

Convertisseur Matriciel

1 Introduction

Les convertisseurs alternatif-alternatif les plus utilisés en industries sont les convertisseurs indirecte.

1.1 Conversion indirecte

La conversion indirecte se divise en deux conversions successives, d'abord elle effectue le redressement de la grandeur alternative d'entrée en une grandeur continue au quasi continue qui est ensuite convertie en une grandeur alternative de sortie avec l'amplitude et la fréquence variable, suivant les indications de la figure (1-a).

1.2 Convertisseur direct

Suivant les indications de la figure (1-b) et que la conversion s'effectue en une seule étape car on convertie une grandeur alternative d'entrée en une grandeur alternative de sortie. L'élément de stockage d'énergie n'est pas nécessaire. Le convertisseur direct peut être identifié en tant que deux approches topologiques distinctes. La première et la plus simple topologie peut être employée pour changer l'amplitude d'une forme d'onde alternative d'entrée, cette topologie s'appelle gradateur. La seconde peut être utilisée si sa fréquence de sortie est inférieure à sa fréquence d'entrée, cette topologie s'appelle Cycloconvertisseur.

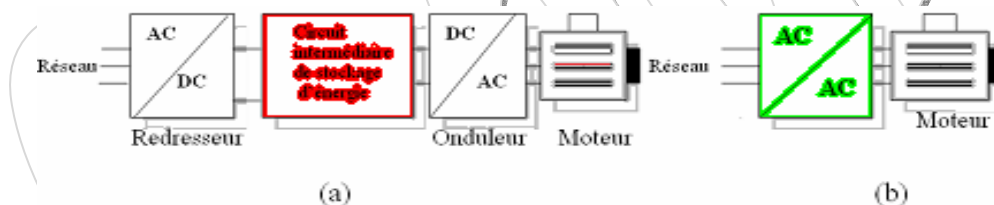


Figure .1 Structure des convertisseurs alternatif-alternatif

a- Convertisseur indirect

b- Convertisseur direct

2. Convertisseur direct

La structure de convertisseur direct alternatif- alternatif (convertisseur matriciel triphasé) est encore peu répandue, mais elle est très prometteuse si bien qu'elle fait l'objet d'une recherche intensive. Les convertisseurs matriciels ou cycloconvertisseurs à commutations forcées ont été l'objet d'un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique en particulier pour les applications pour lesquelles l'encombrement, la masse et la fiabilité sont des paramètres importants.

2.1. Cycloconvertisseur

Un Cycloconvertisseur est un changeur de fréquence fonctionnant en commutation naturelle. Les tensions alternatives de sortie sont obtenues en prélevant des portions convenables des tensions d'entrée. A valeur et fréquence des tensions d'entrée données, le Cycloconvertisseur permet de faire varier de manière continue la valeur et la fréquence des tensions de sortie. Toutefois le maximum de la fréquence de sortie est nettement inférieur à la fréquence d'entrée ; il s'agit donc d'un démultiplicateur de fréquence à rapport continûment variable.

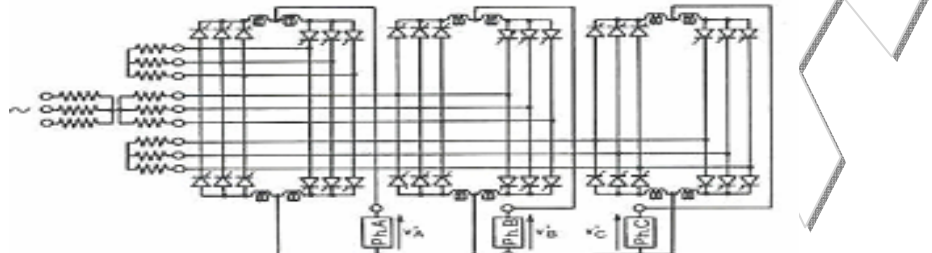


Figure. 2 Convertisseur direct de fréquence
(Cycloconvertisseur)

2.2 Convertisseur matriciel

Le convertisseur matriciel a été d'abord présenté en 1979 par Peter Wood Basé sur le travail de B.Pelly et de L. Gyugyi. Plus tard, Alesina et Venturini ont employé cette topologie pour développer le premier convertisseur alternatif/ alternatif à commutation forcée. Aux alentours de 1988 venturini a présenté des résultats d'une première réalisation d'un convertisseur matriciel.

Ils tiennent leur nom du fait qu'ils sont constitués d'un tableau d'interrupteurs quatre cadrans de dimension $m*n$ qui connectent directement une source de tension m -phasée à une source de courant n -phasée. Ces convertisseurs AC-AC sont bidirectionnels en puissance, permettent d'obtenir des tensions de sortie variables en amplitude et en fréquence et d'ajuster le facteur de puissance en entrée.

2.2.1 Structure de convertisseur matriciel

La plupart des convertisseurs matriciels sont triphasés-triphasés, ils associent généralement le réseau triphasé (source de tension) à un moteur (source de courant). Ils sont alors constitués de neuf interrupteurs bidirectionnels en courant et en tension connectés de manière à ce que n'importe quelle phase de la source puisse être connectée à n'importe quelle phase de la charge. La figure.3 donne la représentation d'un convertisseur matriciel associant trois sources de tensions à trois sources de courants à l'aide d'interrupteurs idéaux. La structure étant parfaitement symétrique et le fonctionnement complètement réversible, il n'y a pas, à proprement parler, d'entrée et de sortie pour ce convertisseur. Ces termes pourront cependant être utilisés pour désigner respectivement le côté réseau (source de tension) et le côté charge (source de courant – moteur).

a) Configurations admissibles

Soit $\lambda\kappa$ ($\lambda = A, B, C$ et $\kappa = a, b, c$)

L'interrupteur placé entre la phase λ et la phase κ .

Si $u_{\lambda\kappa}$ est un entier représentant l'état de l'interrupteur avec $u_{\lambda\kappa} = 0$ implique que l'interrupteur $\lambda\kappa$ est

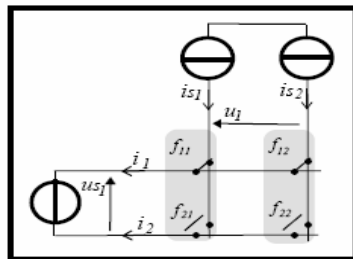
ouvert (le courant qui le traverse est nul) et $u_{\lambda\kappa} = 1$ implique que est fermé (la tension à ses bornes est nulle).

D'une part, à chaque instant, la configuration du convertisseur doit assurer un passage pour le courant de chaque phase de la source de courant. D'autre part, le court-circuit de deux phases de la source de tension n'est pas permis, il entraînerait un surcourant qui détruirait les semiconducteurs. Ces deux conditions conduisent aux équations (1) qui doivent être vérifiées à chaque instant.

$$\begin{aligned} u_{Aa} + u_{Ba} + u_{Ca} &= 1 \\ u_{Ab} + u_{Bb} + u_{Cb} &= 1 \\ u_{Ac} + u_{Bc} + u_{Cc} &= 1 \end{aligned} \tag{1}$$

Dans le cas d'un convertisseur triphasé-triphasé, les conditions des équations (1) ne permettent de trouver que 27 configurations possibles.

b) Convertisseurs matriciel monophasé-monophasé



: Représentation du convertisseur monophasé / monophasé

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} is_1 \\ is_2 \end{bmatrix}$$

$2^4 = 16$

- Combinaison non permise
- Combinaison permise
- S=1 Interrupteur est fermé
- S=0 Interrupteur est ouvert

<u>$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$</u>
<u>$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$</u>	<u>$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$</u>

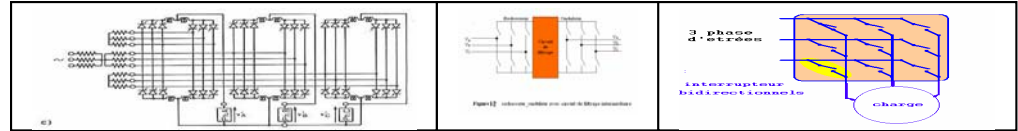
c) Propriétés

La structure du convertisseur matriciel présente un certain nombre d'avantages par rapport à des structures classiques utilisant un bus continu. Deux onduleurs triphasés dos à dos ont les mêmes fonctionnalités qu'un convertisseur matriciel (réversibilité en puissance et harmoniques des courants d'entrée dans les hautes fréquences).

- ✚ **L'encombrement** du circuit de puissance peut être significativement réduit grâce au fait que le condensateur à électrolyte (ou tout autre élément de stockage d'énergie) est éliminé.
- ✚ **Les interrupteurs** d'un convertisseur matriciel peuvent être disposés sur des *bus bars* en arc de cercle ou en triangle. Le convertisseur peut alors être placé directement sur le stator de la machine commandée réalisant ainsi un système très compact.
- ✚ **Nombre de composants** : Deux onduleurs triphasés dos à dos utilisent 12 semi-conducteurs commandés et 12 diodes. Un convertisseur matriciel triphasé-triphasé (constitué d'interrupteurs détaillés par suite) utilise 18 semi-conducteurs commandés et 18 diodes. Pour la même charge, les composants utilisés sont de même calibre.
- ✚ **Pertes** : On peut montrer que les pertes dans les composants sont équivalentes pour les deux structures puisque dans les deux cas le nombre de composants traversés par le courant entre la source et la charge est le même.
- ✚ **Fiabilité** : La suppression du condensateur à électrolyte pour le stockage d'énergie apporte un gain de fiabilité pour le convertisseur. Dans le convertisseur matriciel, la tension efficace aux bornes d'un composant est plus faible, la probabilité de défaillance du composant est donc réduite.
- ✚ **Filtre d'entrée** : Les commutations du convertisseur génèrent des tensions de sortie discontinues à partir de tensions d'entrée sinusoïdales (dans le cas idéal). Réciproquement, les commutations génèrent des courants d'entrée discontinus alors que les courants de sortie sont sans discontinuité (grâce au comportement inductif de la charge). Un filtre est donc nécessaire du côté de la source tension pour réduire les harmoniques des courants absorbés.
- ✚ **Fonctionnement à haute température** : Lorsqu'un fonctionnement à haute température est désiré, cette structure est prometteuse puisqu'un condensateur chimique ne peut pas fonctionner dans ces conditions alors que des semi-conducteurs adaptés à des températures ambiantes supérieures à 200 C° sont d'ores et déjà disponibles sur le marché.
- ✚ **Amplitude maximale des tensions de sortie** Parmi les inconvénients des convertisseurs matriciels, on peut noter que la valeur maximale de la tension efficace de sortie est de seulement 86%

2.2.2 Tableau de comparaison :

Le tableau ci-dessous présente une étude comparative entre les trois structures de convertisseurs les plus utilisés.



	<i>Cycloconvertisseur</i>	<i>Red-On à MLI</i>	<i>Convertisseur matriciel</i>
Technologie	Ancienne	Moderne	En cours de développement
Conversion	AC-AC	AC-DC-AC	AC-AC
Fréquence Limite	40% de $f_{entrée}$	Illimitée	Illimitée
N^{bre} d'interrupteurs	36 Unidirect	18 unidict	09 bidirect.
Qualité du signal de sortie	Acceptable	Bonne	Très Bonne
Complexité	Moyenne	Grandes	Grandes
Pertes	Faibles	Grandes	Pratiquement faible
Poids Physique	Lourd	Moyen	Léger tout

Tableau de comparaison

2.2.3 Les principaux avantages des convertisseurs matriciels sont :

- Une large gamme de variation de la fréquence ;
- Un spectre de fréquence faible pour les grandeurs d'entrée aussi bien que pour les grandeurs de sortie
- Le facteur de puissance à l'entrée peut être amélioré, de plus il peut être imposé par la commande.
- Possibilité de travailler dans les deux sens donc dans les quatre quadrants du plan tension-courant, ce qui permet d'avoir le fonctionnement moteur, aussi bien le fonctionnement générateur

2.2.4 Inconvénients

L'inconvénient principal est qu'il génère de larges courants harmoniques à l'entrée ainsi que des tensions harmoniques à la sortie qui ne peuvent être éliminées facilement par des filtres. Ce problème a été résolu par Mr Venturini en 1980 qui a proposé un nouvel algorithme de commande MLI. Cet algorithme permet d'avoir des courants à l'entrée et des tensions de sortie sinusoïdales. L'inconvénient de cet algorithme est que le rapport de tension est faible. En 1989, Venturini a publié une démonstration mathématique concernant l'amélioration du rapport de tension après avoir modifié l'algorithme original de Venturini.

2.2.5 Interrupteurs

Ils utilisent généralement des IGBT en silicium et des diodes la plupart du temps en silicium, parfois en carbure de silicium (SiC). Mais d'autres composants peuvent être utilisés (Reverse Blocking IGBT, ou pourront être utilisés dans un futur proche (JFET en carbure de silicium).

a) **Interrupteurs composés de diodes et d'IGBT**

Deux structures existent pour réaliser des interrupteurs bidirectionnels à partir de diodes et d'IGBT. Avec la première (Figure 4), les interrupteurs sont constitués d'un pont de diode et d'un seul IGBT. Avec la deuxième (Figure 5), les interrupteurs sont réalisés à partir de deux diodes et deux IGBT soit à émetteurs communs soit à collecteurs communs.

La première structure présente l'avantage de ne posséder qu'un semiconducteur commandé et donc un seul driver par interrupteur. Elle est donc économique mais elle présente deux problèmes:

- le courant traverse trois semi-conducteurs par interrupteur. Les pertes par conduction et chutes de tension sont donc relativement importantes.
- elle est incompatible avec les techniques de commutation.

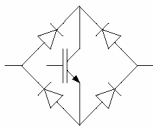


Figure. 4: Structure d'interrupteur utilisant un seul semi-conducteur commandé

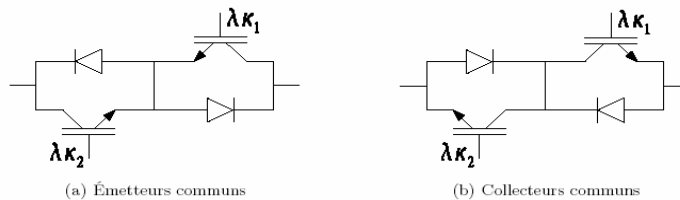


Figure. 5: Structure d'interrupteurs à deux diodes et deux IGBT

b) **Interrupteurs composés de JFET en carbure de silicium**

Une autre structure possible consiste à remplacer les IGBT par des JFET en carbure de silicium (SiC). Ces composants ne sont pas encore facilement disponibles sur le marché, mais les études préliminaires pour leur utilisation dans des convertisseurs matriciels sont prometteuses.

c) **Interrupteurs composés de RIGBT**

Une dernière structure possible est réalisée en utilisant deux *Reverse Blocking IGBT* (Figure 6). Ces composants qui ne sont pas encore largement commercialisés sont unidirectionnels en courants, mais ont la même capacité de blocage en direct et en inverse. Deux de ces composants connectés en antiparallèle sont donc fonctionnellement équivalents au montage 5(b).

2.2.6 Commandes appliquées à un convertisseur

Les commandes appliquées à un convertisseur matriciel associé à une machine tournante que l'on trouve dans la littérature sont des adaptations de commandes pour onduleurs triphasés à deux niveaux. Parmi ces techniques, on a :

- La modulation de largeur d'impulsions
- La modulation de venturini

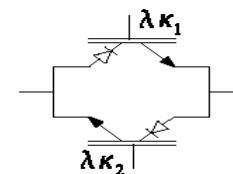


Figure. 6: Interrupteur utilisant deux Reverse Blocking IGBT

➤ La modulation vectorielle.

2.2.7 Protections contre les surtensions

Des surtensions potentiellement destructrices pour les semi-conducteurs peuvent apparaître aux bornes du convertisseur en particulier du côté de la charge. Un dispositif de protection des surtensions est donc indispensable. Le circuit le plus répandu est représenté sur la figure 7, il permet de protéger le convertisseur des surtensions provenant du réseau comme de la charge. Il utilise 12 diodes à recouvrement rapide de calibre nettement inférieur aux diodes utilisées dans le circuit principal et agit comme un écrêteur. Ce circuit peut être réduit à seulement 6 diodes dans le cas où le convertisseur est composé d'un mélange d'interrupteurs à *émetteurs communs* et à *collecteurs communs*.

En cas de coupure inopinée de l'alimentation du système, les circuits de commandes s'arrêtent et tous les IGBT s'ouvrent. L'absence de circuit de roue libre ne permet pas d'évacuer l'énergie stockée dans les inductances de la charge. L'énergie est alors transférée dans ce circuit de protection. Le condensateur peut être dimensionné pour absorber l'énergie stockée dans les inductances du moteur sans dépasser une tension limite.

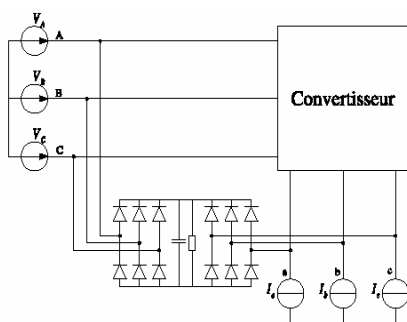


Figure. 7: Protection contre les surtensions à l'aide de ponts de diodes

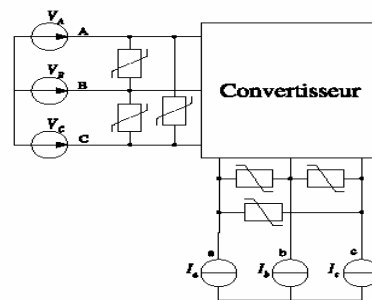


Figure. 8: Protection contre les surtensions à l'aide de varistances

Sinon un condensateur de plus faible valeur peut être utilisé, la résistance est alors associée à un hacheur (comme pour la protection du bus continu des onduleurs classiques) pour dissiper l'énergie et maintenir la tension du condensateur entre des valeurs prédéfinies. Une commande par hystérésis est utilisée pour commander ce hacheur de calibre nettement inférieur au convertisseur. Une solution alternative consiste à utiliser des varistances en parallèle des phases du réseau et de la charge (Figure 8). Cette solution est plus économique et moins encombrante. L'énergie stockée dans les inductances est faible et elle peut être dissipée dans les varistances.