

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on à étudier les onduleurs multi niveaux à structure NPC à diode flottante, avec un étude sur un onduleur multi niveaux à trois et cinq niveaux triphasé et en fin une généralisation sur l'ondeur à N niveaux.

III.2. Onduleur à trois niveaux de type diode flottante :

III.2.1. Description

L'ondeur à diode flottante à trois niveaux est représenté sur la figure (III.1) Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1 et C2), formant un point milieu noté (O) qui permet à l'ondeur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'ondeur classique à deux niveaux [9].

La tension totale du bus continu vaut E, dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension $\frac{E}{2}$ à leurs bornes.

Chacun des trois bras (a, b et c) de l'ondeur est composé de quatre interrupteurs commandés (K_1, K_2, K_3 et K_4 pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

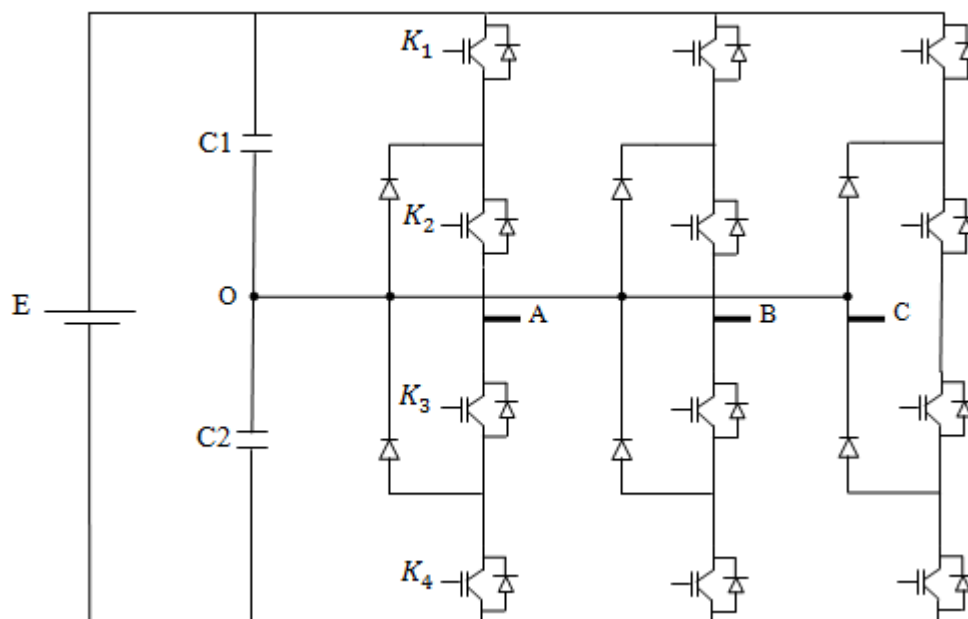


Figure III. 1: Schéma d'un onduleur à diode flottante à trois niveaux

III.1.2. Principe de fonctionnement

Pour des raisons de simplicité, nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur à diode flottante de trois niveaux, l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Le sens positif ou négatif des courants I_{d0} , I_{d1} , et I_{d2} fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant figure (III.2).

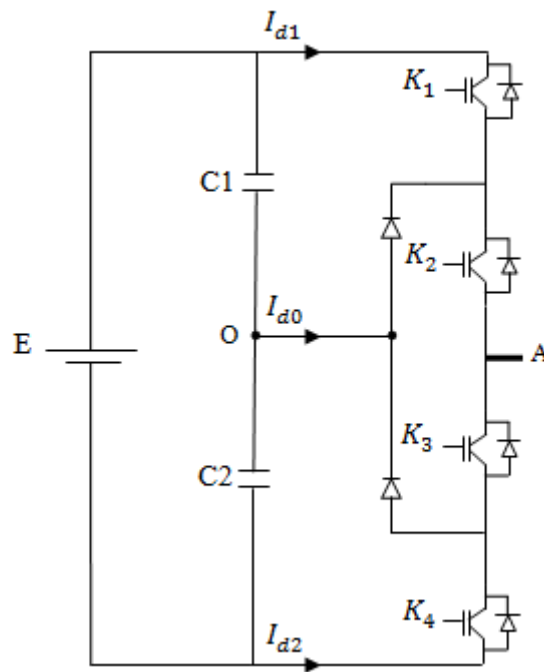


Figure III. 2: Bras d'un onduleur à diode flottante à trois niveaux

Pour un convertisseur à diode flottante à N-niveaux de tensions, nous avons **N** séquences de fonctionnement possible permettant de générer les **N** niveaux de tensions. Et en particulier pour la diode flottante à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement:

- **Séquences 1:** Génération du niveau maximum Dans ce cas, les interrupteurs K_1 , K_2 sont passants et K_3 , K_4 sont bloqués comme le montre la figure III.2. et la tension de sortie V_{ao} est:

$$V_a = +\frac{E}{2} \text{ la tension inverse appliquée aux interrupteurs } K_4, K_3 \text{ vaut: } V_{K3} = V_{K4} = +\frac{E}{2}.$$

- **Séquences 2:** Génération du niveau intermédiaire Les interrupteurs K_2, K_3 sont passants et K_1, K_4 sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point O à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure 1.4-b. Et la tension de sortie V_{ao} est donc nulle, $V_{ao} = 0$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1, K_4 vaut: $V_{K1} = V_{K4} = +\frac{E}{2}$
- **Séquences 3:** Génération du niveau minimum Dans ce cas, les interrupteurs K_1, K_2 sont bloqués et K_3, K_4 sont passants comme le montre la figure 1.4-c. et la tension de sortie V_{ao} est: $V_{ao} = -\frac{E}{2}$ la tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1, K_2 vaut: $V_{K1} = V_{K2} = +\frac{E}{2}$.

les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau III.1

K_1	K_2	K_3	K_4	V_{ao}
1	1	0	0	$\frac{E}{2}$
0	0	1	1	$-\frac{E}{2}$
0	1	1	0	0

Tableau III. 1 : États possibles d'un bras de l'onduleur à diode flottante à trois niveaux

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure (III.3).

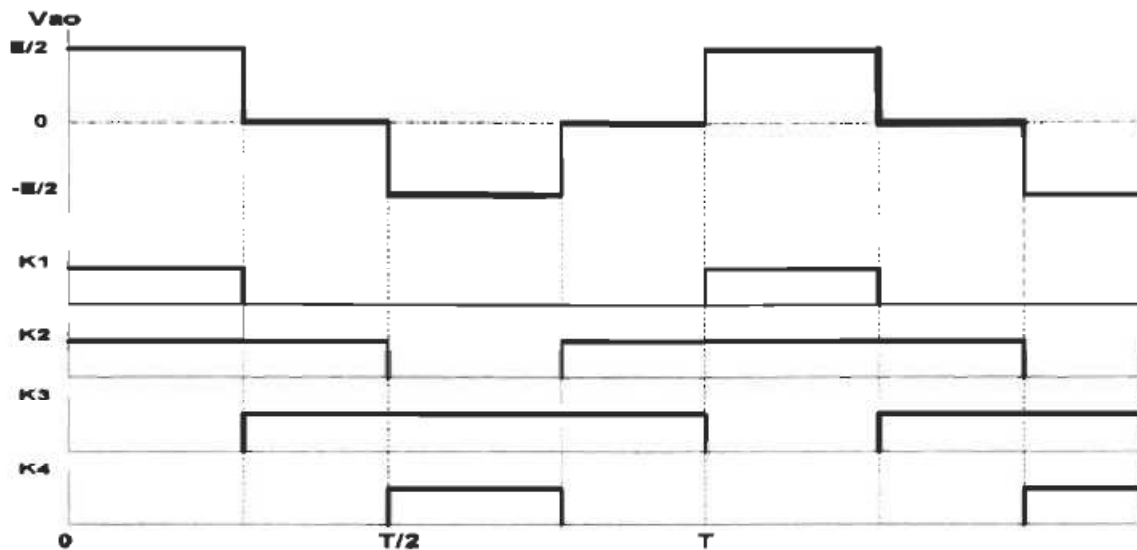


Figure III. 3 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à diode flottante à trois niveaux

Commentaire : Nous remarquons que le temps de conduction de chaque interrupteur est réduit par rapport à celui des interrupteurs d'un convertisseur classique à deux niveaux, chaque interrupteur bloque une tension de $\frac{E}{2}$ dans le cas à diode flottante à trois niveaux au lieu de l'onduleur classique deux niveaux. A chaque changement de niveau de tension, on a deux interrupteurs qui commutent.

III.2. Onduleur à cinq niveaux de type diode flottante

III.2.1. Description

Chaque phase de l'onduleur triphasé à diode flottante à cinq niveaux de tensions est composée de huit interrupteurs commandés qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant (il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle) et de six diodes de maintien connectées tout au long du bus continu.

L'onduleur est alimenté par une source continue E , que quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension $\frac{E}{4}$.

La structure triphasée de l'onduleur à diode flottante à cinq niveaux de tensions est présentée sur Figure (III.4)

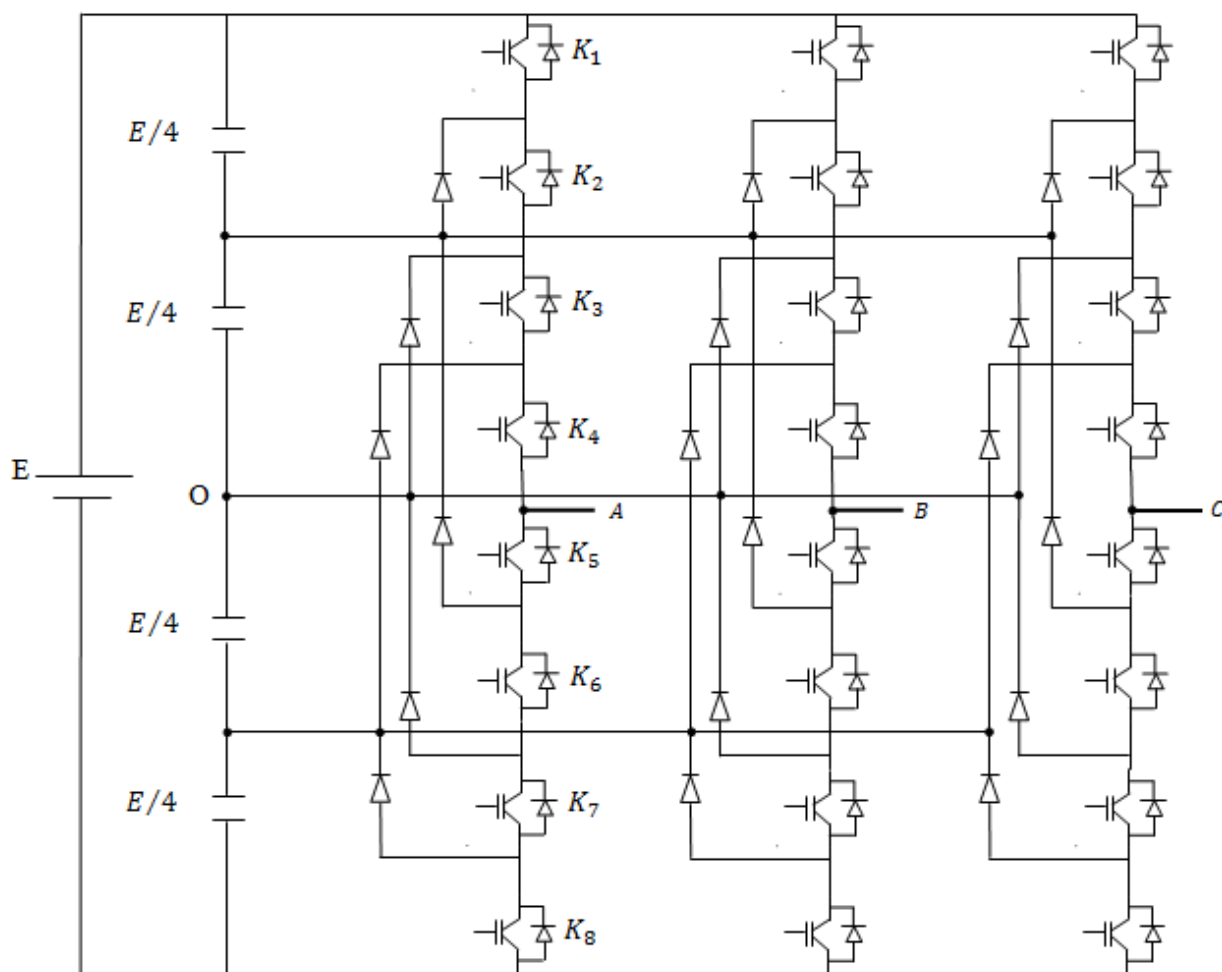


Figure III. 4 : Schéma d'un onduleur à diode flottante à cinq niveaux

III.2.2. Principe de fonctionnement

Nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur à diode flottante de cinq niveaux, figure (III.5). L'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conduction des interrupteurs.

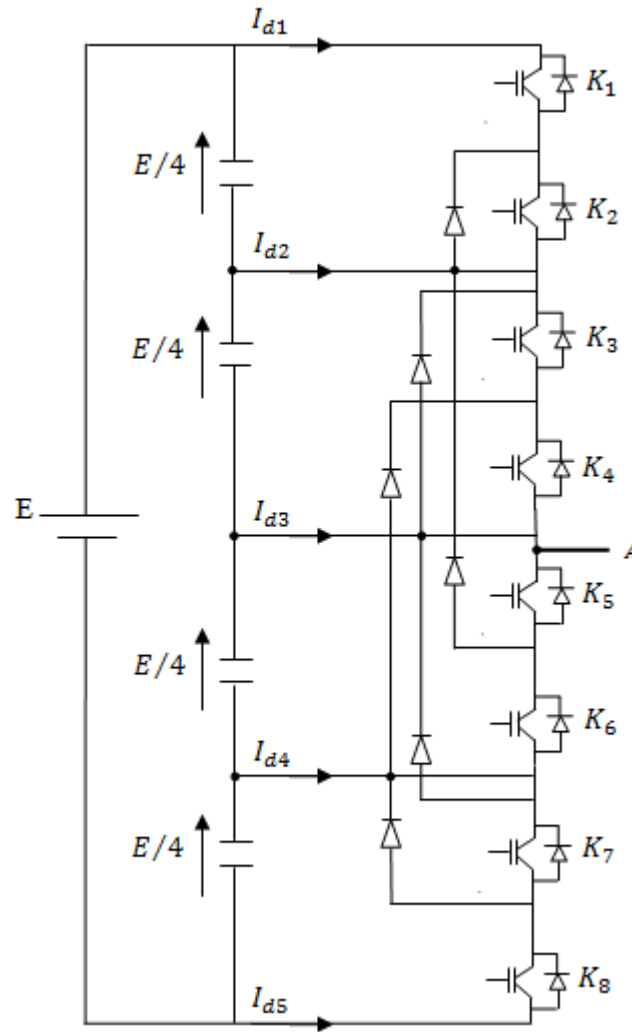


Figure III. 5 : Bras d'un onduleur à diode flottante à cinq niveaux

Dans ce cas, nous avons cinq séquences de fonctionnement possible :

- **Séquence 1:** K_1 , K_2 , K_3 et K_4 sont passants et K_5 , K_6 , K_7 et K_8 sont bloqués. Alors, le point a est relié directement à la borne positive du premier étage de tension $\frac{E}{4}$ et le point O est relié à la borne négative du deuxième étage de tension $\frac{E}{4}$ ce qui implique que la tension de sortie vaut:

$$v_{ao} = + \frac{E}{4}$$
- **Séquence 2:** K_2 , K_3 , K_4 et K_5 sont passants et K_6 , K_7 , K_8 et K_1 sont bloqués, on a: la tension de sortie est: $V_{ao} = + \frac{E}{4}$

- **Séquence 3:** K_3, K_4, K_5 et K_6 sont passants et K_7, K_8, K_1 et K_2 sont bloqués, on a: La tension de sortie est: $V_{ao} = 0$
 - **Séquence 4:** K_4, K_5, K_6 et K_7 sont passants et K_8, K_1, K_2 et K_3 sont bloqués, on a: la tension de sortie est: $V_{ao} = -\frac{E}{4}$
 - **Séquence 5:** K_5, K_6, K_7 et K_8 sont passants et K_1, K_2, K_3 et K_4 sont bloqués, on a: la tension de sortie est: $V_{ao} = -\frac{E}{2}$
- Remarque :** Les tensions bloquées par les différents interrupteurs au cours des Séquences de fonctionnement valent toutes

$$V_{Ki} = +\frac{E}{4} \quad i = 1..8$$

Les différentes séquences de fonctionnement et l'état des interrupteurs commandés sont regroupés dans le tableau (III.2.)

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	V_{ao}
1	1	1	1	0	0	0	0	$\frac{E}{2}$
0	1	1	1	1	0	0	0	$\frac{E}{4}$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-\frac{E}{4}$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau III. 2 : États possibles d'un bras de l'onduleur à diode flottante à cinq niveaux

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure (III.6)

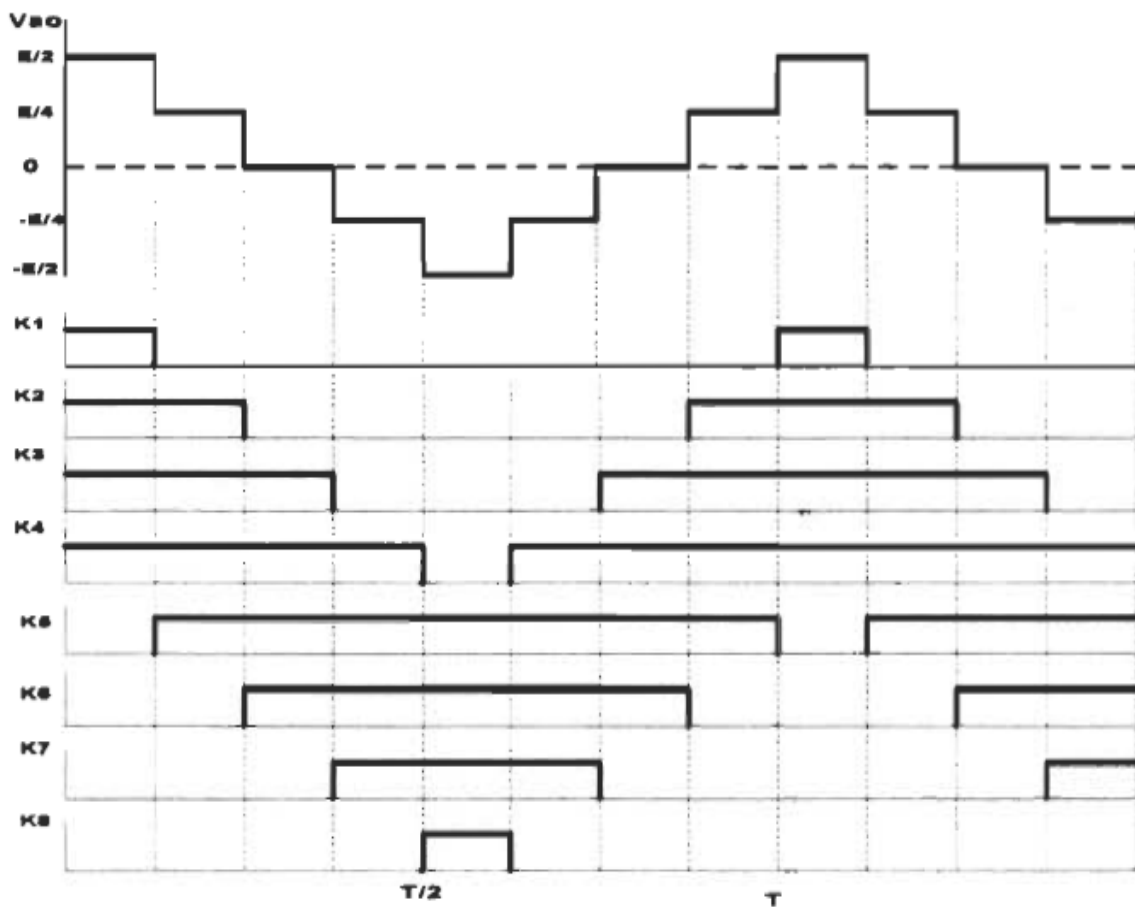


Figure III. 6 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à diode flottante à cinq niveaux

Commentaire : On remarque que plus le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède de paliers. Ceci permet de mieux approcher la sinusoïde. Donc la tension de sortie du convertisseur à diode flottante 5 niveaux est meilleure du point de vue taux de distorsion harmonique que celle d'un diode flottante à trois niveaux. Un autre avantage du diode flottante à cinq niveaux les interrupteurs commandés bloque une tension ($V_{K1} = + \frac{E}{4}$) deux fois plus faible que celle bloquée par les interrupteurs du convertisseur à trois niveaux ($V_{K1} = + \frac{E}{2}$). On a deux commutations à chaque changement de niveau de la tension de sortie.

III.3. Généralisation de la structure à diode flottante à N niveaux

III.3.1. Description

En se basant sur l'étude faite sur les onduleurs de tension de type diode flottante à trois et à cinq niveaux, on peut étendre notre étude à des convertisseurs à N niveaux de tension de type

diode flottante. La figure (III.7) montre un schéma possible de branche d'onduleur à diode flottante constitué de N étages. Les condensateurs C_1 à C_N permettent de diviser la tension d'entrée, les interrupteurs K_1 à K_N font circuler les courants entrant avec les diodes D_1 à D_N . L'ensemble forme ainsi une cellule de commutation.

Pour un onduleur à N niveaux, le nombre des éléments constituant sa topologie notamment les condensateurs C , les interrupteurs K (par phases) et les diodes de bouclage ou de maintien D (par phase) sont régis par les relations suivantes: $C = N - 1$, $K = 2(N - 1)$, $D = 2(N - 2)$.

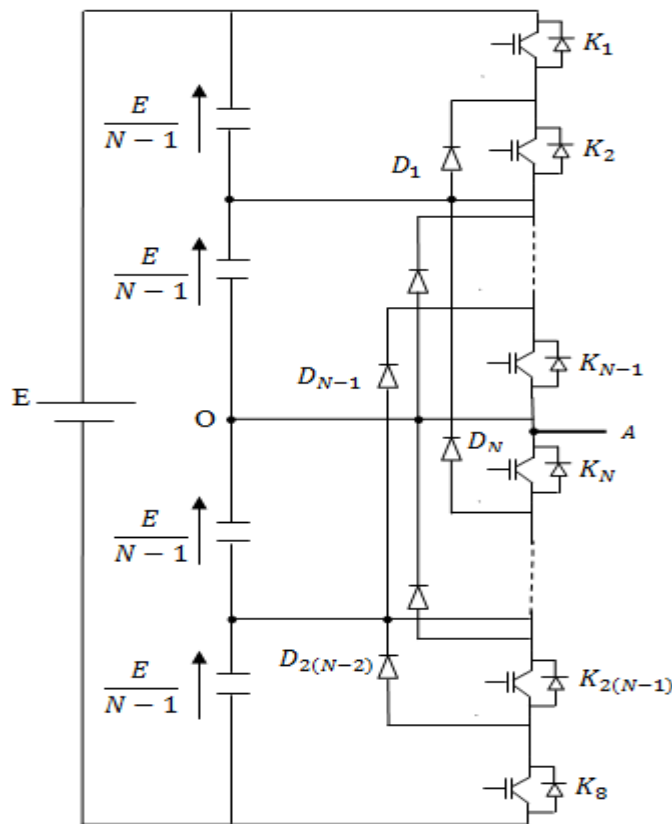


Figure III. 7: Bras d'onduleur à diode flottante à N niveaux de tension

III.3.2. Principe de fonctionnement

Pour un convertisseur à diode flottante à N niveaux de tension, nous avons $N-1$ interrupteurs commandés complémentaires par phases. et nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions comme le montre le tableau (III.3).

K_1	K_2	...	$K_{(N+1)/2}$	...	K_{N-1}	K_N	...	$K_{3(N-1)/2}$	...	K_{2N-3}	$K_{2(N-1)}$	V_{ao}
1	...	...		...	1	0	...			...	0	$\frac{E}{2}$
0	1	...			...	1	0			...	0	$\frac{(N-3)E}{2(N-1)}$
...	0											...
												$\frac{E}{N-1}$
...		0	1	...	...	...		1	0	...	0	0
...			0	1	...			...	1	0	0	$-\frac{E}{N-1}$
												...
0	...	0			1	...	...			1	0	$-\frac{(N-3)E}{2(N-1)}$
0	...	...			0	1	...			...	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau III. 3 : États possibles d'un bras de l'onduleur à diode flottante à N niveaux

La $m^{ème}$ séquence de fonctionnement correspondra à l'état où, les interrupteurs K_m jusqu'à K_{N+m-2} sont fermés et les autres interrupteurs ouverts.

III.4.Modélisation d'un onduleur à trois et cinq niveaux à diode flottante

III.4.1.Introduction

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance.ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développementde composants àsemi-conducteurs entièrement commandables,puissants, robustes et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dite modulation de largeurs d'impulsions .

Dans les applications de fortes puissances, la structure des onduleurs à trois niveaux est plus adaptée, par rapport à la structure classique, du fait que les tensions et courants

de sortie présentent un taux d'harmoniques nettement inférieur. La tension aux bornes de chaque interrupteur est divisée par deux et la fréquence de hachage est plus basse.

III.4.2. Modélisation d'un onduleur à trois niveaux à diode flottante :

III.4.2.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux à structure diode flottante :

La structure choisie dans cette étude est celle de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure diode flottante. Plusieurs études sont faites sur les onduleurs à deux niveaux, aussi bien du point de vue modélisation que stratégie de commande. On va essayer surtout d'approfondir les parties concernant les onduleurs multi-niveaux, et plusieurs structures sont possibles pour l'onduleur à trois niveaux. nous avons choisi d'étudier la structure diode flottante, cet onduleur est dit à trois niveaux parce qu'il délivre trois niveaux de tension ($+U_c$, 0 , $-U_c$). Cette structure est présentée à la figure (III.8) [10].

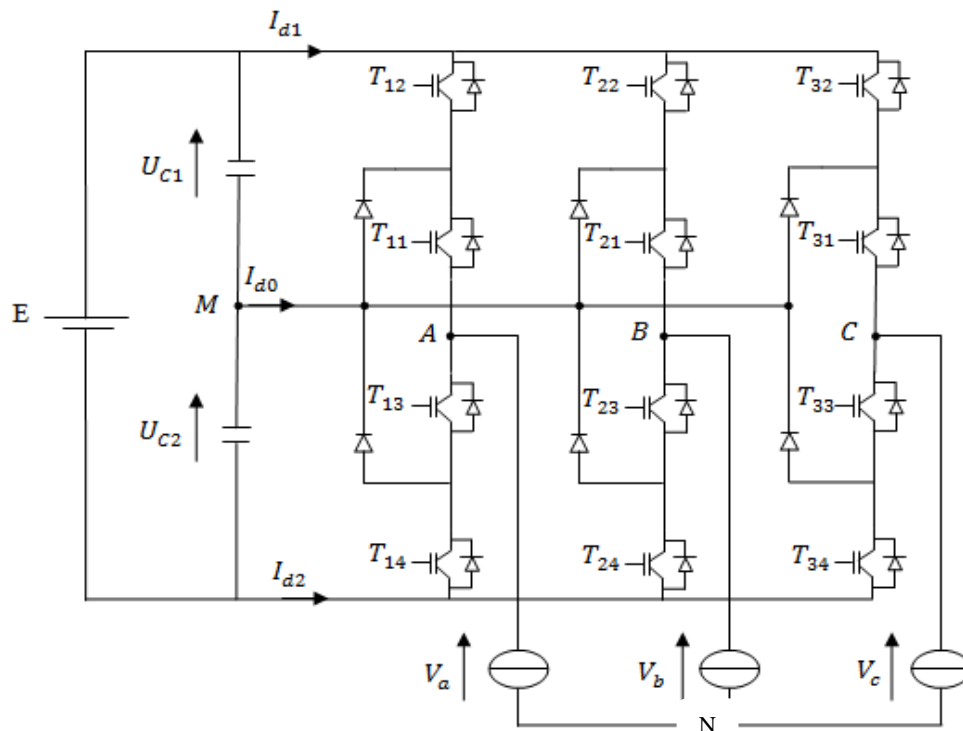


Figure III. 8 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure diode flottante

III.4.2.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à diode flottante à trois niveaux

L'onduleur à trois niveaux a une structure symétrique. Donc on procède par bras (figure (III.9)), ainsi, on définit en premier lieu un modèle global d'un bras sans à priori sur la commande.

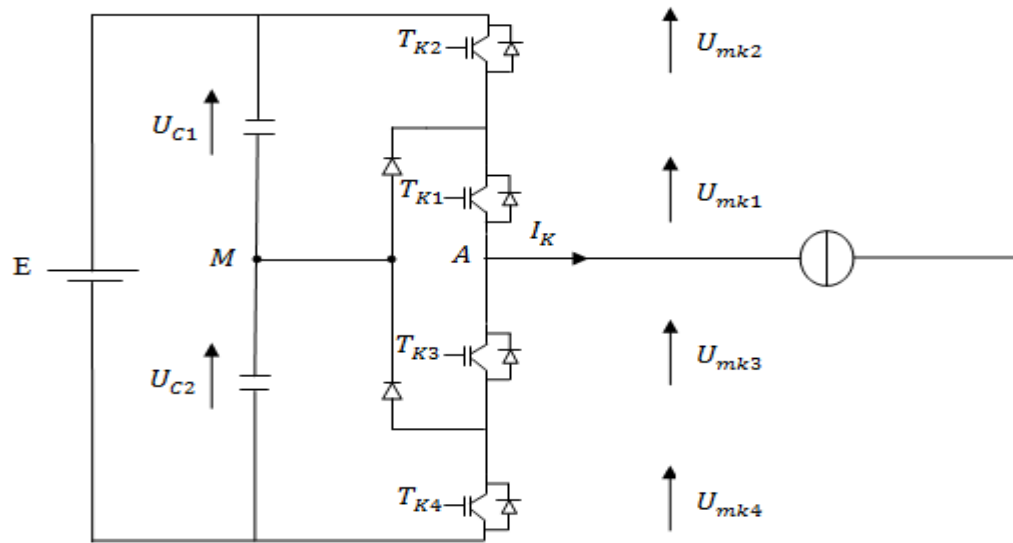


Figure III. 9 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux

III.4.2.3. Les Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux

A fin d'élaborer un modèle du fonctionnement de ces onduleurs à trois niveaux sans a priori sur la commande ; on représente chaque paire transistor diode par un seul interrupteur bidirectionnel (figure (III.10)) et on procède par bras (grâce à la symétrie de l'onduleur triphasé)[10] [11].

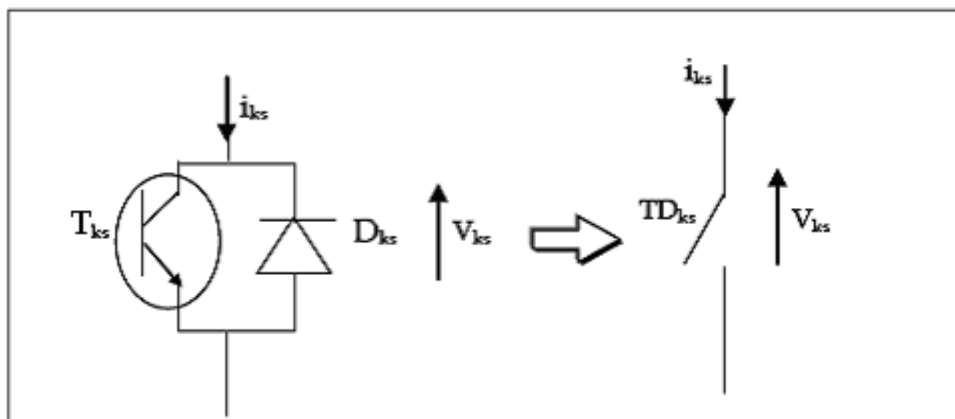


Figure III. 10 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor

Une analyse topologique d'un bras montre trois configurations possibles pour ce dernier. Ces différentes configurations sont présentées à la figure (III.11).

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau (III.4) (avec **O** origine des potentiels et V_k le potentiel du nœud **k** du bras **k**). Pour les configurations **E0** le potentiel V_k dépend de la source d'énergie alternative.

La Configuration	La grandeur électrique qui la caractérise	Les état des interrupteurs
E1	$V_{AM} = U_{c1}$	TD_{k1}, TD_{k2} sont fermée et TD_{k3} et TD_{k4} sont ouvert
E2	$V_{AM} = 0$	TD_{k2}, TD_{k3} sont fermée et TD_{k1} et TD_{k4} sont ouvert
E3	$V_{AM} = -U_{c2}$	TD_{k1}, TD_{k2} sont ouvert et TD_{k3} et TD_{k4} sont fermée

Tableau III. 4 : Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras k

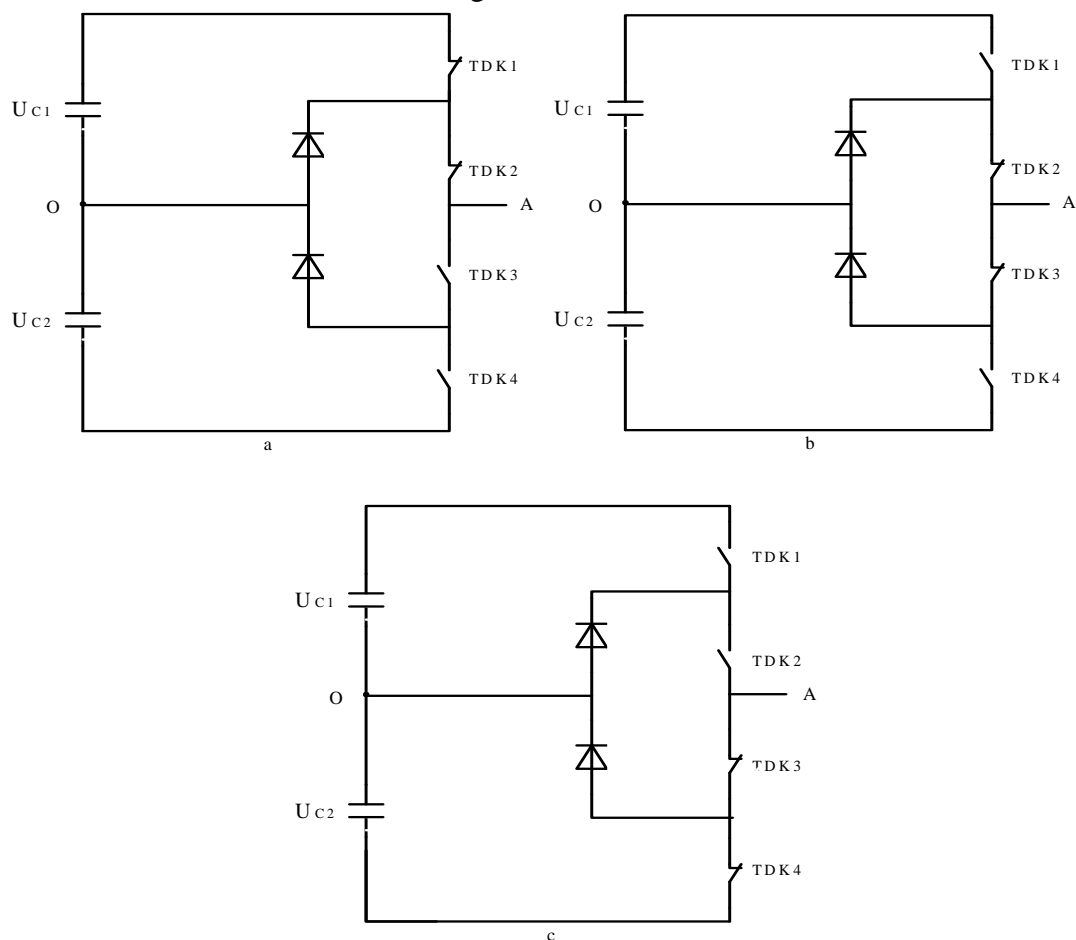


Figure III. 11 : Les Différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à trois niveaux

III.4.2.4. Hypothèse

Les tensions d'entrée de l'onduleur sont supposées parfaites. En pratique, cela se traduit par le fait que, quel que soit le courant I_k , délivré par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante $U_{C1} = U_{C2}$. La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant la tension d'alimentation qui est de l'ordre de quelques centaines de volts.

III.4.2.5. Commandes complémentaires des onduleurs à trois niveaux

Pour l'onduleur à trois niveaux, la condition de Commandabilité implique que les transitions entre les configurations ne dépendent plus de la commande interne (grandeurs électriques), mais uniquement des transitions (commande externe) [10].

Dans la suite de ce chapitre, on suppose que cette condition est toujours vérifiée. Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un bras, ce qui peut causer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit, ou une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit trois commandes complémentaires, pouvant être appliquées sur un bras de l'onduleur.

L'interrupteur TDK1, par exemple, peut être commandé de façon complémentaire avec chacun des trois autres interrupteurs du même bras : TDK2, TDK3, TDK4.

Ainsi, on écrit :

$$\left. \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k4}} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k3}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k4}} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Où : B_{KS} étant le signal de commande du transistor TD_{KS} du bras k .

Parmi les commandes précédentes, celle qui permet d'avoir les trois tensions: U_{C1} , 0, U_{C2} , est la suivante :

$$\left. \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k3}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k4}} \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

B_{K1}	B_{K2}	B_{K3}	B_{K4}	V_K
0	0	1	1	$-U_{C2}$
0	1	1	0	0
1	1	0	0	U_{C1}

Tableau III. 5 : Tableaux d'excitation associée à la commande complémentaire proposée

III.4.2.5.1. Fonction de connexion des interrupteurs :

La fonction de connexion définit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur TD_{ki} du bras k ; elle vaut 1 lorsque l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire.

$$F_{KS} = \begin{cases} 1 & \text{si } TD_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } TD_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (3.3)$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs, du bras k , on obtient :

$$\begin{cases} F_{k1} = \overline{F_{k3}} \\ F_{k2} = \overline{F_{k4}} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{K3} \\ F_{k2} = 1 - F_{K4} \end{cases} \quad (3.4)$$

Avec cette commande complémentaire, tout se passe comme si pour chaque bras de l'onduleur on a seulement deux cellules de commutations à deux interrupteurs chacune. La commande complémentaire pour les trois bras est exprimée par les trois relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{k11} = 1 - F_{K13} \\ F_{k12} = 1 - F_{K14} \end{cases} \begin{cases} F_{k21} = 1 - F_{K23} \\ F_{k22} = 1 - F_{K24} \end{cases} \begin{cases} F_{k31} = 1 - F_{K33} \\ F_{k32} = 1 - F_{K34} \end{cases} \quad (3.5)$$

III.4.2.5.2. Fonction de connexion des demi-bras

Pour l'onduleur à trois niveaux, on définit une fonction de connexion des demi-bras, qu'on note comme suit : F_{Km}^b

Où k désigne le numéro du bras ($k=1, 2, 3$) et m indique la position du demi-bras ($m=1$ pour le demi-bras du haut et $m=0$ pour le demi-bras du bas)

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen de fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} \cdot F_{K4} \end{cases} \quad (3.6)$$

F_{K1}^b est associée au demi-bras du haut (la paire T_{K1}, T_{K2}) et F_{K0}^b est associée au demi-bras du bas (la paire T_{K3}, T_{K4}). Le système d'équation (III.6) montre que la fonction de connexion des demi bras F_{Km}^b vaut 1 dans le cas où les deux interrupteurs associés aux demi bras F_{Km}^b sont tous fermés et nulle dans tous les autres cas.

III.4.2.5.3. Fonctions de conversion :

On appelle fonction de conversion, la fonction qui permet de passer de la tension d'entrée de l'onduleur à sa tension de sortie .

Notations :

On désigne par

- **VA ,VB, VC** : Tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge.
- **VAO, VBO, VCO**: Tensions de chaque phase de l'onduleur par rapport au point milieu “O” de l'alimentation continue de l'onduleur.

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, les potentiels des nœuds : A, B, C par rapport au point O s'expriment à l'aide des fonctions de connexions comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{VAO} = F_{11} \square F_{12} \square U_{C1} - F_{13} \square F_{14} \square U_{C2} \\ \mathbf{VBO} = F_{21} \square F_{22} \square U_{C1} - F_{23} \square F_{24} \square U_{C2} \\ \mathbf{VCO} = F_{31} \square F_{32} \square U_{C1} - F_{33} \square F_{34} \square U_{C2} \end{cases} \quad (3.7)$$

Dans le cas où $U_{C1} = U_{C2} = U_C$, le système (III.7) s'écrit :

$$\begin{cases} \mathbf{VAO} = F_{11} \square F_{12} \square U_{C1} - F_{13} \square F_{14} \square U_{C2} = (F_{11} \square F_{12} - F_{13} \square F_{14}) \square U_C \\ \mathbf{VBO} = F_{21} \square F_{22} \square U_{C1} - F_{23} \square F_{24} \square U_{C2} = (F_{21} \square F_{22} - F_{23} \square F_{24}) \square U_C \\ \mathbf{VCO} = F_{31} \square F_{32} \square U_{C1} - F_{33} \square F_{34} \square U_{C2} = (F_{31} \square F_{32} - F_{33} \square F_{34}) \square U_C \end{cases} \quad (3.8)$$

On constate d'après le système (3.8) que l'onduleur de tension à trois niveaux est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux en série [12].

Fonctions de connexion des demi bras :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11} \cdot F_{12} & F_{21}^b = F_{21} \cdot F_{22} \\ F_{10}^b = F_{13} \cdot F_{14} & F_{20}^b = F_{23} \cdot F_{24} & F_{30}^b = F_{33} \cdot F_{34} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{31}^b = F_{31} \cdot F_{32} \end{cases} \quad (3.9)$$

En introduisant les expressions de ces dernières fonctions dans le système (III.7) on obtient :

$$\begin{cases} \mathbf{VAO} = F_{11}^b \square U_{C1} - F_{10}^b \square U_{C2} = (F_{11}^b - F_{10}^b) \square U_C \\ \mathbf{VBO} = F_{21}^b \square U_{C1} - F_{20}^b \square U_{C2} = (F_{21}^b - F_{20}^b) \square U_C \\ \mathbf{VCO} = F_{31}^b \square U_{C1} - F_{30}^b \square U_{C2} = (F_{31}^b - F_{30}^b) \square U_C \end{cases} \quad (3.10)$$

Les tensions composées sont données par le système suivant :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AO} - V_{BO} & U_{AB} = (F_{11}F_{12} - F_{21}F_{22})U_{C1} - (F_{13}F_{14} - F_{23}F_{24})U_{C2} \\ U_{BO} = V_{BO} - V_{CO} & U_{BC} = (F_{21}F_{22} - F_{31}F_{32})U_{C1} - (F_{23}F_{24} - F_{33}F_{34})U_{C2} \\ U_{CA} = V_{CO} - V_{AO} & U_{CA} = (F_{31}F_{32} - F_{11}F_{12})U_{C1} - (F_{33}F_{34} - F_{13}F_{14})U_{C2} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} V_{AN} = V_A = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_{BN} = V_B = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_{CN} = V_C = \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3} \end{cases} \quad (3.12)$$

Avec N : le point neutre de charge

En introduisant les fonctions de connexions des demi bras, on obtient :

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \bullet \left\{ \begin{pmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{pmatrix} U_{C1} - \begin{pmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{pmatrix} U_{C2} \right\} \quad (3.13)$$

III.4.3. Modélisation du bras de l'onduleur à cinq niveaux à diode flottante

Grâce à la symétrie de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure diode flottante, on procède par bras. Ainsi, on définit un modèle global d'un bras sans à priori sur la commande, ensuite, on déduit celui de l'onduleur Complet [11][12][13]. Comme pour l'onduleur à deux niveaux et à trois niveaux, on représente chaque paire semi conducteur (transistor (Tks)-diode (Dks)) par un seul interrupteur bidirectionnel TDks.

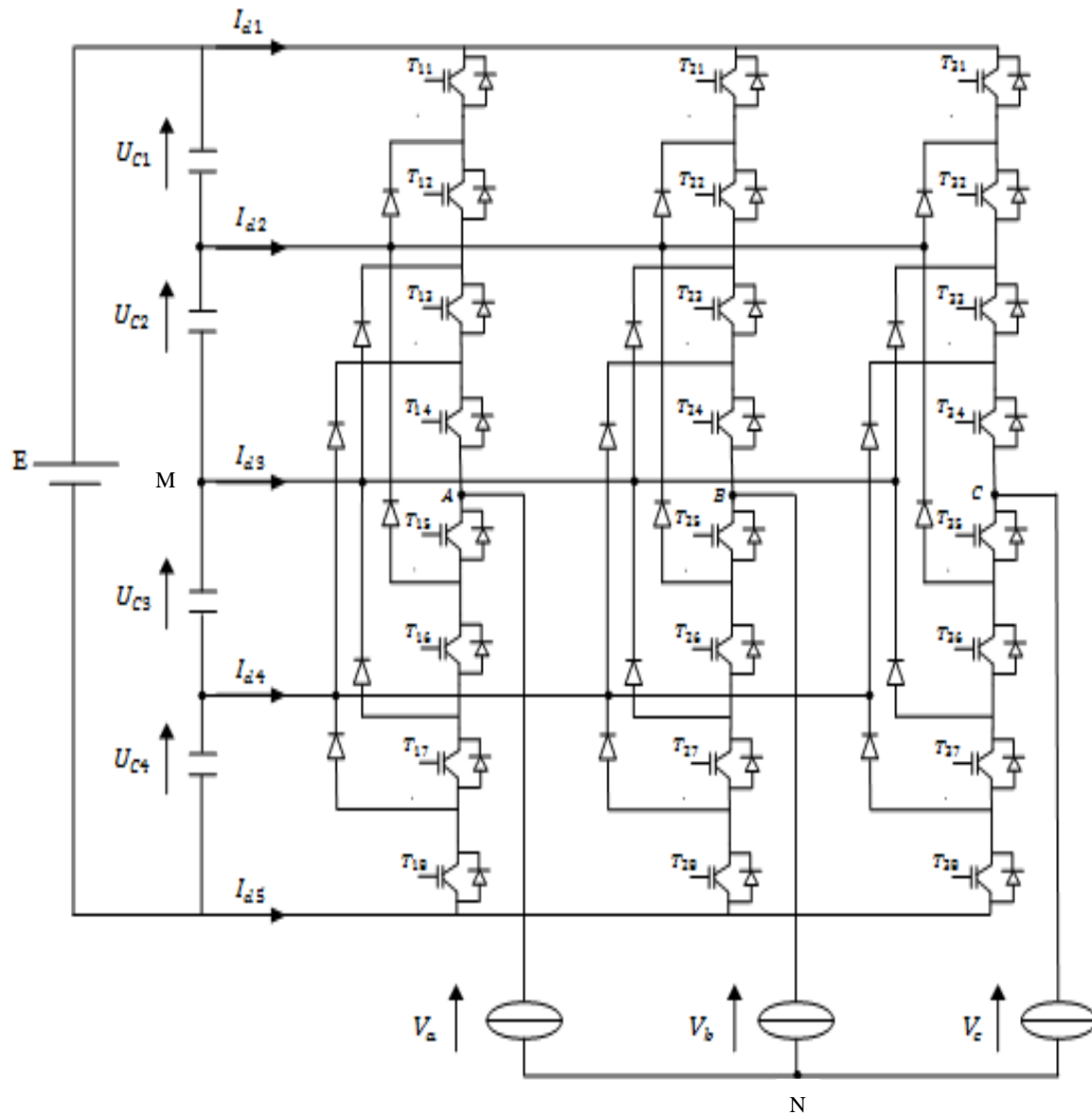


Figure III. 12 : Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure à diode flottante

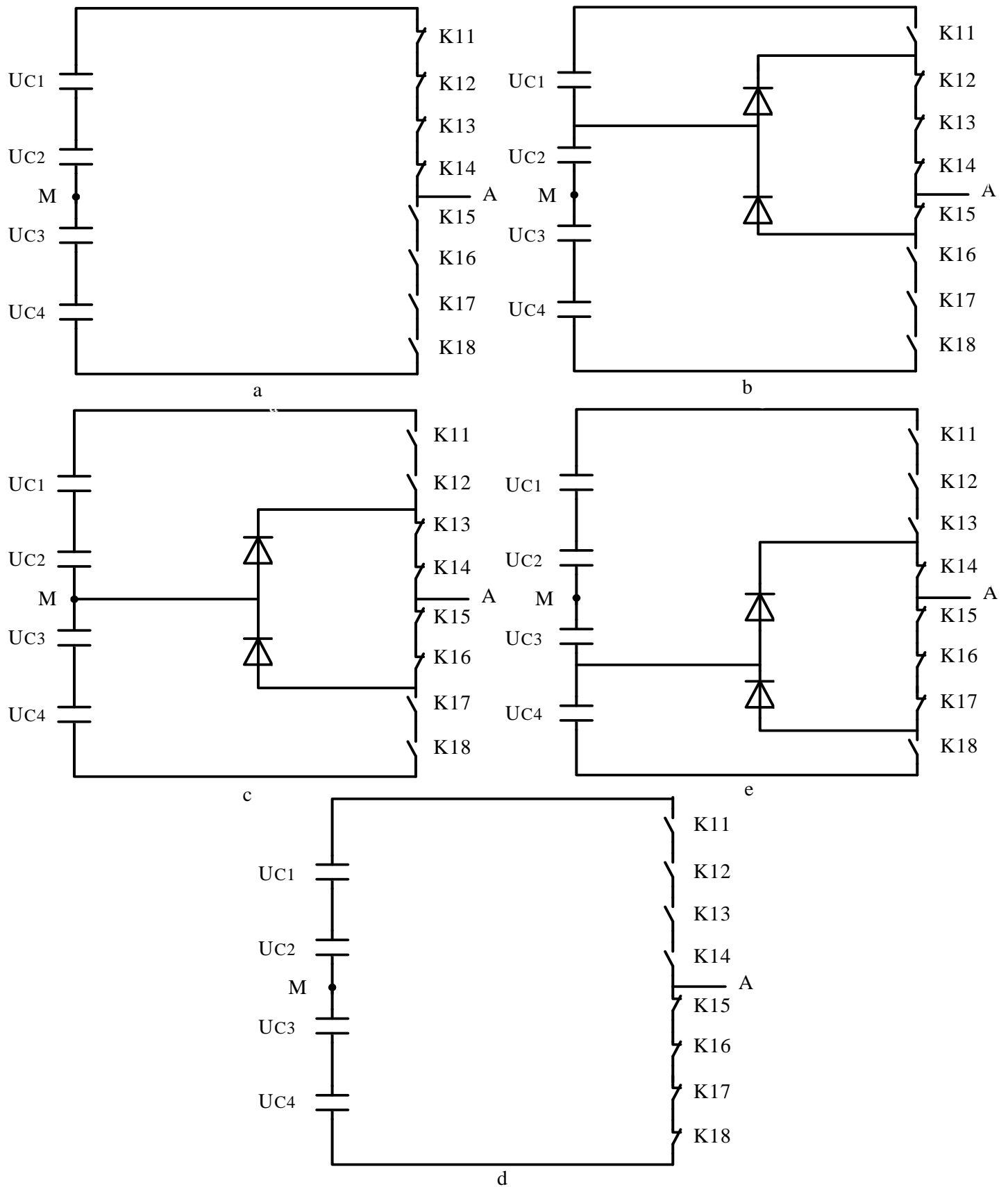


Figure III. 13: Les différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à cinq niveaux

III.4.3.1. Commande complémentaire :

Pour éviter des courts-circuits de sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte la commande complémentaire pour un bras k de l'onduleur triphasé à cinq niveaux sachant qu'il existe plusieurs commandes complémentaires .

F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}	F_{16}	F_{17}	F_{18}	V_{km}
1	1	1	1	0	0	0	0	$2U_c$
0	1	1	1	1	0	0	0	U_c
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-U_c$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-U_c$

Tableau III. 6 : Tableau des excitations relatives des cellules

(Onduleur à diodes flottants à 5niveaux)

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{K1} = 1 - F_{K5} \\ F_{K2} = 1 - F_{K6} \\ F_{K3} = 1 - F_{K7} \\ F_{K4} = 1 - F_{K8} \end{array} \right. \quad (3.14)$$

Comme l'onduleur à trois niveaux, on définit les fonctions du demi bras

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{K1}^b = F_{K1} \square F_{K2} \square F_{K3} \square F_{K4} \\ F_{K0}^b = F_{K5} \square F_{K6} \square F_{K7} \square F_{K8} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Pour l'onduleur à cinq niveaux ,les potentiels des nœuds **A B** et **C** par rapport au point milieu **M** s'expriment comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{AM} = F_{11} \square F_{12} \square F_{13} \square F_{14} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{15} \square F_{16} \square F_{17} \square F_{18} (U_{C3} + U_{C4}) + F_{12} \square F_{13} \square F_{14} \square F_{15} U_{C2} - F_{14} \square F_{15} \square F_{16} \square F_{17} \square F_{18} U_{C3} \\ V_{BM} = F_{21} \square F_{22} \square F_{23} \square F_{24} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{25} \square F_{26} \square F_{27} \square F_{28} (U_{C3} + U_{C4}) + F_{22} \square F_{23} \square F_{24} \square F_{25} U_{C2} - F_{24} \square F_{25} \square F_{26} \square F_{27} \square F_{28} U_{C3} \\ V_{CM} = F_{31} \square F_{32} \square F_{33} \square F_{34} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{35} \square F_{36} \square F_{37} \square F_{38} (U_{C3} + U_{C4}) + F_{32} \square F_{33} \square F_{34} \square F_{35} U_{C2} - F_{34} \square F_{35} \square F_{36} \square F_{37} \square F_{38} U_{C3} \end{array} \right. \quad (3.16)$$

Dans le cas où $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = U_c$, le système (III.3) s'écrit :

$$\begin{cases} V_{AM} = [(2F_{11}F_{12}F_{13}F_{14} - 2F_{15}F_{16}F_{17}F_{18}) + F_{12}F_{13}F_{14}F_{15} - F_{14}F_{15}F_{16}F_{17}]U_c \\ V_{BM} = [(2F_{21}F_{22}F_{23}F_{24} - 2F_{25}F_{26}F_{27}F_{28}) + F_{22}F_{23}F_{24}F_{25} - F_{24}F_{25}F_{26}F_{27}]U_c \\ V_{CM} = [(2F_{31}F_{32}F_{33}F_{34} - 2F_{35}F_{36}F_{37}F_{38}) + F_{32}F_{33}F_{34}F_{35} - F_{34}F_{35}F_{36}F_{37}]U_c \end{cases} \quad (3.17)$$

D'après les équations des systèmes(3.16) et (3.17), on aboutit qu'un onduleur à cinq niveaux est équivalent à la mise en série de deux onduleurs à trois niveaux ou à la mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux.

On exprime les différentes tensions composées de l'onduleur à cinq niveaux à l'aide des fonctions de connexion des interrupteur de la manière suivante :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad (3.18)$$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par la relation (3.18) ce qui donne les tensions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3} \end{bmatrix} U_c \quad (3.19)$$

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la description et la présentation de la modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à trois et cinq niveaux à diodes flottantes.

Le modèle de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure diodes flottantes, on a constaté que l'onduleur à trois niveaux est la mise en série de deux onduleurs à deux niveaux.

On a démontré également que l'onduleur triphasé à cinq niveaux est la mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux et donc de deux onduleurs à trois niveaux.

En générale, ce chapitre permet de donner une idée globale sur la description et modélisation de tous les onduleurs à niveaux multiples à diodes flottantes.

L'objectif général du chapitre suivant est d'étudier généralement les techniques de la commande de l'onduleur triphasée et expliquer les différentes stratégies de commande des onduleurs multi niveaux.