

Chapitre IV : la commande du filtre actif

IV-1-Introduction

Dans ce chapitre on présentera la modélisation respectivement du onduleur de tension triphasé.

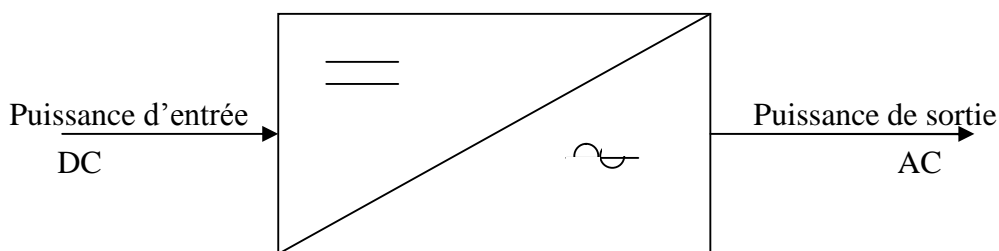
Grâce aux progrès récents dans la technologie des composants de puissance à semi-conducteur, notamment l'IGBT et l'IGCT, les onduleurs de tension à modulation de largeur d'impulsion –MLI- constituent désormais la configuration standard dans la commande des moteurs à courant alternatif de faible et de moyenne puissances.

IV-1-1-Définition

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la convertisseur continu – alternatif, alimenté en continu, il modifie la façon périodique les connections entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir d'alternatif à la sortie.

Dans un onduleur non autonome (ou assisté) relie à un réseau alternatif, c'est celui-ci qui imposé la fréquence dans les onduleurs autonomes, [19]

IV-1-2-Schéma symbolique de l'onduleur



Convertisseur continu (DC)-alternatif (AC)

Fig (IV.1) : Schéma de principe de l'onduleur

IV-1-3-Propriété de l'onduleur

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et de récepteur entre les quels il est monté.

Cela conduit à distinguer :

- Les onduleurs de tension alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimenté par une source de courant continue.

La nature de la source est définie au point de vue des commutations. La nature de la source de tension continue imposée celle du récepteur de courant alternatif .un onduleur de courant alimente un récepteur de tension.[19]

IV-1-4-Domaine d'utilisation

Les onduleurs de tension à fréquence fixe sont utilisés, par exemple, pour réaliser des alimentations des sécurité, on s'efforce alors de maintenir la tension de sortie constante quelle que soit la charge.

Les onduleurs des tensions à fréquence variable servent à réaliser des entraînements à vitesse variable avec moteur à courant alternatif.

Les onduleurs de courant sont utilisés dans les entraînements à vitesse variable des moteurs à courant alternatif.

IV-1-5-Principe générale de fonctionnement

Il existe trois types d'onduleurs monophasés :

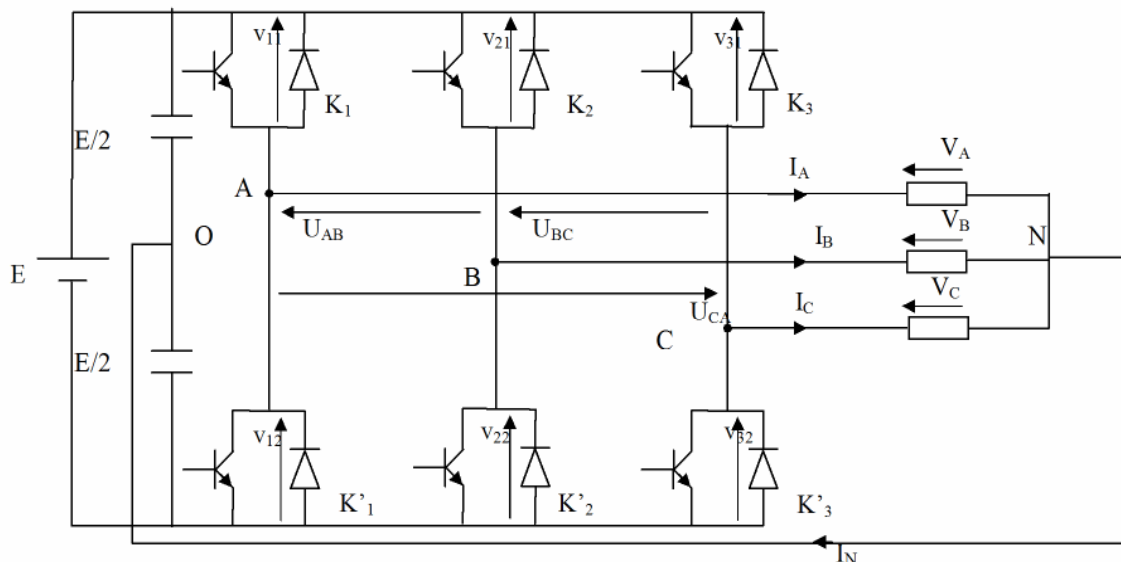
- 1) - l'onduleur avec transformateur de sortie à point milieu (souvent appelé push-pull).
- 2) - l'onduleur avec diviseur capacitif à l'entrée (souvent appelé onduleur en demi pont).
- 3) - l'onduleur en pont (ou en pont complet).

Les deux premiers ne nécessitent que deux - interrupteurs`- mais il faut existe un point milieu, soit du cote de l'entrée continu, soit du cote de la sortie alternative, l'onduleur en pont complet nécessite quatre –interrupteurs.[19]

IV-2-Structure de l'onduleur de tension

On peut réaliser un onduleur triphasé en groupant trois onduleurs monophasés de l'un ou l'autre, il suffit de décaler d'un tiers de période les commandes des trois phases. La **Fig (IV.2)** représente un onduleur tri phases formé de trois demi ponts mon phases et utilisent un diviseurs capacitif commun.

Chacune des tension de sortie est égale tantôt à $(+U/2)$, tantôt à $(-U/2)$. Les interrupteurs fonctionnent comme en monophasé la seule différence est que le courant arrivant au point milieu du diviseur est I_N telle que $I_N = I_A + I_B + I_C$. [19]



Fig(IV.2) : Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance

La présence de neutre relie à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibrée tout particulièrement s'il comporte des charges monophasés montées entre phase et neutre.

Si le récepteur triphasé et équilibré (moteur triphasé par exemple), on peut supprimer la liaisons entre le point neutre 'N' de la charge et le point milieu 'O' du diviseur capacitif, donc supprimer celui-ci on obtient alors l'onduleur de tension en pont triphasés proprement dit repris sur la **Fig (IV.2)**.

IV-2-1-Modèle de commande de l'onduleur de tension

Les interrupteurs K_1 et K_1' , K_2 et K_2' , K_3 et K_3' doivent être complémentaires deux à deux, quelque soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons la commande MLI quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A , B , C et le point milieu (fictif) ' O ' de la source de tension.[19]

$$\begin{aligned} V_A - V_O &= \frac{E}{2} \Rightarrow K_1 \text{ fermé}, -\frac{E}{2} \Rightarrow K_1 \text{ ouvert} \\ V_B - V_O &= \frac{E}{2} \Rightarrow K_2 \text{ fermé}, -\frac{E}{2} \Rightarrow K_2 \text{ ouvert} \\ V_C - V_O &= \frac{E}{2} \Rightarrow K_3 \text{ fermé}, -\frac{E}{2} \Rightarrow K_3 \text{ ouvert} \end{aligned} \quad (IV-01)$$

Les interrupteurs imposent donc les tensions composées à la sortie de l'onduleur ainsi pour la première de ces tensions.

$$\begin{aligned} V_A - V_B &= (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = E \quad \text{Si } K_1 \text{ fermé et } K_2 \text{ ouvert.} \\ V_A - V_B &= (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = 0 \quad \text{Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ fermés.} \\ V_A - V_B &= (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = -E \quad \text{Si } K_1 \text{ ouvert et } K_2 \text{ fermé.} \\ V_A - V_B &= (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = 0 \quad \text{Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ ouverts.} \end{aligned} \quad (IV-02)$$

Son point neutre étant isolé, si le récepteur est équilibré on peut passer des tensions composées aux tensions simples V_A , V_B , V_C à la sortie de l'onduleur.

Pour que, quelle que soit leurs formes d'ondes, les trois courants I_A , I_B , I_C aient une somme nulle, il faut que leurs trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les divers harmoniques.

Si le récepteur est équilibré, si trois phases présentent la même impédance pour le fondamental ainsi que pour les divers harmoniques, les produit impédances ' Z ' courant, c'est -à- dire les tensions ont une somme nulle pour les fondamentaux ainsi que les systèmes harmoniques successifs, on ajoutant toutes ces sommes on obtient la somme nulle des trois tensions.

$$V_C = \frac{1}{3} \cdot (V_C - V_A) - \frac{1}{3} \cdot (V_B - V_C)$$

A cause de l'équilibre du récepteur :

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad \text{entraîne} \quad V_A + V_B + V_C = 0$$

On peut donc écrire :

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} \cdot (V_A - V_B) - \frac{1}{3} \cdot (V_C - V_A) &= \frac{2}{3} \cdot V_A - \frac{1}{3} \cdot V_B - \frac{1}{3} \cdot V_C \\ &= V_A - \frac{1}{3} \cdot (V_A + V_B + V_C) = V_A \end{aligned}$$

$$\text{Et} \quad V_A = \frac{1}{3} \cdot (V_A - V_B) - \frac{1}{3} \cdot (V_C - V_A)$$

Et de même

$$V_B = \frac{1}{3} \cdot (V_B - V_C) - \frac{1}{3} \cdot (V_A - V_B)$$

On obtient finalement :

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot (V_A - V_O) - (V_B - V_O) - (V_C - V_O)] \\ V_B &= \frac{1}{3} \cdot [-(V_A - V_O) + 2 \cdot (V_B - V_O) - (V_C - V_O)] \\ V_C &= \frac{1}{3} \cdot [-(V_A - V_O) - (V_B - V_O) + 2 \cdot (V_C - V_O)] \end{aligned} \quad (\text{IV-03})$$

Si V_{AO} , V_{BO} et V_{CO} sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeur continues), alors V_A , V_B et V_C sont les tensions de sorties de cet onduleur (valeur alternatives), par conséquent, L'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice $[T]$ assurant le passage continu - alternatif (**DC-AC**).

On aura alors :

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{DC}]$$

Avec :

$$[V_{AC}] = [V_A \quad V_B \quad V_C]^T : \text{Tensions alternatifs équilibrés.}$$

$$[V_{DC}] = [V_{AO} \quad V_{BO} \quad V_{CO}]^T : \text{Tension continues.}$$

$$S_i = \begin{cases} 1 \\ ou(exclusif) \\ 0 \end{cases} \quad i=1, 2, 3 \text{ (commutation supposée idéales).}$$

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (IV-04)$$

Ainsi l'onduleur est modélisé par, cette matrice de transfert [T].

IV-3-Stratégie de commande des onduleurs

I-3-1-Introduction

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A faibles fréquence, ils sont pilotés en pleine onde, le signal de commande sera a la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continue doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur). A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante (pont à diode).[18]

A fin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par des différents auteurs pour l'onduleur de tension

Nous étudions les stratégies suivantes :

- 1 -commande à pleine onde ;
- 2 -commande avec MLI ;
- 3 -commande par bande à hystérésis.

L'analyse des différentes stratégies sera basée sur la bande de réglage et le taux d'harmonique des tensions de sorties.

IV-3-2-Commande en pleine onde

a- Principe de commande en pleine onde

Dans ce type de commande, la génération des signaux de commande de l'onduleur est effectuée en transformant un signal sinusoïdal en un signal carré pour chaque phase selon l'algorithme suivant [18].

$$\text{Si } \sin(w.t) > 0 \Rightarrow S(t) = 1$$

$$\text{Si } \sin(w.t) < 0 \Rightarrow S(t) = 0$$

Ou :

$\sin(w.t)$: est le signal sinusoïdal ;

$S(t)$: est le signal carré résultant de commande.

Remarque

1) Si le récepteur est branché en étoile sans conducteur neutre ou en triangle, les harmoniques de tension de rang trois ou multiples de trois sont absents, car ils forment des systèmes homopolaires.

2) Le spectre harmonique de la tension simple **Van**; montre bien que les harmoniques les plus dominants sont d'ordre 5 et 7.

IV-3-3-Commande MLI

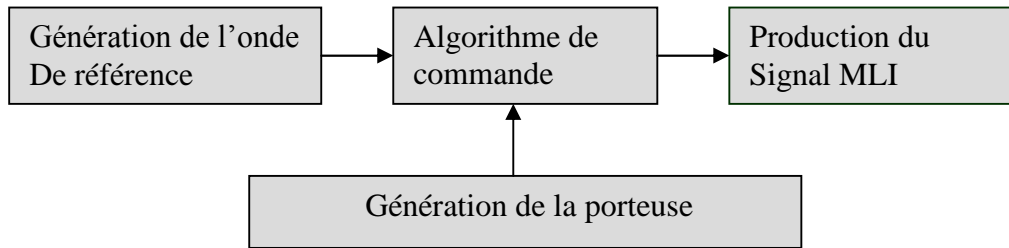
► Principe général

La modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdal est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence dans notre cas courant harmonique identifier par la méthode de puissance instantanée) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

En triphasé, trois références sinusoïdales déphasés de $2\pi/3$ à la même fréquence f_s . Comme à la sortie de l'onduleur, la tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité du courant ne le soit pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seules responsables des parasites ce qui engendre des pertes supplémentaires.[18]

Cette -MLI- sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes :

- 1)- Variation de la fréquence de la tension de sortie ;
- 2)- Elimination de certaines harmoniques de tension ;
- 3)- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées.



Le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant

Avec :

U_{ref} : la tension référence.

U_p : la tension porteuse.

$S(t)$: est le signal -MLI- résultant.

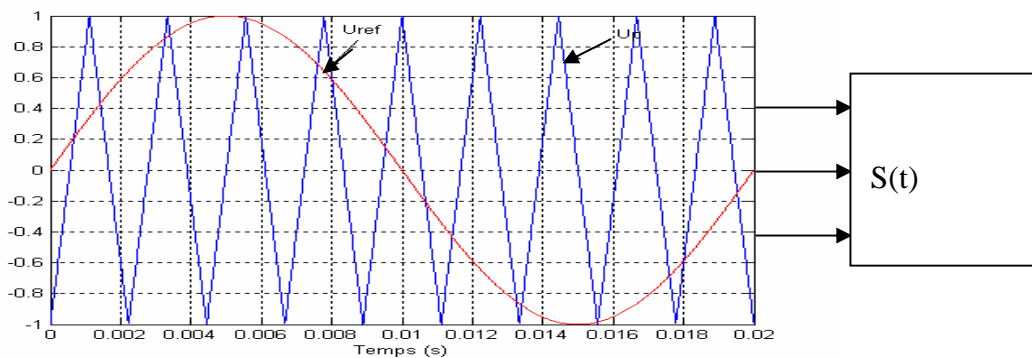


Fig (IV.3) : principe de la commande MLI

► Propriétés

Pour optimiser la MLI en utilise deux paramètres caractérisant cette commande :

m : L'indice de modulation c'est le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur celle du

référence f_{ref} $\left(m = \frac{f_p}{f_{ref}} = \frac{T_{ref}}{T_p} \right)$

r : Le taux de la modulation (le coefficient de réglage en tension). C'est le rapport des

amplitudes de tension de la référence $V_{m\ ref}$ sur celle de la porteuse V_{mp} $\left(r = \frac{V_{m\ ref}}{V_{mp}} \right)$

► Tension de références

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé permettant de générer un système de tension triphasé équilibré directe sont :

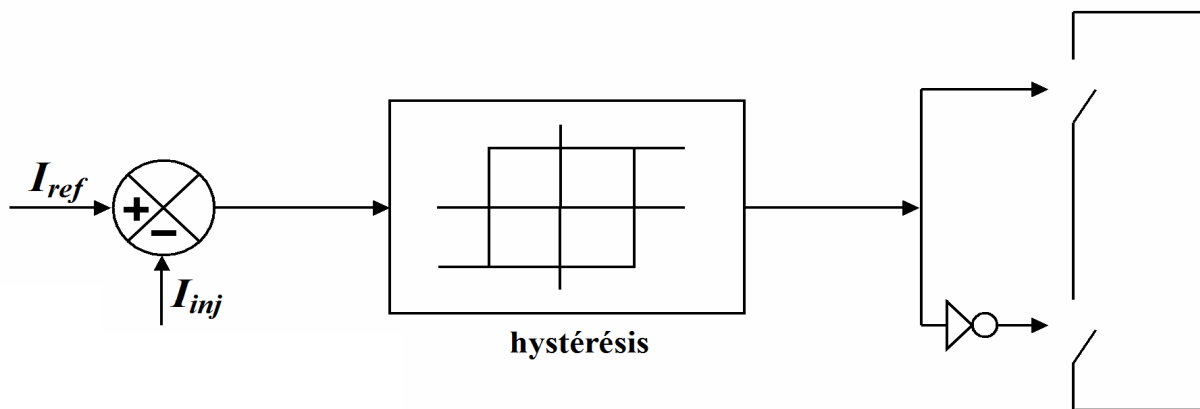
$$\begin{cases} V_{ref\ 1} = V_m \sin(\omega.t - \varphi) \\ V_{ref\ 2} = V_m \sin(\omega.t - \varphi - 2\pi / 3) \\ V_{ref\ 3} = V_m \sin(\omega.t - \varphi - 4\pi / 3) \end{cases}$$

I-3-4-Commande par bande à hystérésis

► Principe

Dans ce cas, la commande est générée par un régulateur à action à deux positions. La différence entre la valeur de consigne ou de référence du courant (i_{ref}) et la valeur mesurée (i) est appliquée à l'entrée d'un régulateur à deux positions, comme représentée par la

Fig(IV-4) [9]



Fig(IV.4) : Principe de la commande par hystérésis

$$\begin{cases} Si |I_{ref} - I| < \Delta_I \Rightarrow S = 1 \\ Si |I_{ref} - I| > \Delta_I \Rightarrow S = 0 \end{cases}$$

Avec : h : étant la bande à hystérésis voir **Fig(IV-4)**.

La fréquence de pulsation est déterminée , d'une part par la bande à hystérésis 'h' du régulateur à action à deux positions et d'autres part par la variation temporelle du courant' i ' cette dernière dépend de comportement de la charge ,

La fréquence de pulsation peut varier selon le point de fonctionnement, tandis que l'ondulation du courant est constante et imposée par l'hystérésis du régulateur à deux positions.[9]

IV-4-Régulation des courants du filtre actif parallèle

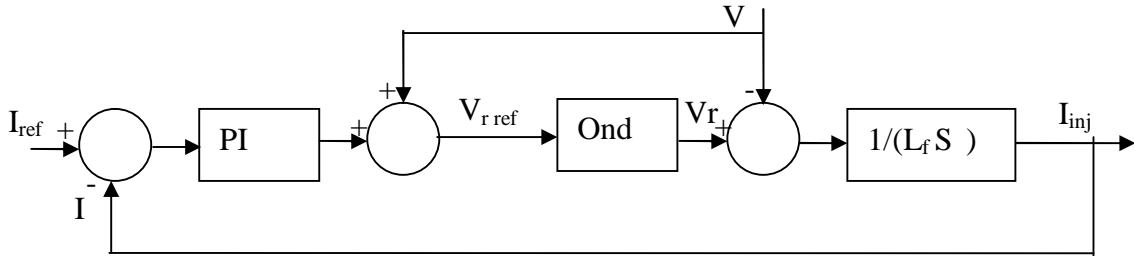
En régime permanent le courant du filtre actif suivra mieux sa référence si la modulatrice est plus proche de la tension de référence théorique.

De l'équation caractérisée le courant de filtre actif :

$$L \frac{d}{dt} \bar{i}_f = \bar{V}_f - \bar{V}_s \quad (\text{IV.5})$$

Notons par

$$\Delta \bar{i}_f = \bar{I}_{ref} - \bar{I}_f \quad (\text{IV-6})$$



Des équations (IV-5) et (IV-6) on obtient l'expression ci-dessous :

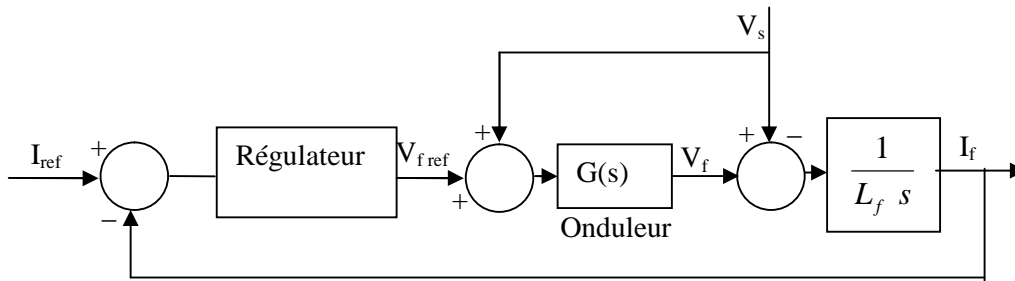
$$L_f \frac{d}{dt} \Delta \bar{i}_f = (\bar{V}_s + L_f \frac{d}{dt} \bar{I}_{ref}) - \bar{V}_f \quad (\text{IV-7})$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (IV-7) peut être défini comme tension de référence (V_{r-ref}) ce qui nous donne l'expression suivant :

$$\bar{V}_{r-ref} \bar{V}_s = \bar{V}_s + L_f \frac{d}{dt} \bar{I}_{ref} \quad (\text{IV-8})$$

L'écart entre $\bar{V}_{f\text{ref}}$ et \bar{V}_f produit alors l'erreur sur le courant selon la relation (IV-8) la tension de référence est composée deux termes à des fréquences différentes le premier reprisent la tension du réseau V_s directement mesurable et le second est égal à chute de tension aux bornes de l'inductance L_f

lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à ce lui de la référence. Ce terme doit être élaboré par du régulateur de courant , **Fig (IV.5)**. [10]

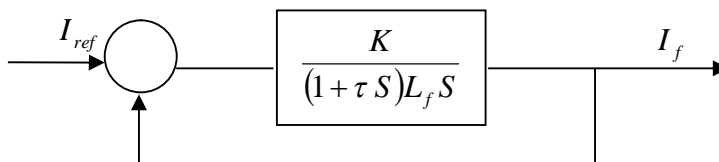


Fig(IV.5) :Schéma de la régulation des courants F.A.P

Dans ce schéma $G(s)$ reprisent l'onduleur qui peut être modélise par la relation suivant

$$\begin{cases} G(s) = k \frac{1}{1 + \tau s} \\ k = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{cases} \quad (\text{IV-9})$$

Avec V_{dc} la tension coté continu de l'onduleur.



Fig(IV.6) : Schéma simplifié de la régulation des courant par

IV-5-Régulateur de la tension continu

La tension moyen aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe, la principale cause susceptible de modifier cette tension est la partie stockage d'énergie dans le filtre actif (interrupteur et filtre de sortie)

Le régulateur de la tension moyen aux bornes de condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentales actifs dans les courants des références

La sortie de régulateur P_c s'agit à un signe près à la puissance active perturbation \bar{P} et donne lieu à un courant fondamentale actifs corrigeant.

La puissance P représentée la puissance active nécessaire pour maintenir la tension de référence souhaitée V_{dc-ref} . [10]

Afin d'obtenir le signal P_c nous utilisant ici un simple régulateur proportionnel car d'une part en régime permanent les courant de référence ne contient pas de composant fondamentale et ne causent pas d'erreur statique sur la tension aux bornes de condensateur et d'autre part la puissance nécessaire compenser les pertes est faible. une action de filtrage préalable sur la tension mesurée V_{de} pour atténuer fluctuation à 300 HZ est réalisée par un filtre passe bas du premier ordre le régulateur ainsi crée à la transfert suivant :

$$G(s) = \frac{k_c}{1 + \tau s} \quad (IV-10)$$

Avec :

K_c : Gain du régulateur

τs : Constante de temps du filtre du premier ordre

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans les inductances de couplage L_f la relation entre la puissance absorbée par le filtre actifs et tension aux bornes de condensateur s'écrit :

$$p_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C V_{dc}^2 \right) \quad (IV-11)$$

Notons que l'équation (IV-11) est linéaire pour des faibles variations de la tension autour de sa référence V_{dc-ref} il peut être linéarisée

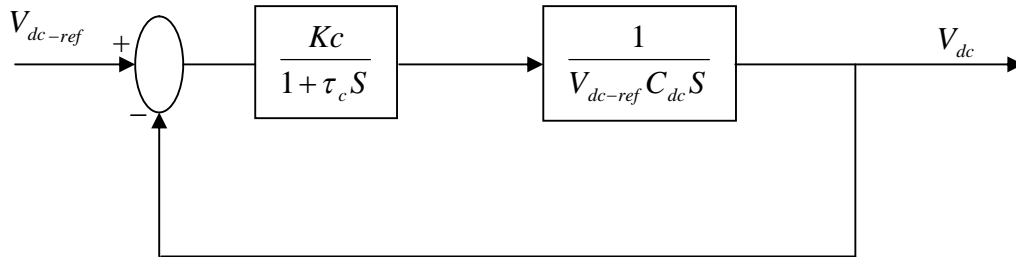
$$p_c = CV_{dc\text{ref}} \frac{d}{dt}(V_{dc}) \quad (\text{IV-12})$$

En utilisant les équations (IV-9) et (IV-11) la régulation de la tension continue put être fonctionnellement représenté par la **Fig (IV.7)** la fonction de transfert en boucle fermé est alors :

$$F_c = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{IV-13})$$

Avec :

$$W_c = \sqrt{\frac{K_c}{CV_{dc\text{ref}}I_c}} \quad \text{Et} \quad \sum_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{CV_{dc\text{ref}}}{K_c\tau_c}} \quad (\text{IV-14})$$



Fig(IV.7) :Boucle de régulation de la tension continu

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de fonctionnement d'un onduleur structure en pont complet de tension.

Et nous avons présenté les différents stratégies de commande de l'onduleur triphasé en pont complet de tension à savoir la stratégie de commande pleine onde et MLI.

La commande pleine onde est riche en harmoniques indésirables surtout dans les rangs faibles. Dans la commande MLI nous constatons qu'à chaque fois qu'on augmente l'indice de modulation r , l'amplitude de l'harmonique fondamental de la tension ondulée augmente de façon linéaire, nous avons montré les performances de l'onduleur de tension et régulation.

Dans le chapitre suivant on va étudier le filtre actif parallèle en utilisant la simulation avec le logiciel « SIMULINK ».