

II.1 Introduction

Dans un système d'électrotechnique, un convertisseur statique représente l'articulation de la partie puissance et de la partie commande. L'élément de base de tout convertisseur statique est la cellule de commutation. Dès lors, chaque convertisseur est constitué d'une ou plusieurs cellules élémentaires de commutation formées chacune d'interrupteurs à semi conducteur.

On distingue généralement quatre grandes fonctions des convertisseurs de l'électronique de puissance:

- Conversion continue-continue → hacheur (Convertisseur à pompe de charge),
- Conversion alternative-continue → redresseurs (Alimentations à découpage),
- Conversion continue-alternative → onduleur,
- Conversion alternative-alternative → gradateurs.

II.2 Généralités sur les onduleurs

Les convertisseurs de courant continu en courant alternatif sont appelés les onduleurs. La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. La tension de sortie variable peut être obtenue en variant la tension continue d'entrée et en maintenant le gain de l'onduleur constant.

D'autre part, si la tension d'entrée est fixe et qu'elle soit non contrôlable, une tension de sortie variable peut être obtenue en variant le gain de l'onduleur. Il y a plusieurs techniques pour obtenir cette variation, la technique de modulation des largeurs d'impulsions *MLI* est la plus répandue. Elle consiste à charger la largeur des impulsions de la tension de sortie avec des commandes appropriées des interrupteurs à semi-conducteurs de l'onduleur. Le gain de l'onduleur peut être défini comme le rapport entre la tension alternative de sortie et la tension continue d'entrée [1].

La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur idéal doit être sinusoïdale. Cependant, cette forme d'onde n'est pas sinusoïdale en pratique et continue quelques harmoniques.

Ce qui veut dire qu'il existe des harmoniques de tension. Le but serait donc d'obtenir à la sortie un signal avec un taux de distorsion harmonique le plus faible possible, pour des applications de faibles et moyennes puissances. Les tensions de forme d'onde carrée ou quasi-carrée pourront être acceptables, alors que pour les applications de fortes puissances une forme d'onde sinusoïdale avec un faible taux de distorsion des harmoniques est exigée.

Avec la disponibilité des dispositifs semi-conducteurs de puissance à haute vitesse, l'harmonique contenu dans la tension de sortie peut être minimisée ou réduite significativement utilisée dans les applications industrielles, par exemple, variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, alimentations de secours, les alimentations non interrompues (*USP*) Une entrée d'un onduleur peut être une batterie, une tension continue issue des panneaux monophasé et triphasé.

De façon générale, les onduleurs peuvent être classifiés en deux types: les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés, chaque groupe peut utiliser les dispositifs de commande comme: *BJT*, *MOSFET*, *GTO* ou commande forcée des thyristors en fonction des applications.

Généralement, ces onduleurs utilisent la commande à *MLI* pour produire une tension de sortie alternative. Un onduleur est appelé "*current-fed inverter*", (*CFI*) s'il est alimenté par une source de courant. [1]

II.3 Définition de l'onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (**DC**) à la forme alternative (**AC**). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. **Figure II.1** représente un schéma de principe de l'onduleur.

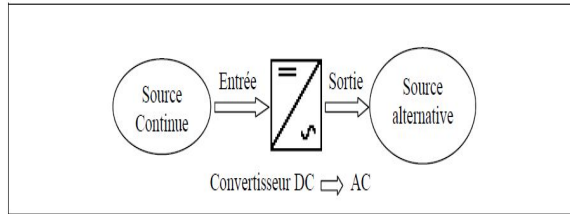


Figure II.1: Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).

II.4 Définition du l'onduleur triphasé

L'onduleur triphasé est plus important et plus utilisé que celui en monophasé, sa principale application est l'alimentation des moteurs triphasés à fréquence variable, donc il faut que la tension alternative soit pratiquement proportionnelle à la fréquence.

Un onduleur triphasé à deux niveaux peut être considéré comme étant une structure constituée de trois onduleurs monophasés en demi-pont déphasés entre eux de $120^\circ C$

L'alimentation est assurée par une source de tension continue ou une capacité dont on contrôle la tension (figure II.2). Montre le schéma d'un onduleur triphasé.

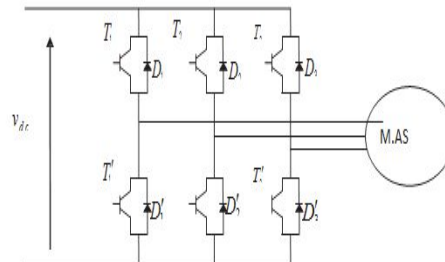


Figure II.2. L'onduleur en montage en pont triphasé.

L'onduleur de tension est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension. Un bras de l'onduleur est représenté par la figure (II.3).

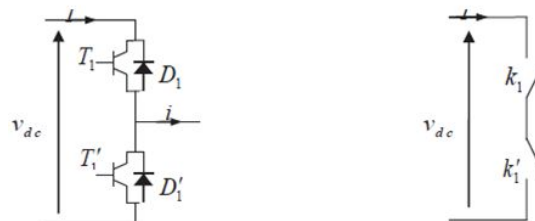


Figure II.3. Schéma d'un bras de l'onduleur.

Le schéma équivalent de l'onduleur est représenté par la figure (II.4).

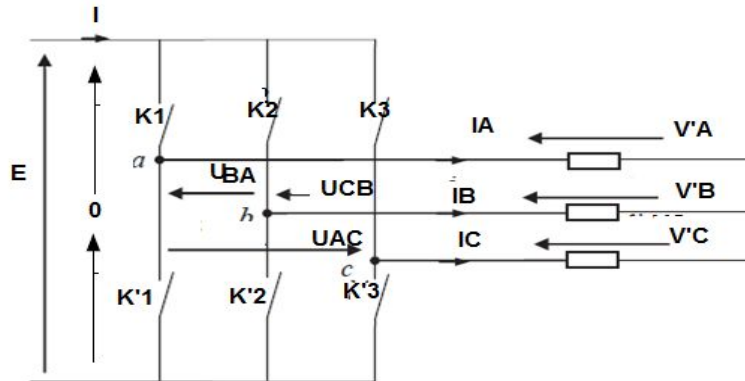


Figure II.4. Schéma équivalent de l'onduleur.

Les formules des tensions

En résumé, les tensions fournies par les demi-ponts sont:

- $V_A - V_0 = E/2$, quand K_1 est fermé.
- $V_A - V_0 = E/2$, quand K_1 est fermé.
- $V_B - V_0 = E/2$, quand K_2 est fermé.
- $V_B - V_0 = E/2$, quand K_2 est fermé.
- $V_C - V_0 = E/2$, quand K_3 est fermé.
- $V_C - V_0 = E/2$, quand K_3 est fermé.

Par la suite, les tensions composées entre les bornes de sortie peuvent être déduites facilement:

$$\begin{cases} U_{BA} = (V_a - V_0) - (V_b - V_0) \\ U_{CB} = (V_b - V_0) - (V_c - V_0) \\ U_{AC} = (V_c - V_0) - (V_a - V_0) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

On peut écrire encore:

$$\begin{cases} (V_A - V_0) = \frac{E}{2} * h_1 \\ (V_B - V_0) = \frac{E}{2} * h_2 \\ (V_C - V_0) = \frac{E}{2} * h_3 \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$h_K = \{1 \text{ ou } -1\}, K = 1, 2, 3.$$

D'après (II.1) (II.2)

$$\begin{cases} U_{BA} = \frac{E}{2} * (h_1 - h_2) \\ U_{BC} = \frac{E}{2} * (h_2 - h_3) \\ U_{AC} = (h_3 - h_1) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

D'autre part :

$$\begin{aligned} U_{BA} &= V'_A - V'_B \\ U_{CB} &= V'_B - V'_C \\ U_{AC} &= V'_C - V'_A \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{cases} V'_A - V'_B = \frac{E}{2} * (h_1 - h_2) \\ V'_B - V'_C = \frac{E}{2} * (h_2 - h_3) \\ V'_C - V'_A = \frac{E}{2} * (h_3 - h_1) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Puisqu' on a :

$$V'_A - V'_B - V'_C = 0$$

Donc en peut écrire :

$$\begin{aligned} V'_A - V'_B + V'_A + V'_B + V'_C &= \frac{E}{2} * (h_1 - h_2) \\ 2 * V'_A + V'_C &= \frac{E}{2} * (h_1 - h_2) \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

De(II.5) et(II.4) :

$$\begin{aligned} \rightarrow 2 * V'_A + V'_C + V'_A - V'_C &= \frac{E}{2} (h_1 - h_2) - (h_3 - h_1) \\ \rightarrow 3 * V'_A &= \frac{E}{2} (2 * h_1 - h_2 - h_3) \\ \rightarrow V'_A &= \frac{E}{6} (2 * h_1 - h_2 - h_3) \end{aligned} \quad \text{On a :} \quad (\text{II.6})$$

$$h_k = \{1 \text{ ou } -1\}, 1 : K1 \text{ fermé}, -1 : K1 \text{ ouvert, avec } K = 1, 2, 3$$

$$\rightarrow h_k + 1 = \{2 \text{ ou } 0\}$$

$$\rightarrow \frac{(h_k + 1)}{2} = \{1 \text{ ou } 0\}$$

On pose :

$$C_k = \frac{(h_k + 1)}{2} \rightarrow h_k = 2 * C_k - 1 \quad (\text{II.7})$$

De (II.6) et (II.7) :

$$V'_A = \frac{E}{6} (2 * (2 * C_1) - 2 * C_2 + 1 - 2 * C_3 + 1)$$

$$\rightarrow V'_A = \frac{E}{3} (2 * C_1 - C_2 - C_3)$$

De même manière on détermine V'_B et V'_C Donc :

$$\begin{bmatrix} V'_A \\ V'_B \\ V'_C \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}$$

$$C_k = (1 : K1 \text{ fermé}, 0 : K1 \text{ ouvert, avec } k=1, 2, 3)$$

On utilise cette équation dans les programmes de simulation pour tracer les allures des tensions.

II.5 Stratégies de commande

La fermeture et l'ouverture des interrupteurs appliquées dans un sens puis dans un autre a pour conséquence de découper la tension continue d'entrée, de façon à obtenir une tension de sortie de forme créneaux, et l'allier de courant alternatif.

Cette dernière permet d'utiliser plusieurs types de commandes à savoir:

- La commande symétrique (pleine onde),
- La commande à modulation de largeurs d'impulsions (**MLI**).

II.5.1 Commande pleine onde

Chaque interrupteur est fermé pendant une moitié de la période. La figure qui suit montre l'allure du courant et de la tension.

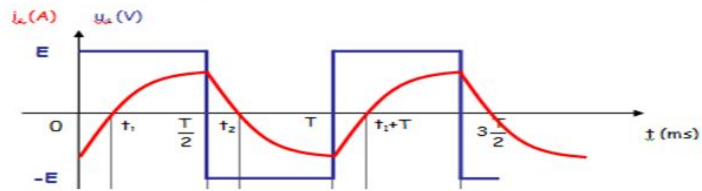


Figure II.5. Allure des courants et tension.

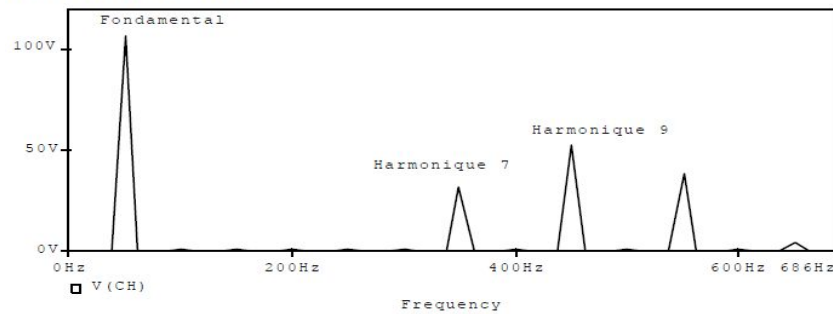


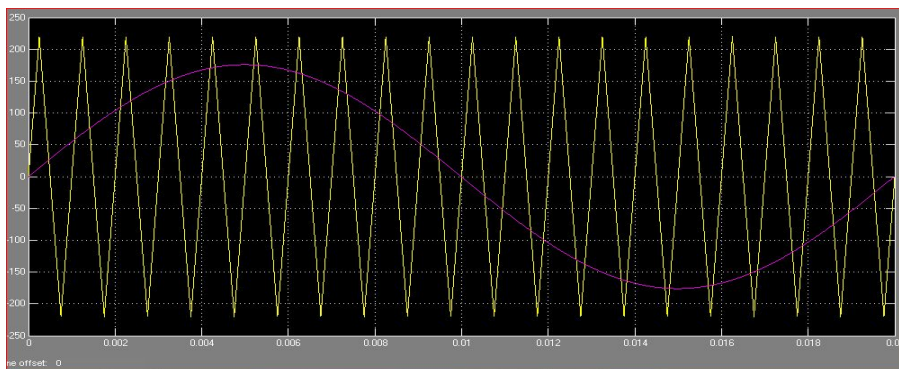
Figure II.6. Spectre de la tension de sortie.

Cette stratégie de commande est la plus simple à mettre en œuvre. Par contre, la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse. Le filtrage est difficile [2]. C'est pour cela que les spécialistes du domaine recherchent une autre technique de commande ayant pour objectif de minimiser les harmoniques. La stratégie de pilotage appelée *MLI* permet d'atteindre cet objectif, mais il existe plusieurs techniques pour la réaliser. Dans ce rapport, on adopte la stratégie de commande *MLI* sinus-triangulaire.

II.5.2. La commande *MLI* sinus-triangle

La modulation en largeur d'impulsions (*MLI*) est la technique de pilotage pour les convertisseurs statiques servant d'interface entre une charge (machine électrique, ...) et son dispositif d'alimentation (onduleur triphasé, onduleur monophasé...).

Pour déterminer les instants de fermeture des interrupteurs, on trace les trois ondes de références représentant les trois tensions désirées. Les intersections avec l'onde de modulation triangulaire donnent les instants de fermeture des divers interrupteurs [3].

Figure II.7 : Les formes d'ondes de la technique *MLI* sinus-triangle

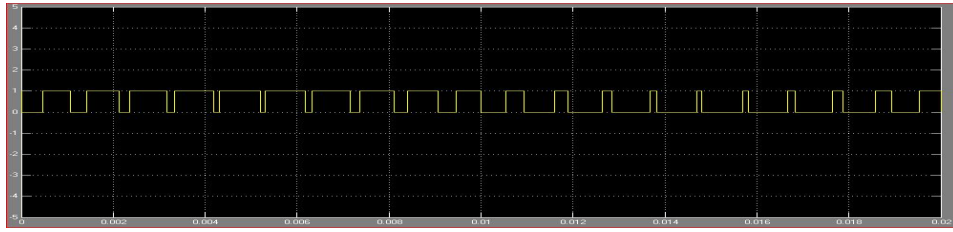


Figure. II.8 : triangle signal de la commande MLI sinus-triangle.

II.6 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion(MLI)

Les paramètres essentiels de la **MLI** sont:

La fréquence de la modulation f_p :

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

Où f_r est la fréquence de la référence.

$$r = \frac{A_r}{A_p}$$

Avec:

A_r : Amplitude de la référence.

A_p : Amplitude de la porteuse.

m : l'indice de modulation

r : le coefficient de réglage en tension.

La modulation montre que plus " m " est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de r la plus élevée possible [4].

La modulation est dite synchrone si " m " est un nombre entier cela conduit à une tension de sortie " U " qui se reproduit identiquement à elle-même tout les $T=1/f$.

Dans certains cas, la modulation est asynchrone, notamment quand à fréquence de Modulation f donnée, on fait varier de façon continue la fréquence de la référence.

pour le choix de " m ", on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente [4]. On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal à 1, car il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras.

II.7 Etude des harmoniques pour la commande à MLI

II.7.1 Déformation d'un signal sinusoïdal

Considérons un signal sinusoïdal $y(t)$ tel que:

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - Q_n)$$

Ou:

Y_0 : est la valeur de la composante continue généralement nulle. Dans l'équation précédente :

Y_n : est la valeur efficace de l'harmonique de rang n

ω : est la pulsation de la fréquence fondamentale [5].

Q_n : est le déphasage de la composante harmonique à $t=0$.

II.7.2 Mode de représentation : le spectre en fréquence

Le spectre est un histogramme fournissant l'amplitude de chaque harmonique en fonction de son rang et son importance [6].

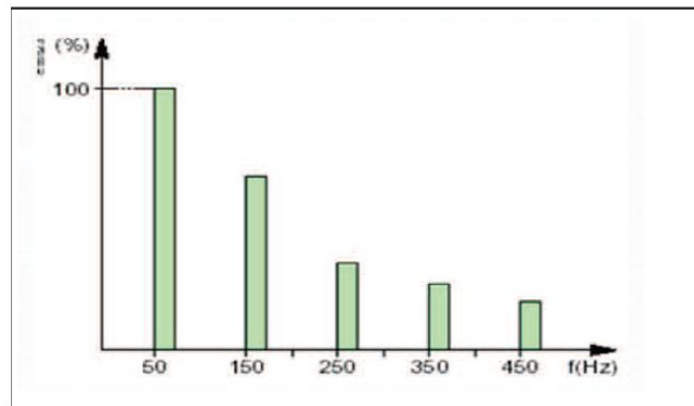


Figure II.9. Spectre de l'harmonique.

II.8. Paramètres de performance de l'onduleur

La qualité de l'énergie fournit par un onduleur est évaluée suivant les paramètres performance suivant:

II.9 Facteur de la n^{ième} harmonique:

- C'est la mesure de la contribution individuelle des harmoniques définit comme suit :

$$HF_n = \frac{V_{effn}}{V_{eff1}}$$

V_{effn} : valeur efficace de la Nième harmonique.

V_{eff1} : Valeur efficace de la fondamentale.

II.10. Distorsion d'harmonique total *THD* et le facteur *DF*

Le taux de distorsion, encore appelé distorsion harmonique totale est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composant fondamentale.

$$THD = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{F_1}$$

Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension.

II.11. Facteur de distorsion, ou DF

Ce facteur, inférieur à 100%, est défini par le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur du signal total.

$$DF = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{\sqrt{F_1 + H_2^2 + H_3^2 + \dots}}$$

II .12. le *THD* en tension caractérise la déformation de l'onde de tension

Une valeur de THD inférieure à 5% considérée comme normale. Aucun disfonctionnement n'est à craindre. Une valeur de THD comprise entre 5 et 8% révèle une pollution harmonique significative.

Quelques disfonctionnement sont possibles.

Une valeur de *THD* supérieure à 8% révèle une pollution harmonique importante.

Des disfonctionnement sont probables [7].

II.13. Conclusion

D'après les informations citées dans ce chapitre, nous donnons la définition précisée deux type d'onduleur qui nous utilisons dans notre application, donc l'onduleur de tension en pont complet à quatre interrupteurs qui génère à sa sortie une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglable à partir d'une source de tension continue.

L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances.