

I.1 Introduction

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source d'énergie alternative à partir d'une source de tension continue [1].

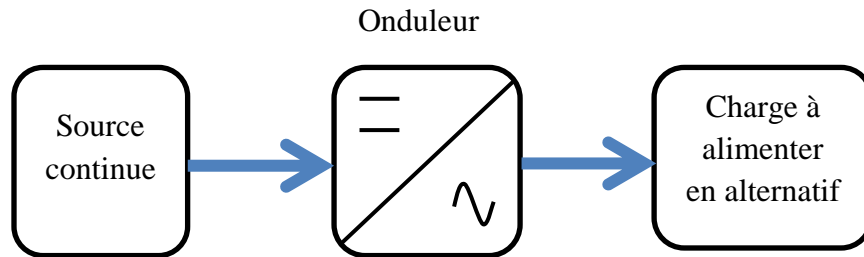


Fig (I.1) Schéma bloc de la conversion continu-alternatif: onduleur

Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs, il est donc possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par modulation de largeur d'impulsion[5].

Le domaine de la conversion statique n'a cessé de proposer des évolutions, non seulement au niveau des composants mais aussi sur la manière de les associer. L'association des composants de puissance a suscité un grand intérêt de la communauté scientifique faisant apparaître les onduleurs multi-niveaux[1].

Deux motivations principales sont à l'origine des onduleurs multi-niveaux, à savoir d'une part l'augmentation de la puissance par le biais de la génération de tensions plus élevées, au-delà de celles compatibles avec les tensions de blocage des composants de puissance. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant un meilleur contenu harmonique.

Les onduleurs multi-niveaux, de plus en plus utilisés dans les applications d'entraînement à vitesse variable, s'avèrent très utiles pour la commande des machines électriques. En effet, l'amélioration en termes de contenu harmonique des tensions de sortie de l'onduleur améliore considérablement les performances de la machine. En outre, les formes d'onde en échelon des onduleurs multi-niveaux vont réduire d'une façon notable la contrainte liée à la très haute rapidité de montée des impulsions de tension appliquées à la machine, ce qui augmente la sûreté de fonctionnement et réduit les radiations électromagnétiques.

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes généralités sur les onduleurs ensuite la modélisation de l'onduleur triphasé cascadié de tension à sept niveaux.

I.2 Classification

Les montages onduleurs sont très nombreux en fonction de leurs applications, de leurs structures et de leurs commandes.

Nous pouvons classer les onduleurs suivant :

I.2.1 Le nombre de phases de la charge: nous distinguerons

- ✓ Les onduleurs monophasés
- ✓ Les onduleurs triphasés.

I.2.2 La nature de la source

❖ **l'onduleur de tension** : alimenté par un générateur de tension continu, il impose par sa commande la tension $u(t)$; la charge impose alors l'intensité $i(t)$.

❖ **l'onduleur de courant** : alimenté par un générateur de courant continu, il impose par sa commande le courant $i(t)$; la charge impose la tension $u(t)$.

Le besoin de l'industrie en équipement de puissance de plus en plus élevé donne naissance aux onduleurs multi niveaux.

I.3 les onduleurs de tension multi-niveaux

L'onduleur de tension multi niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. En général, les onduleurs de tension multi niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets.

Une nouvelle famille d'onduleurs multi niveaux est proposée comme solution pour les applications de haute tension [6], Les structures proposées et grâce aux performances remarquables des semi-conducteurs, permettent d'offrir une tension de sortie de meilleure qualité

Les principaux avantages de cette approche sont récapitulés comme suit [6]:

La tension des dispositifs existants peut être augmentée plusieurs fois sans complications au niveau des tensions statique et dynamique (connues dans les interrupteurs connectés en série).

- ❖ les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi niveaux sont supérieures à celles d'un onduleur à deux niveaux.
- ❖ Les formes d'onde des grandeurs de sorties d'un onduleur multi niveaux limitent naturellement les problèmes des surtensions dues aux réflexions sur les câbles, qui peuvent endommager les enroulements du moteur.

Puisque le choix de la meilleure topologie d'onduleurs multi niveaux, pour chaque application donnée, n'est pas souvent clair, ces derniers font sans cesse l'objet de nombreuses publications [6,7]. La figure (I.2) représente les topologies des onduleurs multi niveaux les plus récentes [5], a été envisagé à savoir :

- ✓ à structure NPC (Neutral Point Clamped).
- ✓ à cellules imbriquées (capacités flottantes).
- ✓ à diodes flottantes (diode clamping).
- ✓ A cellules en cascade (en H).

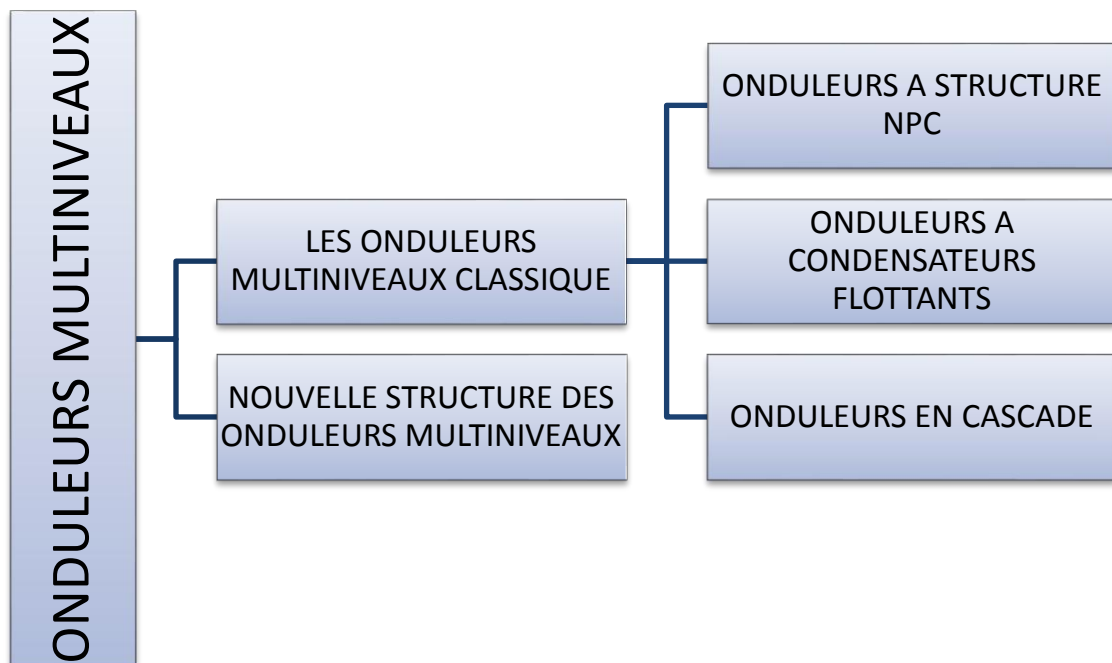


Fig (I.2) Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux.

I.3.1 Les onduleurs multi niveaux classiques

L'objectif de cette partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multi niveaux à savoir la topologie à structure NPC, la topologie à condensateurs flottant et la topologie en cascade, on va prendre ci-dessous par exemple le cas de trois niveaux[5].

I.3.1.1 Onduleur de tension à structure NPC

La première topologie la plus pratique pour un onduleur de tension multi niveaux est le NPC. Elle a été proposée, la première fois en 1981, par Nabae [8]. Figure (I.3). Cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux et aussi elle exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capables de supporter le courant de pleine charge.

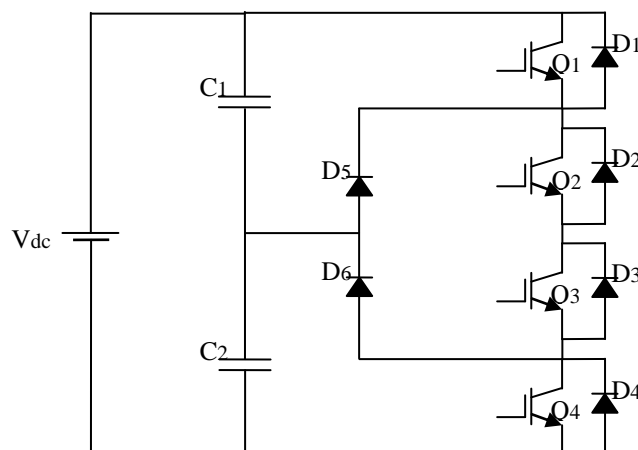


Fig (I.3) Onduleurs de structure NPC à trois niveaux.

I.3.1.2 Onduleur de tension à condensateurs flottants

La topologie de l'onduleur multi niveaux à condensateurs flottants, donnée par la figure (I.4), a été proposée en 1992 [9]. Elle est considérée comme l'alternative la plus sérieuse à la topologie de l'onduleur NPC. L'avantage de cette topologie est l'élimination du problème des diodes de bouclages qui se présentent dans les topologies des onduleurs NPC multi niveaux. En plus, cette topologie limite naturellement les contraintes en tension imposées aux composants de puissance et introduit des états de commutation additionnelles qui peuvent être utilisés pour aider à maintenir l'équilibre des charges dans les condensateurs. La topologie de l'onduleur à condensateurs flottants a assez d'états de

commutation pour contrôler l'équilibre des charges dans chaque bras d'onduleur ayant n'importe quel nombre de niveaux, ce qui n'est pas le cas dans l'onduleur NPC.

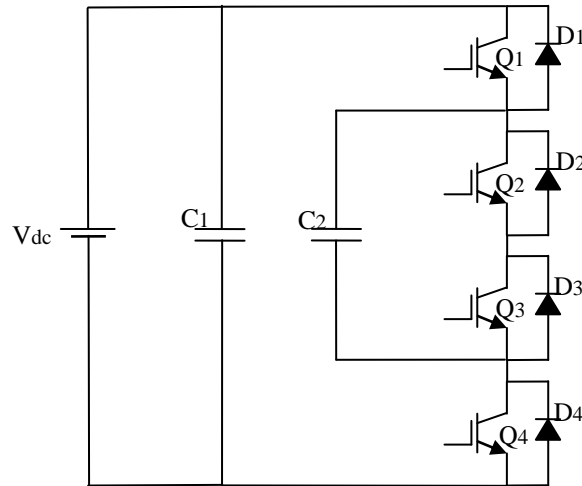


Fig (I.4) Onduleurs à condensateurs flottants à trois niveaux.

La topologie de l'onduleur multi niveaux à condensateurs flottants peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC. De plus, il est évident que des courants de grandes valeurs efficaces circulent à travers de ces condensateurs.

I.3.1.3 Onduleur de tension en cascade

La topologie de l'onduleur multi niveaux en cascade est donnée par la figure (I.5). Le concept de base de l'onduleur en cascade a existé pendant plus de deux décennies. Cependant, il n'était pas entièrement réalisé jusqu'à ce que les deux chercheurs, Lai et Peng présentent ses divers avantages sous forme d'un brevet d'invention en 1997 [10]. Depuis, l'onduleur en cascade a été utilisé dans de nombreuses applications.

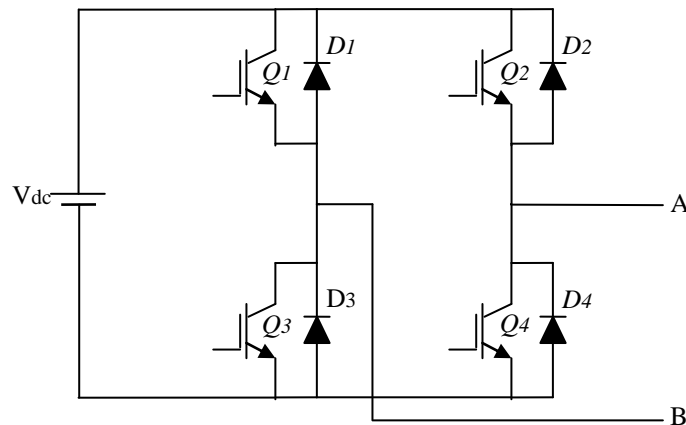


Fig (I.5) Onduleur en cascade à 3 niveaux.

En 1998 [10], Gec Alsthom a proposé d'employer la topologie d'onduleur en cascade comme convertisseur de puissance principal, vue la supériorité de ce type d'onduleurs dans les applications de grandes puissances.

I.3.2 Nouvelle structure d'onduleurs multi niveaux

La fonction principale de la nouvelle structure d'onduleur multi niveaux (Multi-level-inverter new family) est de réduire le nombre de dispositifs de commutation utilisés sans changer la nature d'escalier de la tension de sortie [11].

Par conséquent, il devrait avoir le même nombre des alimentations DC comme un onduleur multi niveaux en cascade pour le même nombre de niveaux de la tension de sortie.

La nouvelle structure de l'onduleur multi niveau envisagé a été prise d'un récent travail daté en 2007 et il a été publié en Science Direct [11]. Cette dernière présente quelques anomalies qui nous a permet de faire des modifications et cela dans un but d'amélioration.

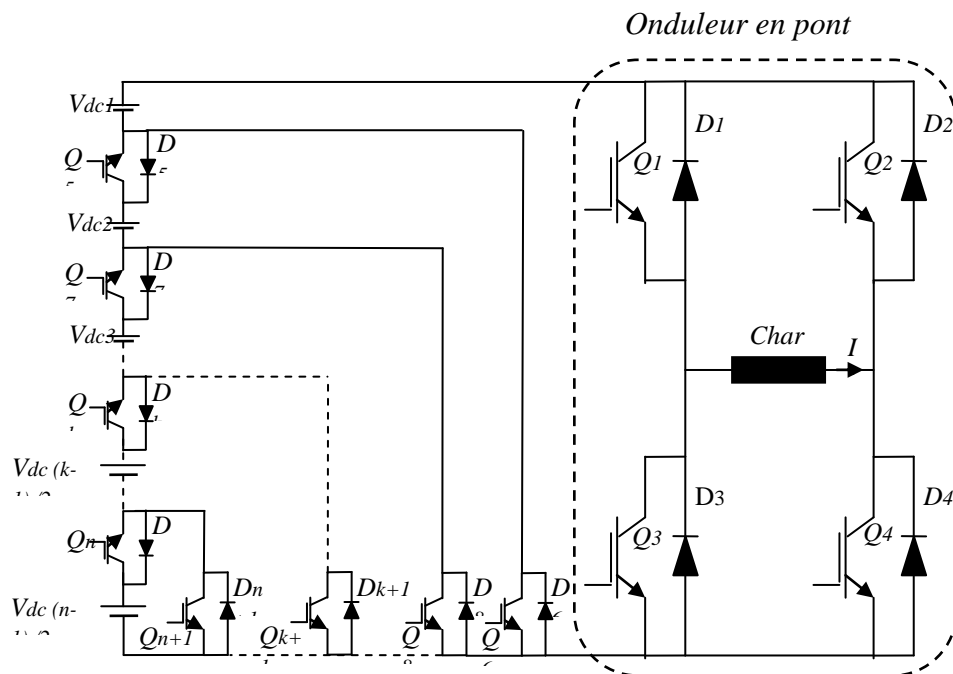


Fig (I.6) Modèle général proposé d'un onduleur multi niveau

I.4. Modélisation de l'onduleur triphasé cascadié à sept niveaux

I.4.1. Structure de l'onduleur triphasé cascadié à sept niveaux

La figure (I.7) représente la structure de l'onduleur triphasé cascadié à sept niveaux. Le bras d'un tel onduleur comprend Huit transistors avec leurs diodes antiparallèles. Chaque transistor est dimensionné de façon à bloquer la tension aux bornes d'une des sources du côté continu. Cette caractéristique permet d'augmenter la tenue en tension de l'onduleur.

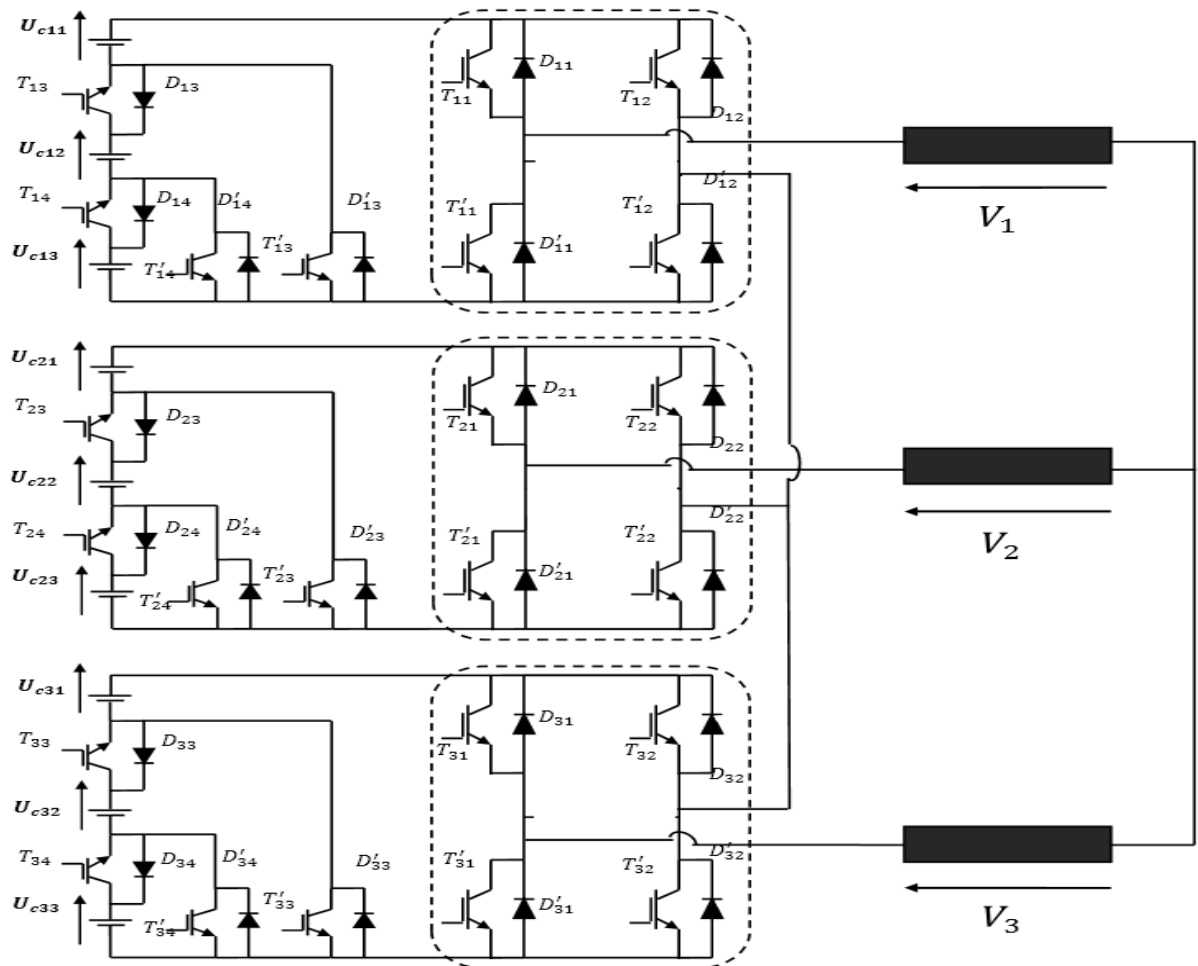


Fig (I.7) Structure de l'onduleur triphasé cascadié à sept niveaux

1.4.2. Modélisation aux valeurs instantanées de l'onduleur triphasé cascadié à sept niveaux

La modélisation permet d'étudier l'évolution des différentes grandeurs régissant le fonctionnement de l'onduleur triphasé cascadié à sept niveaux tout en considérant les commutations des interrupteurs.

1.4.2.1. Hypothèses

Afin de simplifier l'étude, les hypothèses retenues pour la mise en équations sont les suivantes :

- chaque paire transistor-diode est représentée par un interrupteur bidirectionnel.
- les interrupteurs sont idéalisés (tension de saturation, courant de fuite et temps de commutation sont supposés nuls).
- les interrupteurs étant parfaits, les temps morts sont supposés nuls.
- les sources de tension sont supposées parfaites.
- les transitions entre les configurations ne dépendent que des commandes des transistors.

1.4.2.2 Commande complémentaire

Afin d'éviter de laisser la source de courant en circuit ouvert (ouverture de tous les interrupteurs) ou de connecter deux points de potentiels différents (fermeture de tous les interrupteurs), une commande complémentaire doit être adoptée. Si K_{bi} représente la fonction de connexion de l'interrupteur T_{bi} , définie par $K_{bi} = 1$ lorsque cet interrupteur est fermé et $K_{bi} = 0$ lorsqu'il est ouvert, la commande complémentaire retenue est caractérisée par une relation liant les fonctions de connexion des interrupteurs d'un bras k comme suit :

$$K'_{bi} = 1 - K_{bi}, \quad i = 1, \dots, 4, \quad b = 1, 2, 3 \quad (\text{I.1})$$

Le tableau 1.1 donne les états possibles d'un bras k tout en tenant compte de la commande complémentaire choisie. L'état 1 signifie que l'interrupteur correspondant est fermé et l'état 0 qu'il est ouvert. Ce tableau montre que cette commande complémentaire permet d'exploiter les sept niveaux de tension de sortie possibles pour un bras de l'onduleur.

K_{b1}	K_{b2}	K_{b3}	K_{b4}	K'_{b4}	K'_{b3}	K'_{b2}	K'_{b1}	V_{AM}
1	0	1	1	0	0	1	0	$U_{c1} + U_{c2} + U_{c3}$
1	0	1	0	1	0	1	0	$U_{c1} + U_{c2}$
1	0	0	0	1	1	1	0	U_{c1}
0	0	0	0	1	1	1	1	0

0	1	0	0	1	1	0	1	$-U_{c1}$
0	1	1	0	1	0	0	1	$-U_{c1} - U_{c2}$
0	1	1	1	0	0	0	1	$-U_{c1} - U_{c2} - U_{c3}$

Tableau (1.1) Etats de l'onduleur à sept niveaux et sa tension de sortie par rapport au point milieu M

1.4.3. Différentes configurations d'un bras de l'onduleur triphasé cascadié à sept niveaux

La topologie de l'onduleur triphasé cascadié à sept niveaux fournit à la sortie de chacune de ses phases une tension entre deux points A et M , possédant sept niveaux différents. Le nombre de niveaux de tension d'un onduleur représente le nombre de potentiels différents de l'étage continu qu'il est possible d'imposer à la tension de sortie. Cependant, il est à noter que chaque niveau de tension n'est obtenu que par l'intermédiaire d'une unique configuration de cet onduleur. la tension de sortie V_{bAM} donnée par le tableau (3.2) est une tension à sept niveaux.

Configuration	Tension V_{bAM}
E_1	$U_{cb1} + U_{cb2} + U_{cb3}$
E_2	$U_{cb1} + U_{cb2}$
E_3	U_{cb1}
E_4	0
E_5	$-U_{cb1}$
E_6	$-U_{cb1} - U_{cb2}$
E_7	$-U_{cb1} - U_{cb2} - U_{cb3}$

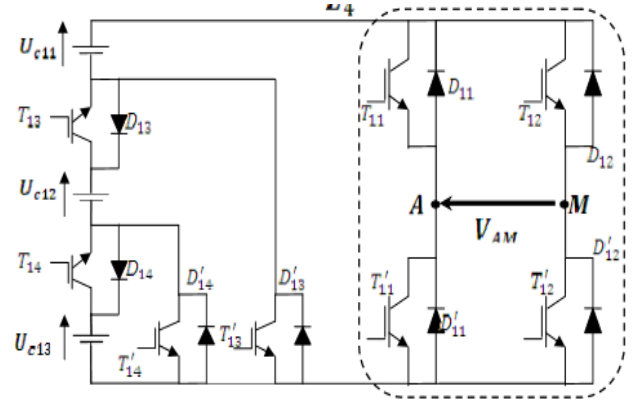
Tableau (I.2) Tension V_{bAM} relative à chaque configuration

Les configurations possibles en conduction continue sont illustrées dans les figures suivant, on distingue sept niveaux de tension. Il les sont obtenues comme suite:

➤ Niveau 1:

$K'_{b1}, K'_{b2}, K'_{b3}, K'_{b4}$ sont passants et $K_{b1}, K_{b2}, K_{b3}, K_{b4}$ sont bloqués. OU $K_{b1}, K_{b2}, K'_{b3}, K'_{b4}$ sont passants et $K'_{b1}, K'_{b2}, K'_{b3}, K'_{b4}$ sont bloqués

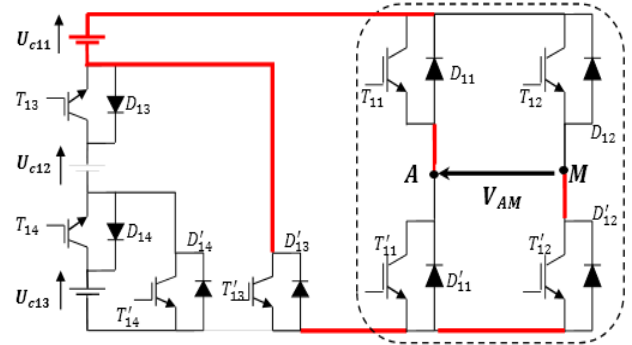
La tension de sortie devient, $V_{AM} = 0$



➤ Niveau 2:

$K_{b1}, K'_{b2}, K'_{b3}, K'_{b4}$ sont passants et $K'_{b1}, K_{b2}, K_{b3}, K_{b4}$ sont bloqués.

La tension de sortie devient, $V_{AM} = U_{c1}$

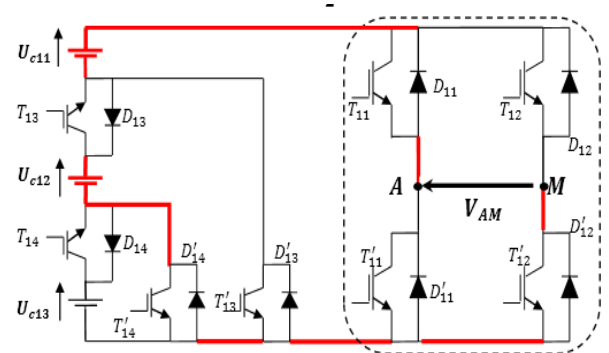


➤ Niveau 3:

$K_{b1}, K'_{b2}, K_{b3}, K'_{b4}$ sont passants et $K'_{b1}, K_{b2}, K'_{b3}, K_{b4}$ sont bloqués.

La tension de sortie devient,

$$V_{AM} = U_{c1} + U_{c2}$$

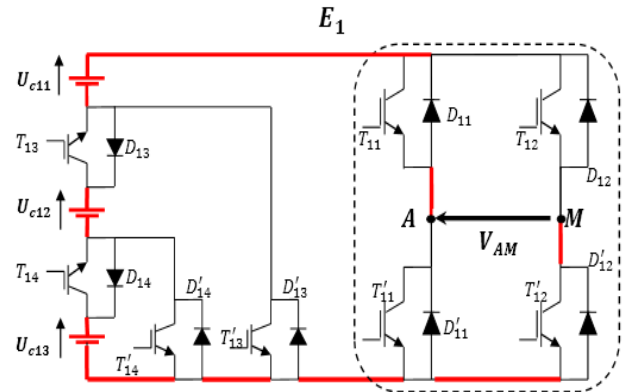


➤ Niveau 4

$K_{b1}, K'_{b2}, K_{b3}, K_{b4}$ sont passants et $K'_{b1}, K_{b2}, K'_{b3}, K'_{b4}$ sont bloqués.

La tension de sortie devient,

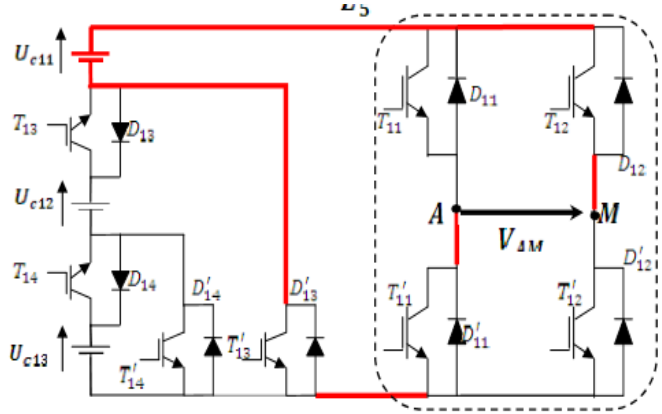
$$V_{AM} = U_{c1} + U_{c2} + U_{c3}$$



➤ Niveau 5

$K'_{b1}, K_{b2}, K'_{b3}, K'_{b4}$ sont passants et
 $K_{b1}, K'_{b2}, K_{b3}, K_{b4}$ sont bloqués.

La tension de sortie devient,
 $V_{AM} = -U_{c1}$



➤ Niveau 6:

$K'_{b1}, K_{b2}, K_{b3}, K'_{b4}$ sont passants
 et $K_{b1}, K'_{b2}, K'_{b3}, K_{b4}$ sont
 bloqués.

La tension de sortie devient,

$$V_{AM} = -U_{c1} - U_{c2}$$

➤ Niveau 7 :

$K'_{b1}, K_{b2}, K_{b3}, K_{b4}$ sont passants et
 $K_{b1}, K'_{b2}, K'_{b3}, K'_{b4}$ sont bloqués.

La tension de sortie devient,

$$V_{AM} = -U_{c1} - U_{c2} - U_c$$

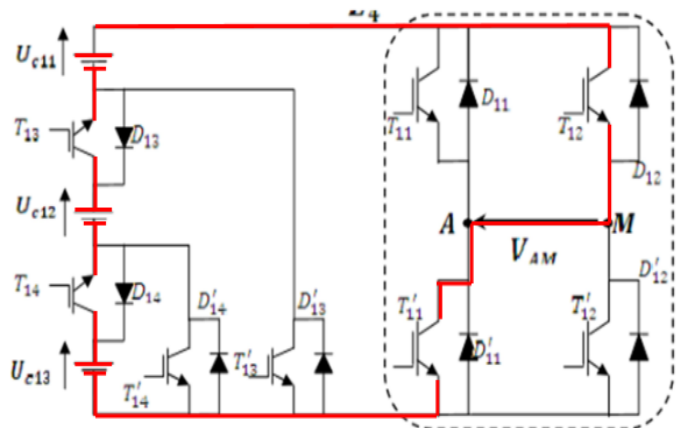
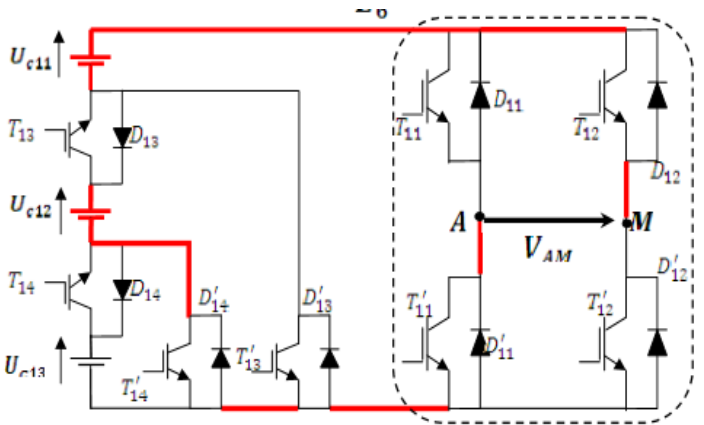


Fig (1.8) Configurations possibles d'un bras de l'onduleur triphasé cascadié à

I.4.4 Mise en équations

Admettons que l'onduleur est associé à une charge triphasée équilibrée et connectée en étoile. Le point neutre de la charge est supposé non connecter.

On veut trouver la relation entre les tensions simples v_{an} , v_{bn} et v_{cn} aux bornes de la charge en fonction des tensions simples de chaque cellule (tension monophasé) v_a , v_b et v_c

- Les tensions simples d'une seule cellule

$$\begin{cases} v_a = v_{a0} = (v_a - v_0) \\ v_b = v_{b0} = (v_b - v_0) \\ v_c = v_{c0} = (v_c - v_0) \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

- Les tensions composées :

$$\begin{cases} v_{ab} = (v_a - v_b) \\ v_{bc} = (v_b - v_c) \\ v_{ca} = (v_c - v_a) \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

- En remplaçant la relation (I.2) dans (I.3), il vient

$$\begin{cases} v_{ab} = (v_a - v_0) - (v_b - v_0) \\ v_{bc} = (v_b - v_0) - (v_c - v_0) \\ v_{ca} = (v_c - v_0) - (v_a - v_0) \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

- Les tensions simples aux bornes de la charge :

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}(v_{ab} - v_{ca}) \\ v_{bn} = \frac{1}{3}(v_{bc} - v_{ab}) \\ v_{cn} = \frac{1}{3}(v_{ca} - v_{bc}) \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

- En remplaçant la relation (I.4) dans (I.5), il vient

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}((v_a - v_0) - (v_c - v_0)) - ((v_c - v_0) - (v_a - v_0)) \\ v_{bn} = \frac{1}{3}((v_b - v_0) - (v_c - v_0)) - ((v_a - v_0) - (v_b - v_0)) \\ v_{cn} = \frac{1}{3}((v_c - v_0) - (v_a - v_0)) - ((v_b - v_0) - (v_c - v_0)) \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

- En remplace la relation (I.2) dans (I.6), il vient

$$\begin{cases} v_{an} = +\frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \\ v_{bn} = -\frac{1}{3}v_{ao} + \frac{2}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \\ v_{cn} = -\frac{1}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} + \frac{2}{3}v_{co} \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

- La forme matricielle de l'onduleur triphasé

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{pmatrix} \quad (I.8)$$

I.5 Stratégie de commande de l'onduleur

La qualité de la tension de sortie d'un onduleur dépend fortement de la technique de commande utilisée. De nombreuses stratégies de commande ont été proposées pour les onduleurs à niveaux multiples et la technique de stratégie d'élimination d'harmoniques est l'une des techniques les plus répandues.

I.5.1 Commande de l'onduleur à sept niveaux

La figure (I.9) représente la tension V_{AM} du premier bras et les signaux de commande des interrupteurs de ce bras et la figure (I.10) représente la tension simple de la première phase.

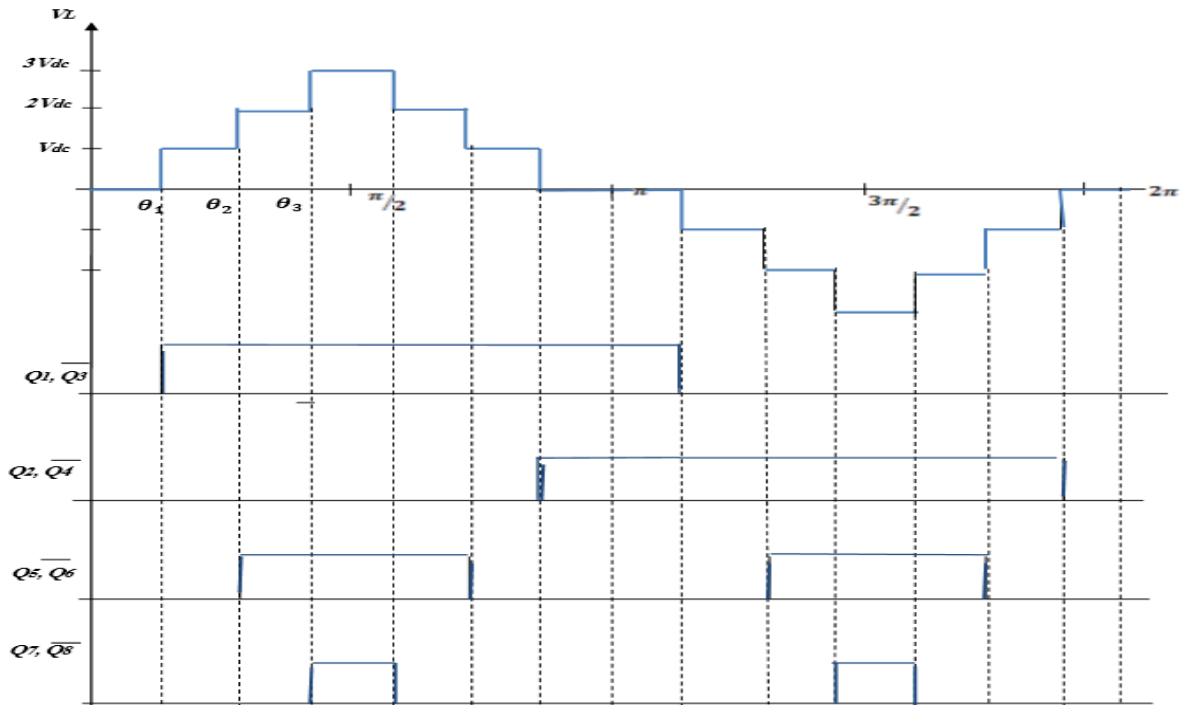


Fig (I.9) la tension V_{AM} du premier bras et les signaux de commande

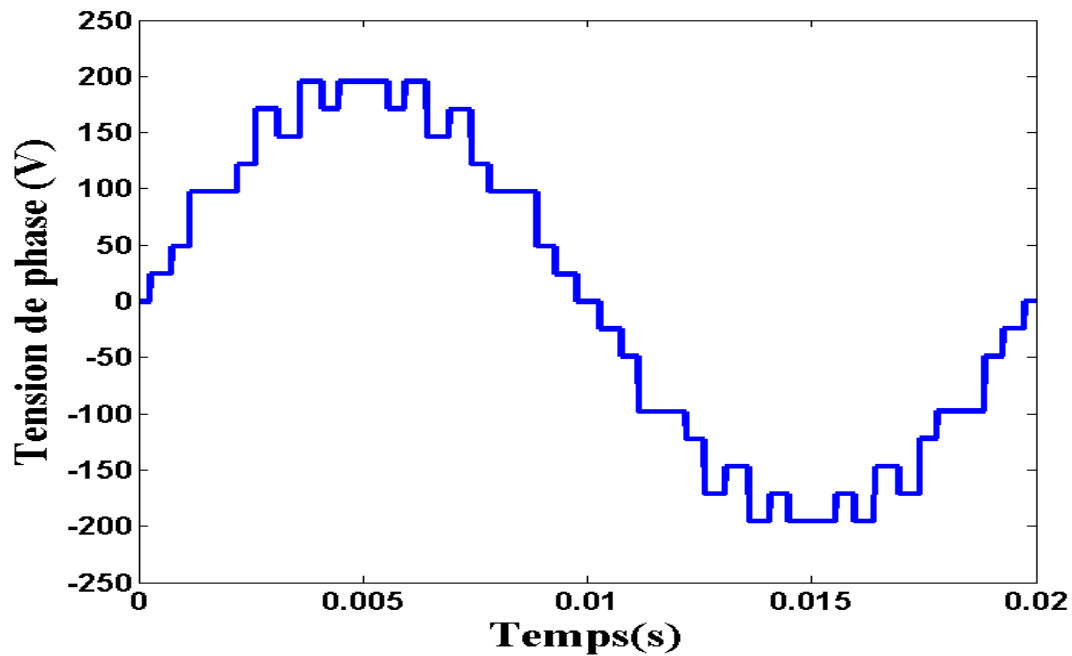


Fig (I.10) Tension simple de la première phase

I.6. Applications des onduleurs

Nous citons quelques domaines d'application :

- production de tension sinusoïdale de fréquences moyennes (de quelques kHz à quelques 10Khz): soudage, chauffage par induction,
- alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs,
- alimentation des moteurs à courant alternatif à fréquence variable.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes topologies des onduleurs multi niveaux, Nous avons étudié le modèle d'onduleur de tension triphasé cascadié à sept niveaux, ensuite la modélisation avec les équations de toutes les tensions.

Dans le deuxième chapitre, notre présentation variée alentour des deux stratégies de commande par élimination d'harmoniques, qui sont la méthode de l'algorithme génétique et l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire (OEP), ceci pour avoir les meilleurs angles de commutation des interrupteurs (durées de conduction des semi-conducteurs).