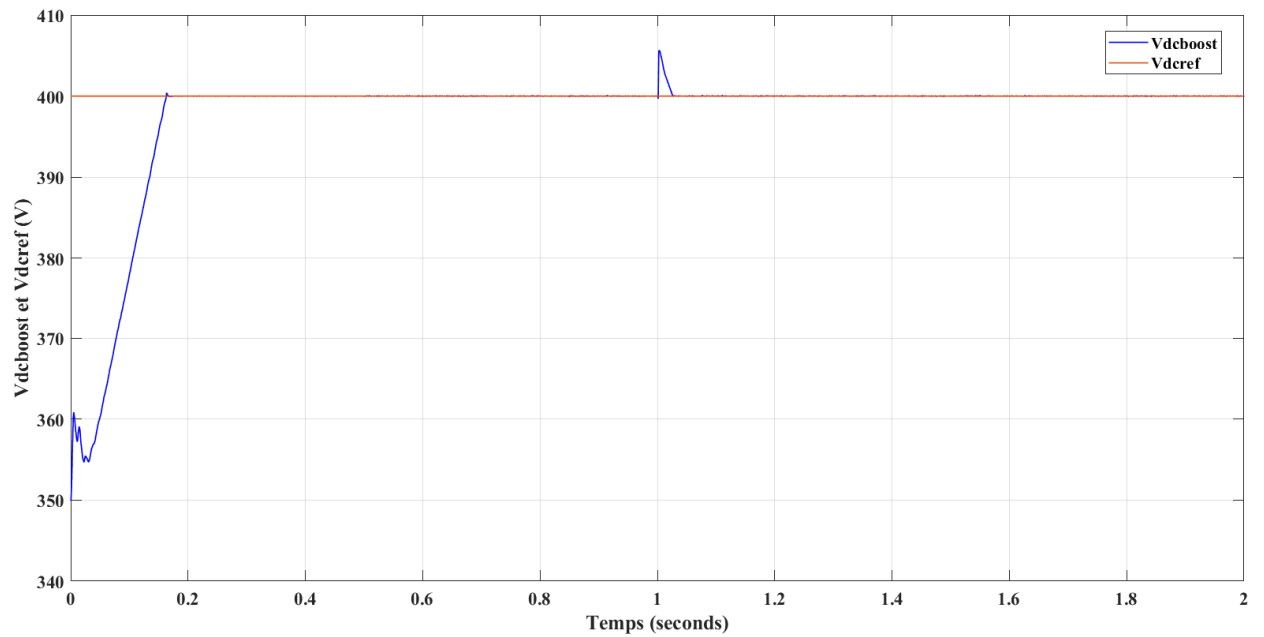


Figure III.26 Tension de sortie de l'hacheur Boost avec sa référence

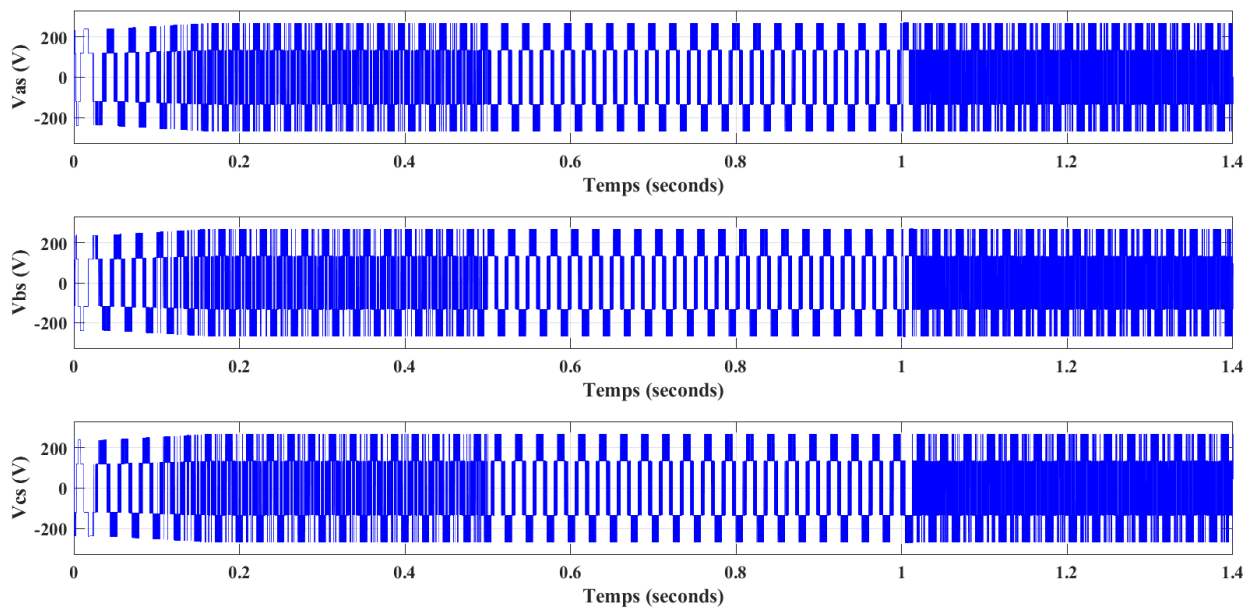


Figure III.27 Les tensions à la sortie de l'onduleur

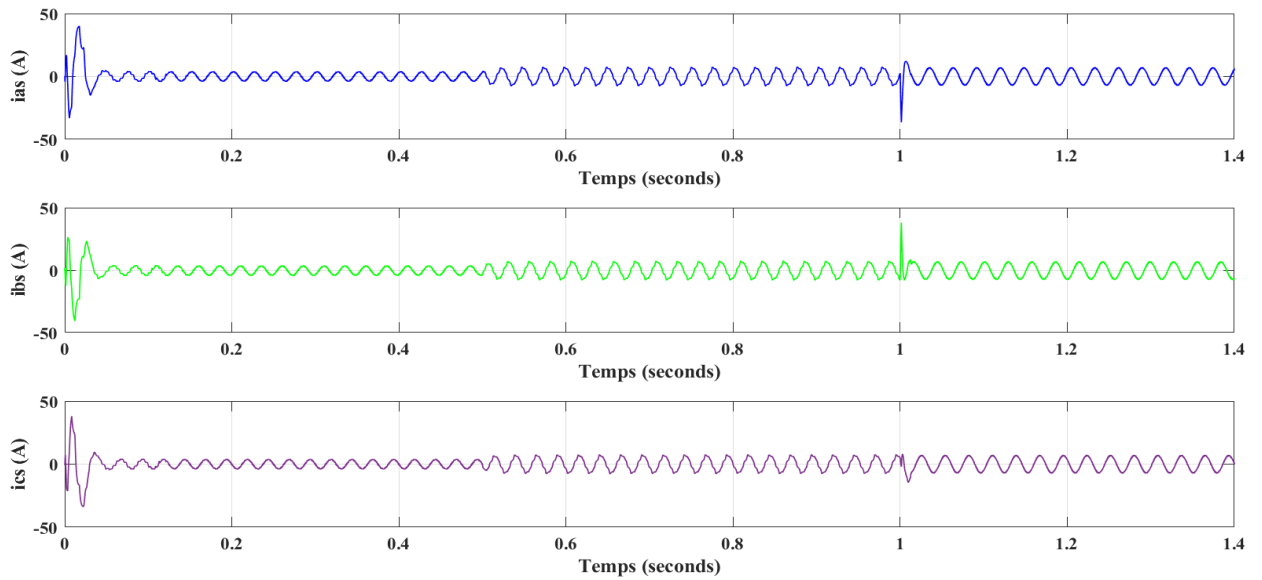


Figure III.28 Les trois courants statoriques

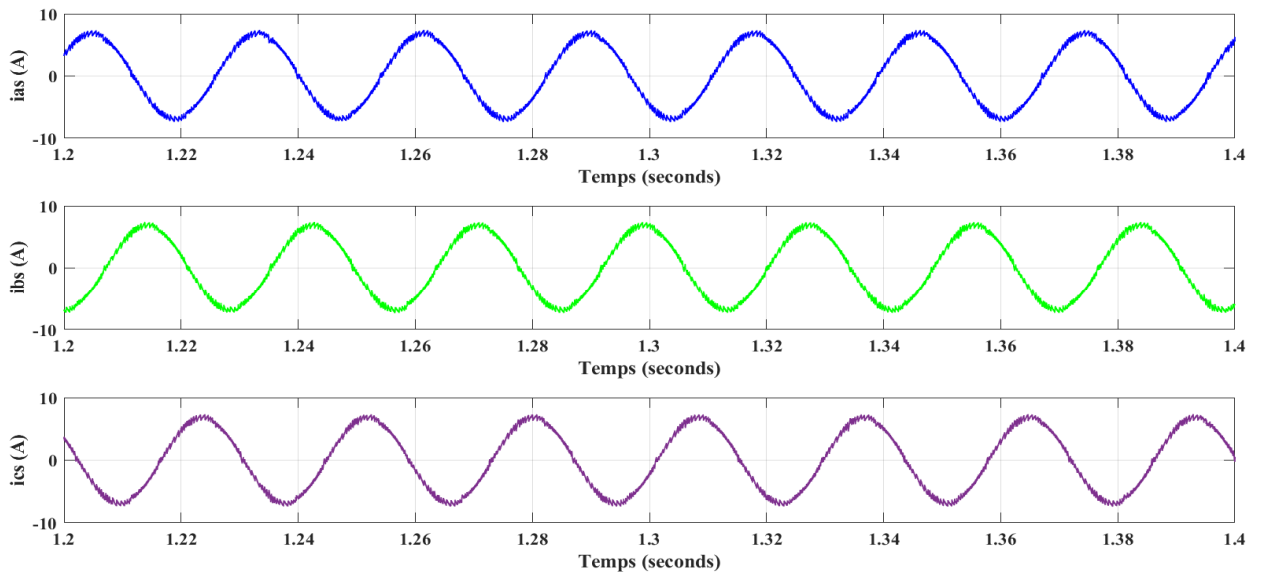


Figure III.29 Zoom des trois courants statoriques

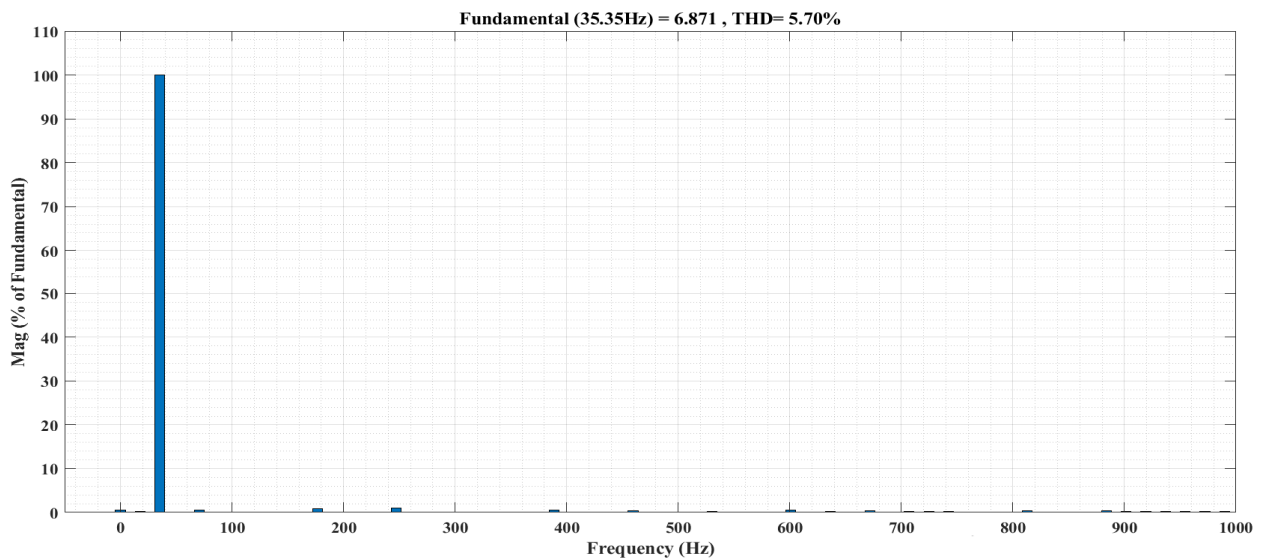


Figure III.30 Spectre de fréquence du courant statorique et THD (%).

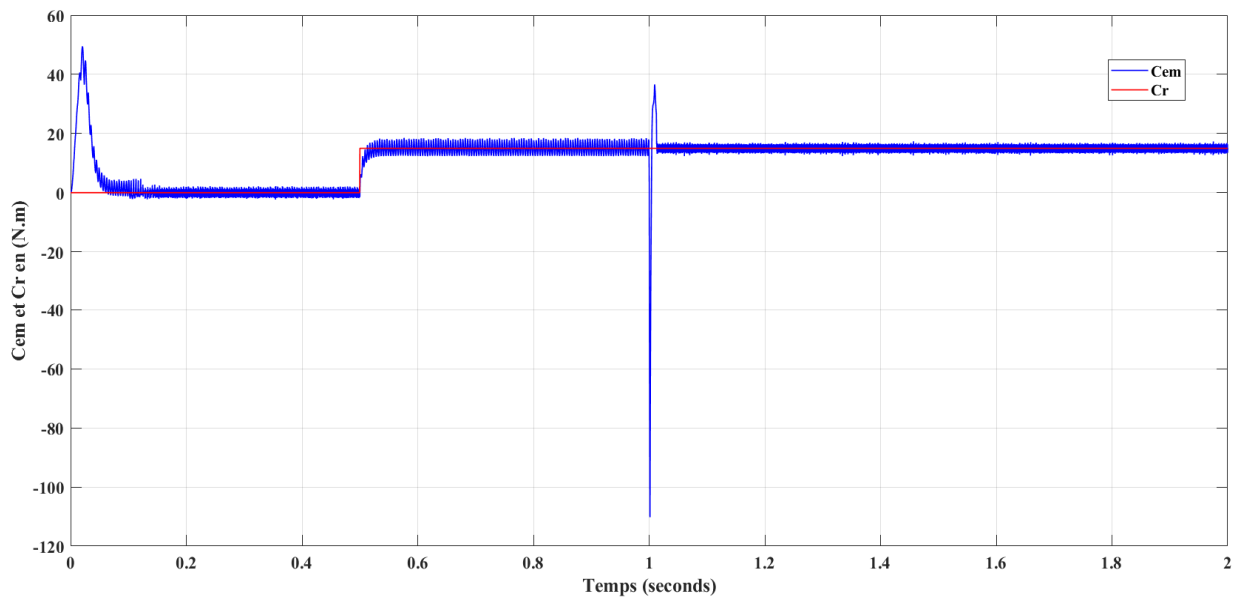


Figure III.31 Le couple électromagnétique et le couple résistant

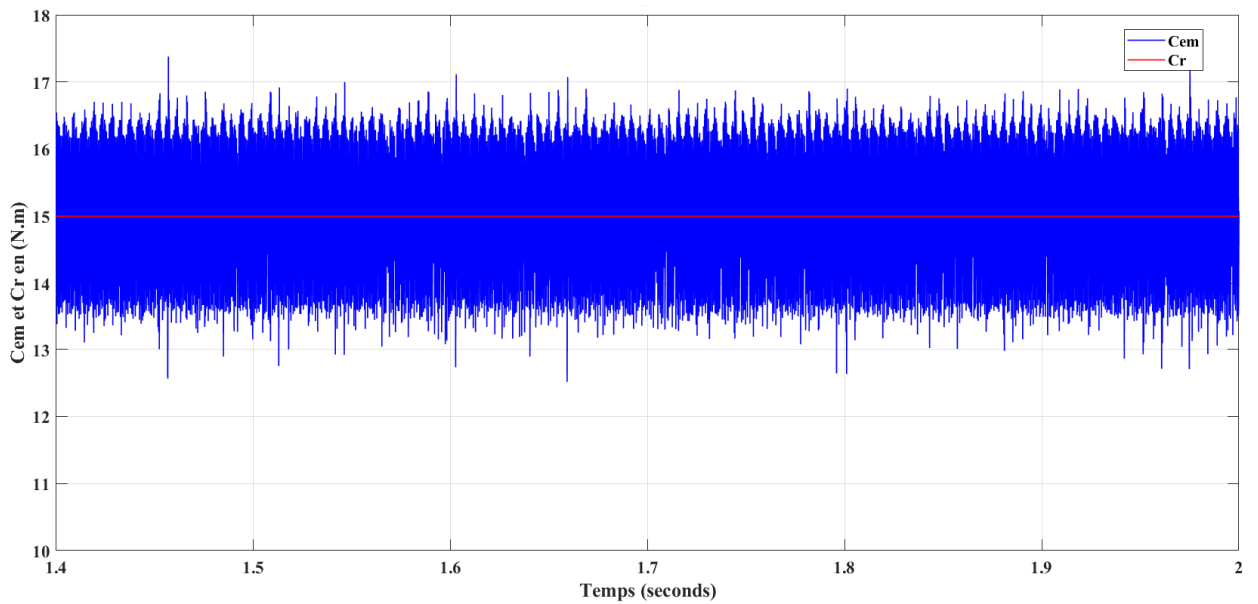


Figure III.32 Zoom du couple électromagnétique

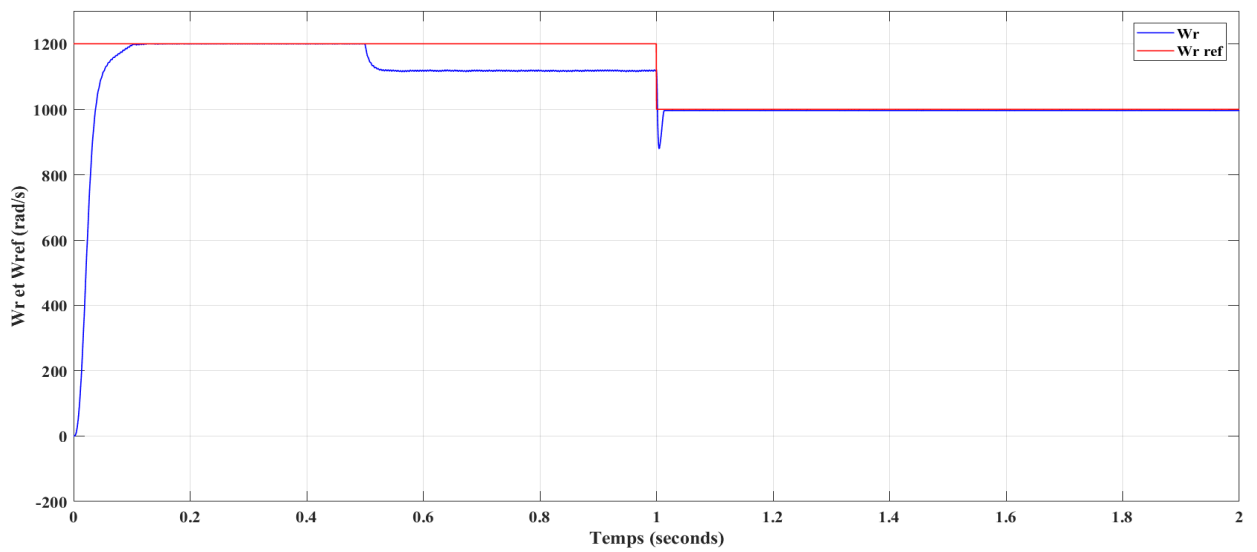


Figure III.33 Réponse de la vitesse de rotation

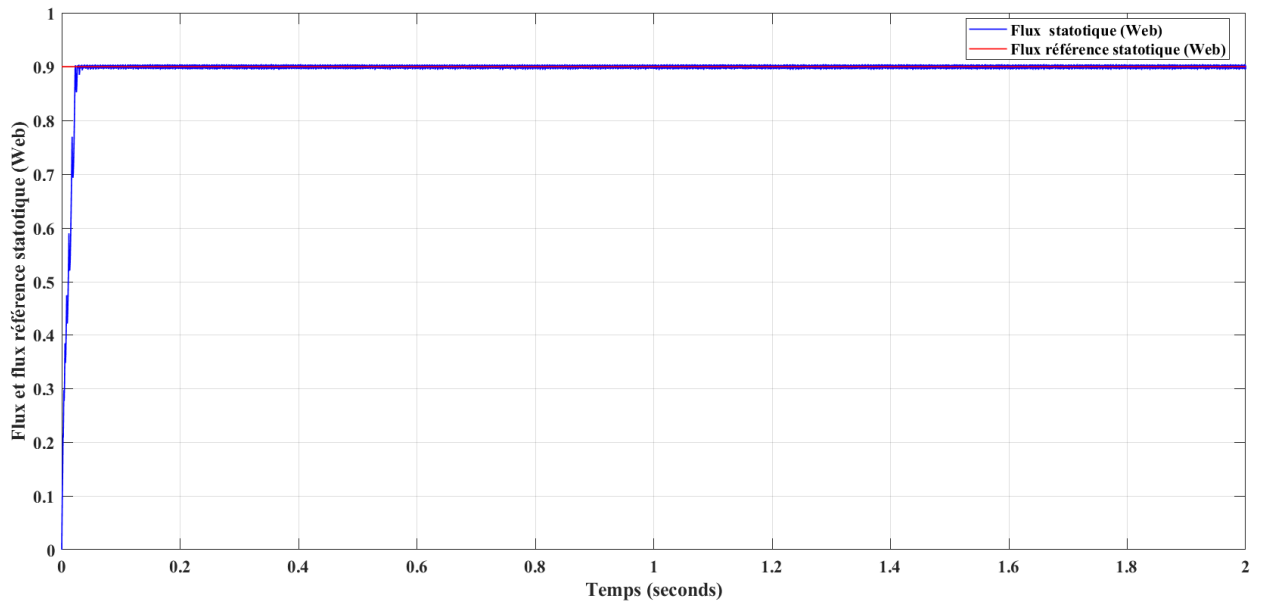


Figure III.34 Flux statorique

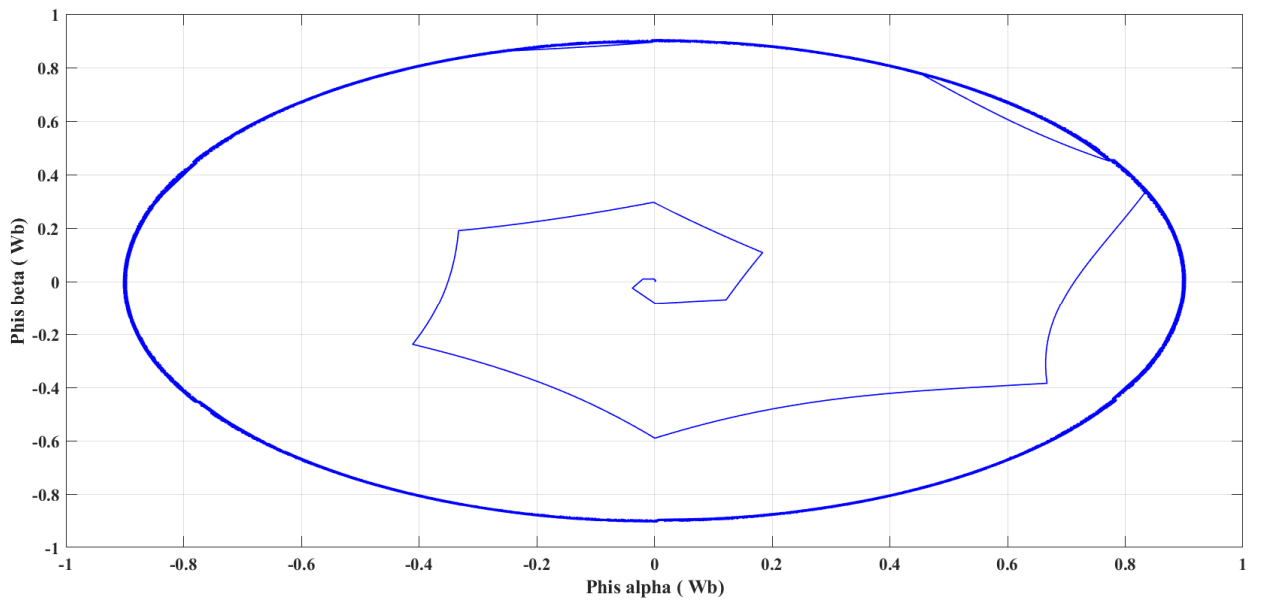


Figure III.35 La trajectoire du flux statorique

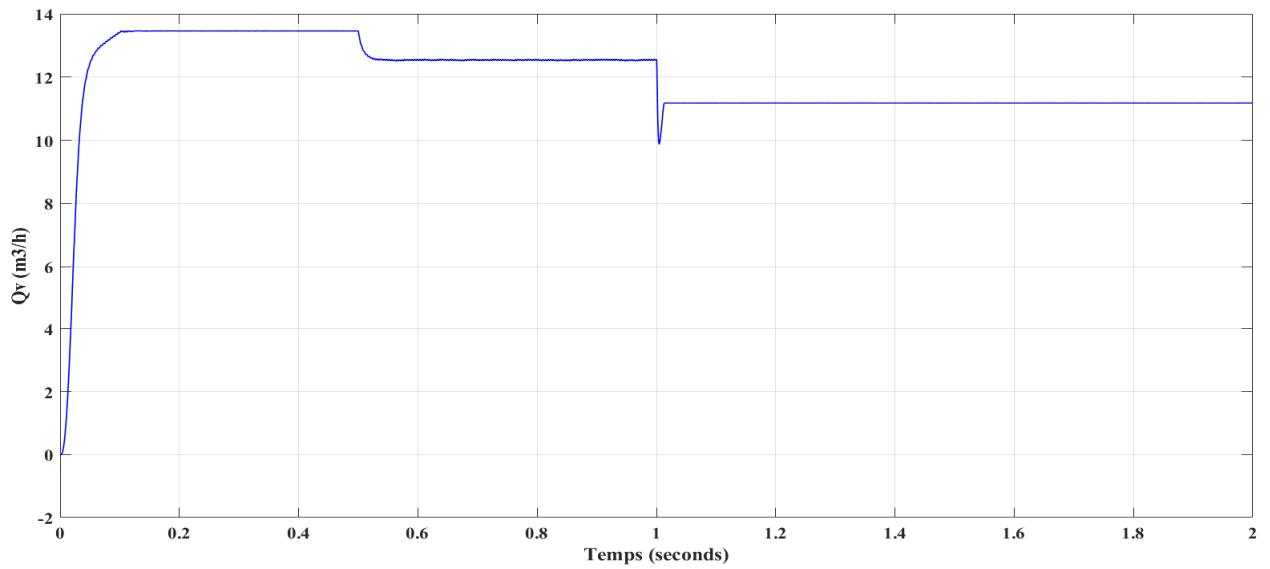


Figure III.36 L'évolution du débit Q_v en fonction du temps

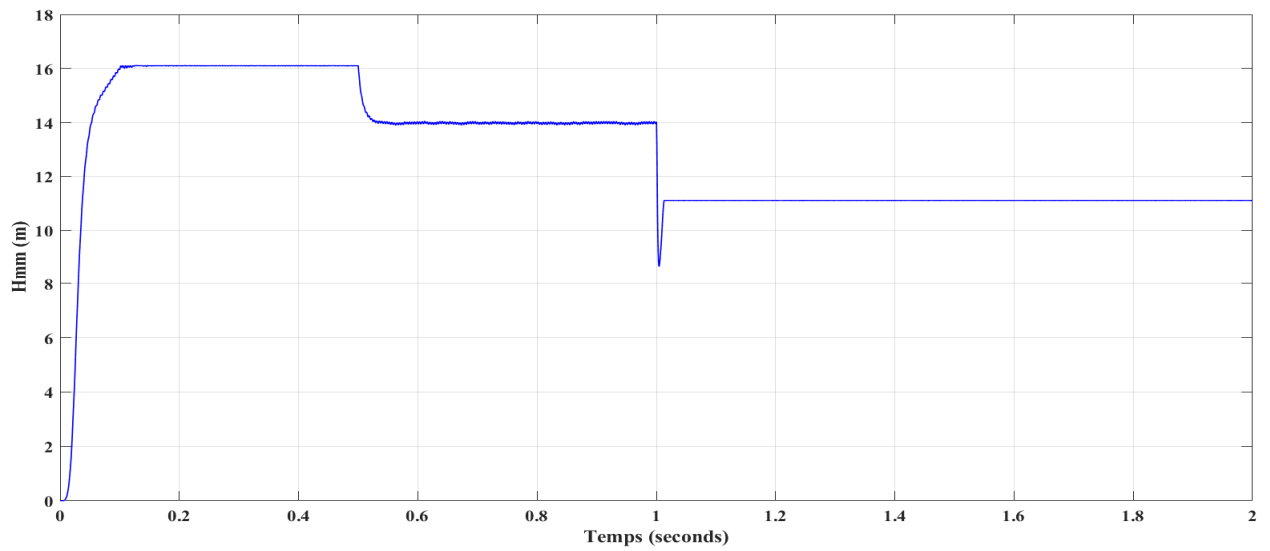


Figure III.37 L'évolution de la hauteur manométrique en fonction du temps.

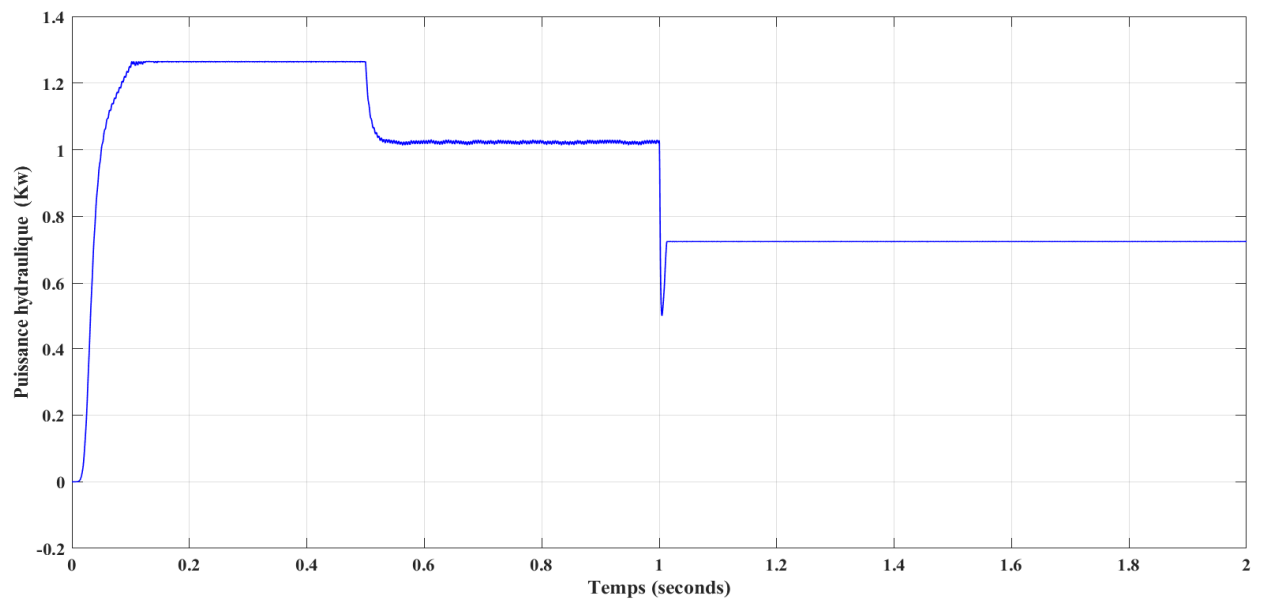


Figure III.38 L'évolution de la puissance utile en fonction du temps.

III.9.1.1 Interprétation des résultats :

D'après les figures de simulation de la chaîne de pompage PV commandé par MLI sinusoïdale nous pouvons remarquer que :

- La tension de sortie $V_{dc_{boost}}$ à la sortie du convertisseur hacheur (BOOST) et supérieure à la tension de l'entrée et bien régulée et suivre parfaitement sa référence lors de l'utilisation de la commande DTC.
- Au démarrage le courant statorique atteint une valeur crête, due au fort appel du courant de démarrage afin de générer un couple suffisant pour vaincre l'inertie de la machine. Le courant évolue à l'intérieur d'une enveloppe exponentielle, il tendra après le régime transitoire de 0,1 s vers une sinusoïde d'amplitude constante. Après l'application du couple résistant de 15N.m à 0.5s on remarque une légère augmentation du courant statorique, on constate aussi que les courants statoriques lors de de l'utilisation de la commande DTC sont moins riches des harmoniques.
- Pour mli $THD_{is}=6.96\%$.
- Pour DTC $THD_{is}=5.7\%$.
- La courbe du couple présente un pic très élevé au démarrage, et le couple tend vers zéro après 0,1s. On remarque après application du couple résistant le couple électromagnétique rejoint un régime transitoire ce qui compense la valeur du couple résistant 15N.m.nous constatons que le couple pour la commande DTC moins riche de fluctuation par rapport à la commande MLI sinusoïdale.
- La courbe de vitesse montre une augmentation quasi linéaire de l'oscillation pendant les instants initiaux du démarrage, et après environ 0,1 seconde, la vitesse se stabilise à une valeur proche de la vitesse de synchronisme pour la commande MLI sinusoïdale, par contre pour la commande DTC, elle suit sa référence ($W_{ref}=1200tr/Mn$) .
- Lors de l'application du couple résistant C_r ; on remarque que le régulateur de vitesse pour la DTC n'ai pas réagi pour garder la vitesse à sa référence.
- On constate que le vecteur flux statorique suit parfaitement sa référence ça et décrit par une trajectoire quasi-circulaire lors de l'utilisation de la commande DTC et n'est pas influé par le couple C_r , contrairement à la MLI sinusoïdale, cette trajectoire n'est pas bien organisé et n'est pas uniforme, elle est influé par le couple C_r .
 - On constate aussi que le flux pour le premier algorithme est trop riche en fluctiation par rapport au deuxième algorithme qui a mois d'ondulation.
- Du côté de la pompe on remarque que le débit volumétrique, la hauteur manométrique et la puissance hydraulique sont proportionnelle à la vitesse de la MAS pour les deux commandes.

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons élaborés deux algorithmes de commande d'un MAS associé à un onduleur a deux niveaux, une pompe centrifuge, un convertisseur boost et un panneau solaire.

Le premier algorithme est basé sur la MLI sinusoïdale et le deuxième est basé sur la DTC.

Après une comparaison entre ces deux commandes ; les résultats montrent que la commande DTC est robuste et efficace plus que la commande MLI sinusoïdale.

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit au domaine des énergies renouvelables, Aujourd'hui, des chercheurs travaillent dans ce domaine surtout dans les systèmes de pompage d'eau photovoltaïque ou l'utilisation de la machines asynchrones occupe une place importante, Ce sujet est intéressant et récent.

Ces systèmes peut être installés sur des sites isolés et arides, soit pour l'irrigation (agriculture) et/ou approvisionnement en eau.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittente selon la fluctuation des conditions atmosphériques.

Ont à étudier l'ensemble d'une chaîne de pompage PV composé de : l'onduleur, l'hacheur, le moteur et la pompe qui sont reliés à un générateur solaire.

Cette étude couvre, en détail, les caractéristiques du générateur photovoltaïque et de ses applications dans un secteur rural tel que les systèmes autonomes. La technique d'algorithme d'optimisation du générateur solaire, qui a été étudiée est la perturbation et l'observation (P&O), elle est généralement utilisée par les concepteurs de suiveur de point de puissance maximum (MPPT) ; mais malheureusement on n'a pas pu intégrer ces techniques dans nôtres algorithmes à cause de divergence de la tension de sortie du convertisseur BOOST(c'est pour cette raison nous n'avons pas simulé en utilisant cette technique.), pour éviter cette divergence et avoir une tension constante, on a utilisé un régulateur de tension de sortie de l'hacheur boost en imposant une tension de sortie de référence , cela nous a permet d'avoir un tension constante qui suit parfaitement sa référence .c'est pour cette raison nous n'avons pas pouvoir la simuler.

Une étude comparative entre deux algorithmes développés basées sur la commande par MLI sinusoïdale et la commande DTC par l'utilisation d'un onduleur à deux niveaux, nous a permet de remarquer que les valeurs de THD du courant obtenu après simulation des différents algorithmes de commande montre que l'utilisation de la commande DTC donne la meilleure valeur de THD 5.7%.

En peut conclure aussi que les fluctuations dans le couple et le flux sont fortement diminuée dans le cas de la commande DTC par rapport la MLI sinusoïdale.

Du côté de la pompe on constat que paramètres de la pompe sont proportionnelle à la vitesse de la MAS pour les deux commandes.

En perspective de ce travail, on pourra le parfaire par :

- L'utilisation des méthodes d'optimisation classique et avancé de la puissance maximale du système photovoltaïque par exemple on note (par la logique floue. réseaux de Néron...).
- Pour l'optimisation du système de pompage, on peut l'optimiser en commandant la machine asynchrone par mode glissant, la commande backstepping...

Référence bibliographique :

- [&] Revue des Énergies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 489 - 499 489 Commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque au fil du soleil A. Meflah 1* et T. Allaoui
- [@] Salim ABOUDA « CONTRIBUTION A LA COMMANDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES : APPLICATION AUX SYSTEMES DE POMPAGE » THESE présentée à L'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax année 2015
- [1] DAOUD Amine « Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire » Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (thèse de doctorat) 2013
- [2] Nadjim Rachek, Mohamed abdelmoumene Nacer, "Étude et commande d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil", mémoire de master, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie, 2018.
- [3] review on solar photovoltaic water pumping system Prof. Mangesh R.Dhage Prof. Vaibhav S. Prof Girnale Prof. Chetan P. Patil Assistant Professor .
- [4]. FERRAI.A, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Électrique d'un Village » Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [5]. DERBAL. M, DEBBAH. N « Étude et Commande d'un Système Hybride Éolien Photovoltaïque Connecté au Réseau avec Stockage. Contribution à l'Amélioration de la Qualité de l'Énergie. », Mémoire du projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique d'Alger Juin 2013.
- [6]. Boukhlifa Hamza, "Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw," Mémoire de master de l'université de M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2017.
- [7]. R. Maouedj, " Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les Sites de Tlemcen et de Bouzereah ", Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid, Décembre 2005.
- [8]. A. Bouden, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [9]. M. L. Luzienne, "Étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ", Mémoire de Magister – Université El Hadj Lakhdar; Batna 2008.
- [10]. J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, "Le Pompage Photovoltaïque", Éditions MultiMondes, 1998.
- [11]. A. Betka, « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil », Thèse de Magister, Centre universitaire Biskra, 1997.

- [12] Saliha Aoufi, « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas Sétif, Algérie, 2014.
- [13]. A. Oi. "Design And Simulation of Photovoltaic Water Pumping System». thèse doctorate. California Polytechnic. California : University San Luis Obispo, 2005.
- [14]. J, Royer Et T, Djako. "Manuel De Cours A L'intention Des Ingénieurs Et Des Techniciens, Le Pompage Photovoltaïque". S.L. : Université D'Ottawa, 2002.
- [15]. MOHAMMED BELHADJ SOUHEYB « ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE » Mémoire de fin d'étude ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES T L E M C E N 2019
- [16]. S, Abada. "Étude Et Optimisation D'un Générateur Photovoltaïque Pour La Recharge D'une Batterie Avec Un Convertisseur Sepic". L'obtention Du Grade De Maitre Es Sciences. Québec : Université Laval, 2011.
- [17]. B, MAKHLOUF " Commande et modélisation d'un onduleur à cinq bras alimentés par un générateur photovoltaïque ", Mémoire master, université de Jijel, 2011
- [18]. Aït Kaci D, Boubouzal N : « Étude et simulation d' un aérogénérateur ». Mémoire d'ingénieur en Électrotechnique, UMMTO 2009.
- [19].Mr. MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque». Mémoire de Magister année 2011 UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEM
- [20]. http://www.est-usmba.ac.ma/coursenligne/Chapitre5_MAS.pdf
- [21]. B. de Chargerés, "Pompes volumétriques pour liquides", Techniques de l'Ingénieur, Réf : B4320,1991.
- [22]. James B. Rishel, "Water Pumps and Pumping Systems", McGraw-Hill, 2002.
- [23]. Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [24]. MelleDEBILI Narimene « Étude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïques » thèse de magister magister en électronique année 2015
- [25].Pr.A. Meroufel, « Commande découplée d'une machine asynchrone sans capteur mécanique », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, 2004.
- [26]. S,Ikni. "D'un Systeme Photovoltaïque Avec Stockage". Mémoire Master. Bejaia :Universite De Tasdawit N'bgayet, 2016.
- [27]. Pr S. barkat cours « technique de commande électrique » université de Mohamed Boudiaf M'sila 2020
- [28]. Mr / Ziad Boukerche et Mr / Mouad Boulahdjila « Dimensionnement D'un Système De Pompage Photovoltaïque » mémoire Master en Electromécanique année 2020

- [29]. BILAL HAMDAOUI et ISMAIL BOURDJI mémoire Master 2 « Étude d'un système de pompage photovoltaïque au fil soleil » Spécialité Électrotechnique année 2016
- [30]. N. Mansouri, N. Ghanmi « Commande et analyse des performances d'une station de pompage Photovoltaïque fonctionnant en régime optimal » Revue des Énergies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008).
- [31]. Abbassi Fatima « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque .application aux sites sahariens » mémoire License professionnel Spécialité Énergies Renouvelables année 2018
- [32]. Pr S. barkat TP « Étude de l'association onduleur de tension-moteur asynchrone » université de Mohamed Boudiaf M'sila 2020
- [33]. Pr Bentaallah A cours Matière « technique de la commande électrique » https://drive.google.com/drive/mobile/folders/1BYYIDYL8e3MvRAZKsPARiTsVGHDcMyx0/1kzWmDyC4iQuYsZFCAbWsjukW2XQjrQqX/1M9sfFjLTjFBzHyingYn0WADoxYEskq3Y/1n-fr_4dV2rz8mQc-36z1RfaIcqAux4PZ/1GAynMRdo84hVEcPW_WrFMEYIsqFUbuUG?sort=13&direction=a
- [34]. C. Canudas and W. I. T. Carlos, "Modélisation, contrôle vectoriel et DTC: Commande des moteurs asynchrones 1," Paris Hermes Sci., 2000.
- [35] C. de A. Martins, "Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par convertisseur multiniveaux à fréquence imposée," 2000.
- [36]. Dr Boudiaf Mohamed cours Matière « technique de la commande électrique » https://drive.google.com/drive/mobile/folders/1BYYIDYL8e3MvRAZKsPARiTsVGHDcMyx0/1kzWmDyC4iQuYsZFCAbWsjukW2XQjrQqX/1M9sfFjLTjFBzHyingYn0WADoxYEskq3Y/1n-fr_4dV2rz8mQc-36z1RfaIcqAux4PZ/1GAynMRdo84hVEcPW_WrFMEYIsqFUbuUG?sort=13&direction=a

ANNEXE :

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU LUXOR SOLAR SOLO LINE 140M

Nombre de cellules en séries $n_s=36$

Puissance maximale $P_{max}=140W$

Courant de court-circuit $I_{sc}=8.97A$

Tension de circuit ouvert $V_{oc}=22.57V$

Tension point maximal (V_{mp})= 17.48V

Courant point maximal (I_{mp})= 8.01A

Coefficient de température associé à $I_{sc}=0.041405\% / ^\circ C$

Coefficient de température associé à $V_{oc}=-0.32419\% / ^\circ C$

Résistance série de la cellule photovoltaïque $R_s=0.311\Omega$

Résistance shunt de la cellule photovoltaïque $R_{sh}=37.2802\Omega$

PARAMETRES DU HACHEUR

$C_1=12.70mF$ $C_2=47mF$

$L=2mH$

PARAMETRES DE LA MAS

Puissance nominale : 2.2 kW

Tension : 400 V

Vitesse nominale : 1420 tr/mn

Fréquence : 50 Hz

Résistance statorique : 3.32 Ω

Résistance rotorique : 2.11 Ω

Inductance cyclique statorique : 4.39 mH

Inductance cyclique rotorique : 4.39 mH

Inductance mutuelle cyclique : 0.2373 H

Nombres de paires de pôles : 2

Moment d'inertie : 0.01 kg.m²

PARAMETRES DE LA POMPE CENTRIFUGE :

Débit maximal $Q_{max} = 30\text{ m}^3/\text{h}.$

Relevage maximal $H_r = 80\text{ m}.$

Puissance moteur $P_m = 14\text{ kW}.$

RESUME:

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit au domaine des énergies renouvelables, Aujourd'hui, des chercheurs travaillent dans ce domaine surtout dans les systèmes de pompage d'eau photovoltaïque ou l'utilisation de la machines asynchrones occupe une place importante, Ce sujet est intéressant et récent.

Ces systèmes peut être installés sur des sites isolés et arides, soit pour l'irrigation (agriculture) et/ou approvisionnement en eau.

Dans le but de faire une étude comparative, on a élaboré deux algorithmes le premier est basé sur la commande par MLI sinusoïdale et le deuxième est basé sur la commande DTC pour commander un onduleur à deux niveaux.

Les deux algorithmes de commande sont évaluée en termes d'ondulation, de couple et de flux et de THD du courant.

Suivant les résultats obtenus, La commande DTC fournit des bonnes performances.

Mots clés : Mots clés : machine asynchrone, DTC, onduleur, THD, Pompe, photovoltaïque, Boost.

Abstract:

The work presented in this work is part of the field of renewable energies, Today, researchers work in this field especially in photovoltaic water pumping systems where the use of asynchronous machines occupies an important place, This subject is interesting and recent.

These systems can be installed on isolated and arid sites, either for irrigation (agriculture) and/or water supply.

In order to make a comparative study, two algorithms have been developed, the first is based on sinusoidal PWM control and the second is based on DTC control to control a two-level inverter.

Both control algorithms are evaluated in terms of ripple, torque and flux and current THD.

Depending on the results obtained, the DTC command provides good performance.

Keywords: asynchronous machine, DTC, inverter, THD, Pump, photovoltaic, Boost.

ملخص:

العمل المقدم يندرج في مجال الطاقات المتجددة ، والباحثون اليوم يعملون في هذا المجال وخاصة في أنظمة ضخ المياه الكهروضوئية حيث يحتل استخدام الآلات غير المتزامنة مكانة مهمة ، وهذا الموضوع حديث و مثير للاهتمام.

يمكن تركيب هذه الأنظمة في المواقع المعزولة والقاحلة ، إما للري (الزراعة) و / أو إمدادات المياه.

من أجل إجراء دراسة مقارنة ، قمنا بإنجاز خوارزميتين ، الأولى تعتمد على التحكم الجيبي والثانية تعتمد على التحكم المباشر للتحكم في المموج ثنائي المستوى.

تم تقييم خوارزميات التحكم من حيث التموج في العزم والتدفق و قيمة THD في التير الكهربائي.

وفقاً للنتائج التي تم الحصول عليها ، يوفر التحكم المباشر أداءً جيداً.

الكلمات الرئيسية: محرك غير متزامن ، التحكم المباشر ، موج ، THD ، مضخة ، كهروضوئية ، قاطع متناوب.