

TP1 Commande en boucle ouverte de l'association Moteur Asynchrone-Onduleur avec pilotage MLI

Les progrès réalisés durant ces dernières années dans le domaine des convertisseurs statiques de l'électronique de puissance avancée ont rendu l'utilisation de nombreux procédés industriels intéressante. De ce fait, nombreux procédés industriels à base des convertisseurs statiques sont développés pour l'amélioration des performances et les efficacités des systèmes des entraînements électriques.

Un variateur de vitesse est un équipement permettant de faire varier la vitesse d'une machine, une nécessité pour de nombreux procédés industriels à savoirs le contrôle du débit d'une pompe ou d'un ventilateur (alternateurs, générateurs, ...), de la vitesse d'une chaîne de fabrication, de la vitesse d'un train de papeterie ou d'aciérie, de la vitesse des systèmes de transport des personnes (train, téléphérique, ...), et de la vitesse de coupe ou d'avance des machines-outils.

Objectifs de TP:

La construction du modèle de simulation (blocs des systèmes) de commande en boucle ouverte de l'association Moteur Asynchrone-Onduleur avec pilotage MLI dans les deux repères (α, β) et (d, q) dans l'environnement logiciel Matlab/ Simulink et l'étude de l'influence de l'onduleur MLI sur le comportement du Moteur Asynchrone.

Partie I : Principes généraux de commande en boucle ouverte de l'association Moteur Asynchrone-Onduleur avec pilotage MLI

La variation de la vitesse des machines asynchrones se fait à l'aide d'un onduleur de tension avec pilotage MLI (Fig. 1). La source d'entrée est du type source de tension. En sortie de l'onduleur, on contrôle l'amplitude des tensions statoriques ainsi que leur fréquence f .

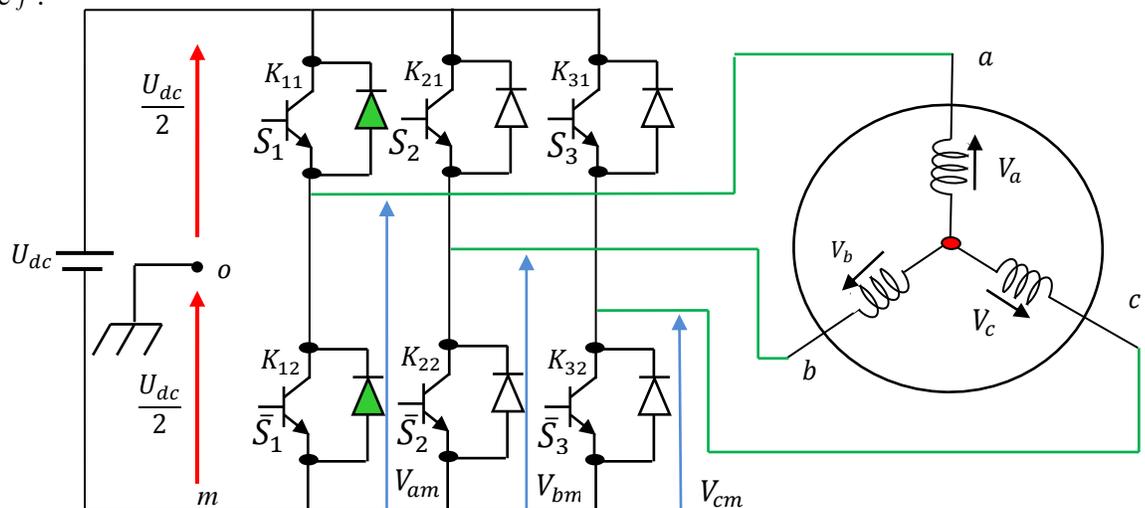


Figure (1): Représentation de l'ensemble onduleur-MAS

1- Modalisation de la machine asynchrone

1-1 Modèle mathématique de la machine asynchrone dans le repère triphasée

La machine asynchrone à cage est le moteur le plus répandu dans l'industrie: il est robuste, fiable, économique. Il est également apprécié pour sa très bonne standardisation.

Le modèle mathématique de la machine asynchrone triphasé est donné par:

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s] \cdot [I_s] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} \{[I_s]\} + [M_{sr}] \cdot \frac{d}{dt} \{[I_r]\} \\ [V_r] &= [R_r] \cdot [I_r] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} \{[I_r]\} + [M_{rs}] \cdot \frac{d}{dt} \{[I_s]\} \end{aligned}$$

Pour étudier les phénomènes transitoires électromécaniques avec une vitesse rotorique variable (par exemple le démarrage, le freinage et la variation de la charge), il faut ajouter l'équation du mouvement du système.

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_r \Omega$$

Avec :

- $[V_s] = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T$ Vecteur de tension statorique
- $[V_r] = [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$ Vecteur de tension rotorique
- $[I_s] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$ Vecteur du courant statorique
- $[I_r] = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$ Vecteur du courant rotorique
- J : Inertie des masses tournantes ;
- C_{em} : Couple électromagnétique de la machine;
- C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine;
- Ω : Vitesse mécanique (rotorique);
- F_R : frottement visqueux;

La mise en équation des moteurs triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants

Cette transformation permet donc de passer des valeurs des courants, des tensions et des flux des trois bobines du stator (repère a_s, b_s, c_s) ainsi que celle du rotor (repère a_r, b_r, c_r) dans un repère biphasé. Cette transformation permet de réduire la complexité et la non-linéarité du système, de simplifier la formulation des équations différentielles régissant la machine, et de rendre les **mutuelles inductances constantes**.

Le passage d'un système triphasé au système diphasé (u, v) est le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux sont définis par la transformation.

$$[F_{uvo}] = [P(\theta_a)][F_{abc}]$$

Cette transformation a été présentée par **R.H. Park** en 1929 lors de l'étude de la machine synchrone comme moyen de simplifier les équations de celle-ci l'idée de **Park** repose sur le fait qu'un champ tournant crée par un système triphasé peut l'être aussi à l'identique par un système biphasé de deux bobines à $\frac{\pi}{2}$ alimentées par deux courants I_u et I_v .

La transformation de Park est obtenue à partir d'une matrice unique (3x3) donnée par:

$$[P(\theta_a)] = k \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & \cos(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_a) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Ou : $[P(\theta_a)]$ est la matrice de **Park**

θ_a L'angle de la transformation de **Park** ou angle de **Park** et dépendre des grandeurs transformés (rotorique ou statorique).

$\theta_a = \theta_s$ Pour la transformation des grandeurs statorique.

$\theta_a = \theta_r$ Pour la transformation des grandeurs rotorique.

Où k est une constante qui peut prendre la valeur $\frac{2}{3}$ pour la transformation de **Clark** dans le cas de la conservation des amplitudes (non conservation de puissance) ou la valeur $\sqrt{\frac{2}{3}}$ pour la transformation de **Concordia** dans le cas de la conservation de puissance (non conservation des amplitudes).

Les variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux sont définis dans le repère diphasé par les équations suivantes :

$$[I]_{uvo} = [P(\theta_a)][I]_{abc}$$

$$[V]_{uvo} = [P(\theta_a)][V]_{abc}$$

$$[\phi]_{uvo} = [P(\theta_a)][\phi]_{abc}$$

1-2 Modèle de la machine asynchrone alimentée en tension dans le repère lié au champ tournant (dq).

L'application de la transformation de **Park** au stator tout comme au rotor, on utilise partout l'angle $\theta_a = \theta_s$ pour le stator et $\theta_a = \theta_r$ pour le rotor.

Il se traduit par les deux conditions:

Pour les grandeurs statorique

$$\theta_a = \theta_s \Rightarrow \omega_a = \omega_s$$

Pour les grandeurs rotorique

$$\theta_a = \theta_r \Rightarrow \omega_a = \omega_r = \omega_s - \omega$$

Les équations des tensions et des flux statorique de la machine asynchrone s'expriment dans le repère (dq) par:

$$\begin{cases} V_{sd} = L_s \sigma \lambda_{sd} + L_s \sigma \frac{d}{dt} I_{sd} - \omega_s L_s \sigma I_{sq} - L_s \sigma \frac{k_s}{\tau_r} \phi_{rd} - \omega L_s \sigma k_s \phi_{rq} \\ V_{sq} = \omega_s L_s \sigma I_{sd} + L_s \sigma \lambda_{sq} + L_s \sigma \frac{d}{dt} I_{sq} + \omega L_s \sigma k_s \phi_{rd} - L_s \sigma \frac{k_s}{\tau_r} \phi_{rq} \\ \frac{d}{dt} \phi_{rd} = -\frac{1}{\tau_r} \phi_{rd} + \frac{M}{\tau_r} I_{sd} + \omega_r \phi_{rq} \\ \frac{d}{dt} \phi_{rq} = -\frac{1}{\tau_r} \phi_{rq} + \frac{M}{\tau_r} I_{sq} - \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad \text{avec } \omega_r = \omega_s - \omega$$

Travail demandé:

Pour construire le modèle de simulations schéma (blocs) de la machine asynchrone dans un repère quelconque dans l'environnement Matlab/Simulink, il faut écrit le modèle de la machine asynchrone sous forme d'état. Le choix de vecteur d'état dépend des objectifs de commande et le type d'alimentation de la machine (machine asynchrone alimentée en tension ou en courant).

La représentation d'état de la machine asynchrone est donné par :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + GU \end{cases}$$

Avec :

[X] : Vecteur d'état;

[U] : Vecteur de commande (d'entrée);

[A] : Matrice fondamental qui caractérise le système;

[B] : Matrice d'application de la commande;

[C] : Matrice de sortie. (D'observation);

[G] : Matrice de transmission directe.

Si on utilise le vecteur d'état $X^t = (I_{sd} \ I_{sq} \ \phi_{rd} \ \phi_{rq})$ et le vecteur de commande $U^T = (V_{sd} \ V_{sd})$.

- 1- Exprimer le couple de la MAS en fonction des courants statoriques et des flux rotorique lorsqu'en applique la transformation de Clarke.
- 2- Donner la représentation d'état de la machine.
- 3- Donner les deux matrices A et B.
- 4- Donner le schéma fonctionnel Simulink de la transformation de PARK dans ce cas.
- 5- Donner le schéma fonctionnel Simulink de la machine asynchrone.

1-3 Modèle de la machine asynchrone alimentée en courant dans le repère (dq).

Travail demandé:

Si on utilise le vecteur d'état $X^T = (\phi_{rd} \ \phi_{rq})$ et le vecteur de commande $I^T = (I_{sd} \ I_{sq})$.

- 1- Donner la représentation d'état de la machine.
- 2- Donner les deux matrices A et B.
- 3- Donner le schéma fonctionnel Simulink de la machine asynchrone.

1-4 Modèle dynamique de la machine asynchrone dans le repère lié au stator ($\alpha\beta$)

Ce référentiel c'est le repère naturel ou stationnaire de la machine asynchrone est obtenu en faisant coïncider l'axe u du système biphasé généralisé (uv) avec celui de la phase 'A' du stator.

C'est ce dernier choix qui permet d'étudier des variations importantes de la vitesse de rotation. Il se traduit par les deux conditions:

Pour les grandeurs statorique

$$\theta_a = \theta_s = 0 \Rightarrow \omega_a = \omega_s = 0$$

Pour les grandeurs rotorique

$$\theta_a = \theta_r = -\theta \Rightarrow \omega_a = \omega_r = -\omega$$

Les équations des tensions et des flux statorique de la machine asynchrone s'expriment dans le repère ($\alpha\beta$) par:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = R_s I_{s\beta} + \frac{d}{dt} \phi_{s\beta} \\ \frac{d}{dt} \phi_{s\alpha} = \frac{1}{L_s \sigma \tau_r} \phi_{s\alpha} + \frac{\omega}{L_s \sigma} \phi_{s\beta} - \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_s} - \frac{1}{\tau_r} \right) I_{s\alpha} - \omega I_{s\beta} + \frac{1}{L_s \tau_r} V_{s\alpha} \\ \frac{d}{dt} \phi_{s\beta} = -\frac{\omega}{L_s \sigma} \phi_{s\alpha} + \frac{1}{L_s \sigma \tau_r} \phi_{s\beta} + \omega I_{s\alpha} - \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_s} - \frac{1}{\tau_r} \right) I_{s\beta} + \frac{1}{L_s \tau_r} V_{s\beta} \end{array} \right.$$

Travail demandé:

Si on utilise le vecteur d'état $X^t = (\phi_{s\alpha} \ \phi_{s\beta} \ I_{s\alpha} \ I_{s\beta})$ et le vecteur de commande $U^T = (V_{s\alpha} \ V_{s\beta})$.

- 1- Donner la matrice de PARK dans ce cas.
- 2- Exprimer le couple de la MAS en fonction des courants statoriques et des flux statoriques lorsqu'en applique la transformation de Concordia.
- 3- Donner la représentation d'état de la machine.
- 4- Donner les deux matrices A et B.
- 5- Donner le schéma fonctionnel Simulink de la transformation de **Concordia**.
- 6- Donner le schéma fonctionnel Simulink de la machine asynchrone.

1-5 Modèle de la machine asynchrone alimentée en courant dans le repère lié au stator (α, β).

Travail demandé:

Si on utilise le vecteur d'état $X^T = (\phi_{s\alpha} \ \phi_{s\beta})$ et le vecteur de commande $I^T = (I_{s\alpha} \ I_{s\beta})$.

- 1- Donner la représentation d'état de la machine.
- 2- Donner les deux matrices A et B.
- 3- Donner le schéma fonctionnel Simulink de la machine asynchrone.

Partie 2: Commande en boucle ouverte de l'association Moteur Asynchrone- Onduleur avec pilotage MLI

Comme en dit précédemment, la variation de la vitesse des machines asynchrones se fait à l'aide d'un onduleur de tension avec pilotage MLI.

2-1 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice $[T]$ assurant le passage continu-alternatif en fonction de signaux de commande des interrupteurs et la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

Les tensions simple à la sortie de l'onduleur (à l'entrée de la MAS) sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} V_{dc}$$

Avec (S_1, S_2, S_3) , les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur.

2-2 MLI triangulo-sinusoïdale

La méthode de la MLI triangulo-sinusoïdale (En anglo-saxon : Pulse Width Modulation, PWM), consiste et d'une fréquence fixées. Ce contrôle peut être met en œuvre par un régulateur qui, à partir de l'écart entre la tension de référence et la porteuse de fréquence élevée en détermine les signaux de à comparer une onde de référence dite modulatrice avec une onde triangulaire dite porteuse d'une amplitude commande des interrupteurs comme il est indiqué sur la figure 2. La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Dans cette technique de commande, la fréquence de commutation est fixe, le réglage s'effectuant par variation de la largeur des signaux de commande.

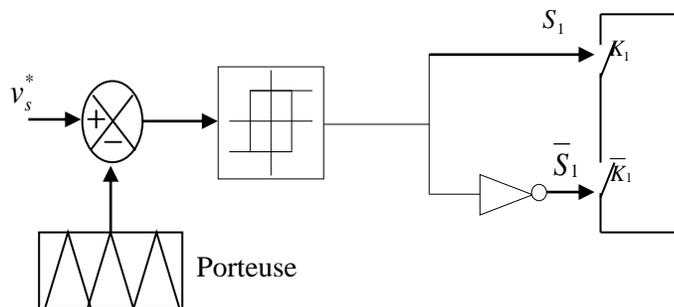


Figure 2: Schéma de principe de la commande MLI triangulo-sinusoïdale

La technique MLI triangulo-sinusoïdale consiste à obtenir après modulation une tension en sortie égale en valeur moyenne sur une période de découpage (T_d) à sa référence.

$$\langle V_s \rangle_{T_d} = v_s^*$$

Cette équation peut être satisfaite sur une période de découpage avec un signal de commande S_1 égale à 1 si la tension de référence v_s^* est supérieure à la porteuse v_p et 0 dans le cas contraire, comme indique la figure 3.

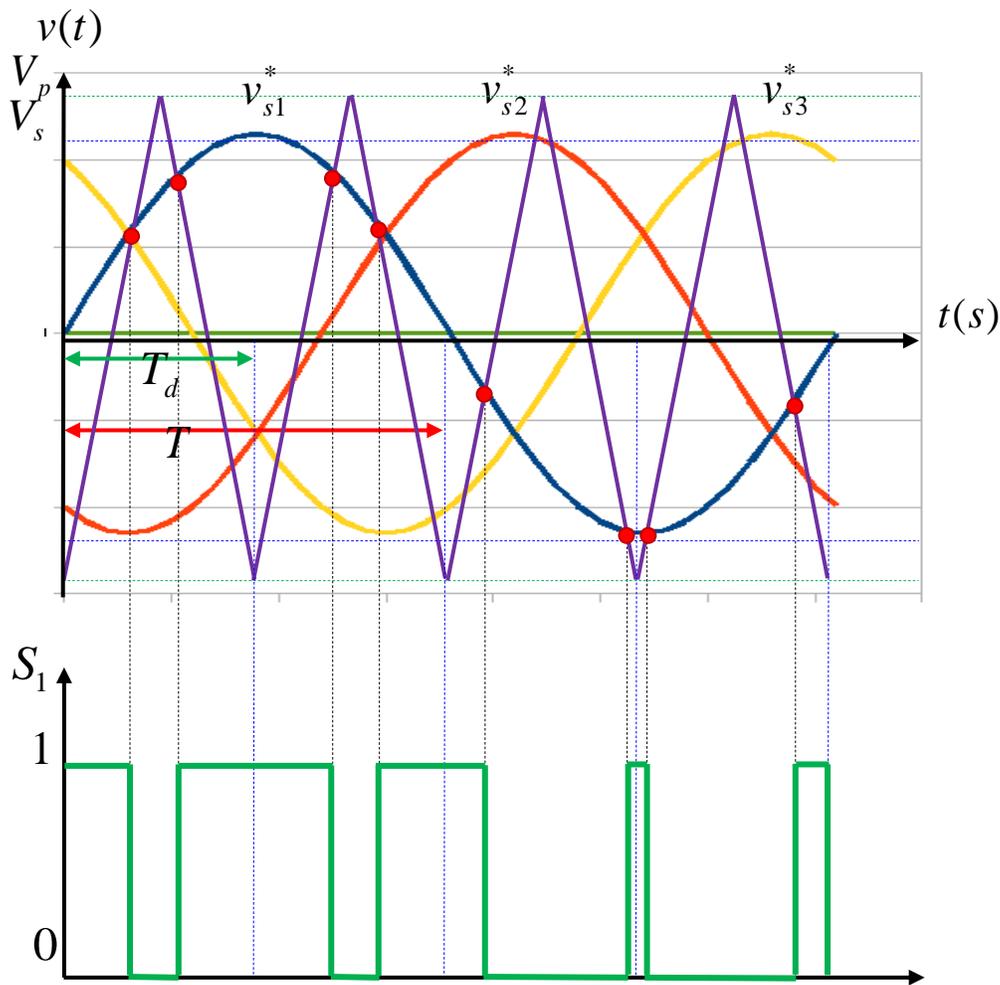


Figure 3: Signaux de références, la porteuse et l'état S_1 du premier interrupteur

2-2-1 Paramètres de la MLI triangulo-sinusoidale

Cette technique est connue par deux paramètres:

- Le coefficient de réglage en tension $r = \frac{V_s}{V_p}$:

Avec : V_s : Amplitude de la référence. V_p : Amplitude de la porteuse.

- L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation ou de découpage sur la fréquence de référence

$$m = \frac{f_p}{f}$$

- L'amplitude de la porteuse V_p est égale par approximation la moitié de la tension de source d'entrée V_{dc} .

2-2-2 Equation de la porteuse

Comme indiqué sur la figure 3, l'équation de porteuse et donnée par;

$$\begin{cases} v_p(t) = \frac{4V_p}{T_d}t + V_p & \text{lorsque } t \in \left[0, \frac{T_d}{4}\right] \\ v_p(t) = \frac{-4V_p}{T_d}t + 3V_p & \text{lorsque } t \in \left[\frac{T_d}{4}, T_d\right] \end{cases} \quad \text{ou} \quad v_p(t) = 2V_p \frac{\arcsin(\sin(2\pi f_p t - \pi/2))}{\pi}$$

Les objectifs principaux d'une **MLI** sont les suivants:

- Obtenir dans la charge électrique des courants dont la variation est proche de la sinusoïdale par le contrôle de l'évolution des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.
- Imposer à l'entrée de l'onduleur un courant de type continu avec des composantes alternatives d'amplitudes réduites et de fréquences élevées.
- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamentale des tensions de sortie généralement sur la plus grande plage possible et pour une fréquence de sortie large variable.

Travail demandé:

- 1- Donner le schéma fonctionnel Simulink de l'onduleur de tension.
- 2- Donner le schéma fonctionnel Simulink de la commande MLI de l'onduleur de tension.
- 3- Donner le schéma fonctionnel Simulink de l'association machine asynchrone-onduleur de tension avec pilotage MLI.

Partie 3 : Simulation de commande en boucle ouverte de l'association MAS-Onduleur avec pilotage MLI

Le but de cette simulation est de valider notre bloc moteur dans les deux repères (α, β et d,q) comparativement aux travaux cités en bibliographie, et aussi de présenter les évolutions des trois grandeurs (courant statorique, couple instantané et la vitesse) dans les deux cas de l'alimentation (alimentation direct par le réseau et avec onduleur à MLI).

3-1 Paramètres de la machine asynchrone

$R_s = 10\Omega, R_r = 6.3\Omega, L_s = 0.4612H, L_r = 0.4612H, M = 0.4212H, p = 2, J = 0.02Kg.m^2, f_r = 0SI, C_{em} = 5Nm$
et $P = 0.7Kw$

3-2 Paramètres de la MLI triangulo-sinusoïdale

- Le coefficient de réglage en tension $r = 0.88$;
- La fréquence de porteuse $f_p = 2000Hz$;
- Les tensions de références de la commande MLI sont donnés par:

$$\begin{cases} v_{s1}^*(t) = 220\sqrt{2} \sin(2\pi ft) \\ v_{s2}^*(t) = 220\sqrt{2} \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{s3}^*(t) = 220\sqrt{2} \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{Avec } f = 50Hz$$

3.3 Démarrage direct du moteur par le réseau.

Le moteur est alimenté directement par un réseau triphasé sinusoïdal équilibré de 220V/50Hz.

Travail demandé :

Réaliser la simulation de la MAS alimenté directement par le réseau triphasé dans les deux repères sur un temps de simulation de 4s avec pas fixe de $10^{-4}s$ et un couple résistant de 5Nm insérée à $t=2.5s$.

- 1- Visualiser et relever la vitesse et le couple du moteur asynchrone à vide et en charge.
- 2- Visualiser et relever le courant statorique lors de démarrage et en régime permanent.
- 3- Par changement de nombre de paires de pôles p de 2 vers 4
 - Visualiser et relever les trois grandeurs (courant statorique, couple instantané et la vitesse) à vide et en charge.
- 4- Par changement de la fréquence d'alimentation ($f = 25Hz, f = 50Hz$ et $f = 50Hz$).
 - Visualiser et relever les trois grandeurs (courant statorique, couple instantané et la vitesse) à vide et en charge.
- 5- Commenter les résultats et justifier les différences remarques.

3.4 Démarrage du moteur par l'onduleur (variateur de vitesse).

Le moteur est alimenté par l'onduleur de tension.

Travail demandé :

Réaliser la simulation de la MAS alimenté par l'onduleur dans les deux repères sur un temps de simulation de 4s avec pas fixe de 10^{-4} s.

1- Par changement de la valeur efficace des tensions de références ($V = 150V, 170V, 220V$).

- Visualiser les trois grandeurs (courant statorique, couple instantané et la vitesse).

2- Par changement de la fréquence des tensions de références ($f = 25Hz, 50Hz$ et $75Hz$).

- Visualiser les trois grandeurs (courant statorique, couple instantané et la vitesse).

3- Par changement de la fréquence de porteuse ($f_p = 1000Hz, 2000Hz$ et $4000Hz$).

- Visualiser les trois grandeurs (courant statorique, couple instantané et la vitesse).

- Visualiser la tension de sortie de l'onduleur v_{s1} et comparer avec la tension de référence dans les trois cas de f_p .

- Préciser les niveaux de tension de v_{s1} .

4- Commenter les résultats et justifier les différences remarquées.

5- Par changement simultané de la fréquence la valeur efficace des tensions de références (V et f).

- Réaliser au niveau de création des tensions de références de la commande MLI un mécanisme, qui permet de créer un système des tensions de références dans une valeur efficace est proportionnel avec la fréquence, de sorte que le rapport V/f est constant, et égale 6,15.

- Visualiser les trois grandeurs lorsque $f = 25Hz, 50Hz$ et $75Hz$.