

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حطاب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électrotechnique
Spécialité Machines Électriques

présenté par

FELLAGUE CHEBRA Abderraouf

&

FELLAG Amine

Étude et simulation d'un filtre actif parallèle multi-niveaux

Proposé par : M. GUERGAH

Année Universitaire 2017-2018.

Remerciements

On remercié tous premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, qu'il nous a donné durant toutes ces longues mois. A l'issue de ce travail on tient à adresser notre reconnaissance et nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, à l'accomplissement de cette thèse.

Tout d'abord, on tient à remercier notre encadreur de thèse Madame M. GUERGAIH, Maître-assistant à l'Université SDB, pour l'honneur qu'elle nous a fait d'encadrer ce mémoire, sa disponibilité, ses conseils et sa tolérance. On tient aussi à lui exprimer notre sincère reconnaissance pour l'aide précieuse qu'elle nous 'a apporté et notre profond respect à son égard.

Aussi à Monsieur M. BELAZOUG, Professeur à l'USDB pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la Présidence du jury d'examen de ce mémoire.

Monsieur R. HACHÉLAF, Directeur des études au saint de notre département, pour avoir accepté de faire examiner notre travail

Enfin tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

ملخص:

تم توفير الطاقة الكهربائية كتيار جيبي بحت ، ولكن في الوقت الحاضر ، وبسبب تطور المعدات الإلكترونية التي تسبب اضطرابات في جودة الطاقة الكهربائية لا يتم التحقق من هذه الحالة لحل هذه المشكلة سوف يتم تكريس عملنا للحد من التيارات الغير المتناسقة في الشبكة الكهربائية عن طريق محاكاة حقن عامل التصفية المتوازية متعددة المستويات في الشبكة باستخدام برنامج P-SIM واستخدام طريقة P-Q.

Résumé :

L'énergie électrique est fournie sous forme de courant purement sinusoïdal, mais matériel d'électronique provoque des harmoniques dans le réseau, pour résoudre ce problème notre travail sera consacré à la réduction des courants harmoniques dans le réseau électrique en simulant l'injection d'un filtre actif parallèle multi-niveaux de tension dans le réseau à l'aide du logiciel P-SIM et en utilisant la méthode des puissances instantanés P-Q.

Abstract :

The electrical energy is supplied as a purely sinusoidal current, but nowadays, and because of the development of the electronics equipment that causes disturbances in the quality of electrical energy this condition is not verified to solve this. problem our work will be devoted to the reduction of harmonic currents in the electrical network by simulating the injection of a parallel active filter multilevel voltage in the network using the software P-SIM and using the method of the powers PQ snapshots.

Sommaire

Introduction général.....	01
---------------------------	----

CHAPITRE 1: Introduction Sur Les Harmoniques

1.1 Introduction.....	04
1.2 Définition des harmoniques.....	04
1.3 Les type d'harmoniques.....	05
1.3.1 Décomposition d'un signal périodique.....	05
1.3.2 Représentation spectrale	06
1.4 Source des harmoniques.....	07
1.5 Les Effets Des Harmonique.....	07
1.5.1 Les effets instantanés.....	07
1.5.2 Les effets à terme	08
1.6 Méthodes Réductions des harmoniques	09
b. Filtre amorti	10
a. Filtre résonant	10
1.6.1 Solutions modernes	11
1.6.1.1 Filtre actif série (FAS)	11
1.6.1.2 Filtre actif parallèle (FAP)	12
1.6.1.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	12
1.6.1.4 Le filtre actif série avec un filtre passif parallèle.....	13
1.6.1.5 Filtre hybride.....	13
1.7 Taux de distorsion harmonique THD (%).....	14
1.8. Conclusion.....	14

CHAPITRE 2: Les différentes topologies des onduleurs Les différentes topologies des onduleurs

2.1 Introduction.....	17
2.2 Définition des onduleurs.....	17
2.3. Les applications des onduleurs.....	17
2.4. Onduleur de tension	18
2.5. Onduleur de courant.....	19
2.6. Onduleur de tension triphasée.....	20
2.7. L'onduleur multi niveau.....	21
2.7.1. Principe de fonctionnement des onduleurs multi-niveaux.....	21

2.7.2 Les différentes topologies des onduleurs multi niveau.....	21
a. Onduleur de tension clampé (NPC).....	22
b. Onduleur a condensateurs flottants.....	24
c. Onduleur en cascade.....	24
c.1 Structure d'onduleur en cascade à 3 niveaux de tension	24
c.2 Principe de fonctionnement d'onduleur en cascade à 3 niveaux.....	25
c.3 Structure d'onduleur en cascade à 5 niveaux de tension.....	26
c.4 Principe de fonctionnement d'onduleur en cascade à 5 niveaux.....	26
2.8 Les type de commande des onduleurs.....	28
2.8.1 La modulation par hystérésis (commande en fourchette).....	28
2.8.2 Commande MLI.....	29
2.8.3 La commande vectorielle.....	30
2.9. Conclusion.....	30
CHAPITRE 3 :La structure des filtres actifs et de leurs commandes	
3.1 Introduction.....	34
3.2 Filtrage actif.....	34
3.2.1 Principe du filtre actif.....	34
3.2.2 Structure général d'un filtre actif.....	35
3.2.3 Filtre actifs parallèle.....	35
3.2.3.1 Principe de fonctionnement d'un filtre actif Parallèle.....	35
3.2.3.2 Topologie d'un filtre actif parallèle.....	37
3.2.3.3 les avantages et les inconvénients des filtres actifs parallèles.....	37
3.3 La partie contrôle commande.....	38
3.3.1 La méthode d'identification des courants harmoniques.....	39
3.3.2 Méthode de la puissance instantanée P-Q.....	39
3.4 Algorithme de la commande MLI a cinq niveaux.....	42
3.5 Conclusion.....	44
CHAPITRE 4 : Simulation	
4.1 Introduction.....	46
4.2 Simulation.....	46
4.2.1 Montage d'un réseau électrique alimenté une charge non linéaire	47
4.2.2 Applications aux filtres actifs parallèles.....	48
4.2.2.1. 1 ^{er} cas onduleur de tension deux niveaux.....	48
a. Circuit de puissance.....	48

b. Circuit de commande.....	49
4.2.2.1.1 Résulta de simulation sur PSIM.....	50
4.2.2.2. 2 ^{ème} cas onduleur de tension a cinq niveaux en cascade.....	53
4.2.2.2.1. Résulta de simulation sur PSIM.....	53
4.3. Conclusion.....	56
Conclusion général	59

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans le réseau.

Les courants de source contiennent des harmoniques causés par un déséquilibre dans le système d'alimentation, un déséquilibre des impédances du réseau ou/et un déséquilibre dans le système de commande.

Le modèle du filtre est validé selon une stratégie de commande basée sur la méthode de calcul des puissances active et réactive instantané. Cette dernière a permis d'établir le principe de fonctionnement du filtre actif ainsi que la loi de commande par MLI.

On conclut d'après les résultats de la simulation obtenus qu'à chaque augmentation du nombre de niveau de tension du filtre actif parallèle, les harmoniques du réseau alternatif se réduisent d'une manière efficace ainsi que l'amélioration remarquable du taux de distorsion harmonique. On estime que les résultats obtenus par ce travail sont satisfaisants et que ce type de filtre va connaître une grande évolution avec le développement des lois de commandes.

L'étude et la simulation du filtre actif parallèle multi-niveau pour l'élimination des harmoniques nous a exigé a utilisé tous nos connaissances sur les réseaux électrique et l'électronique de puissance et nous a poussé à rechercher d'avantages dans ces deux domaines, ainsi elle nous a ouvert l'esprit sur le monde de la recherche et nous a permis de nous familiariser avec le logiciel de simulation PSIM.

Par default de temps nous n'avons pas pu augmenter le nombre de niveau de tension du filtre ce qui aurait pu diminuer le THD, c'est pour cela qu'on propose cette augmentation comme perspective pour les générations à venir en souhaitant que ce travail soit bénéfique et pourra servir de référence pour eux.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Représentation d'une onde déformée.....	05
Figure 1.2 : Décomposition d'un signal périodique.....	06
Figure 1.3 : Représentation spectral d'un signal périodique.....	06
Figure 1.4 : Filtre passif résonant.....	10
Figure 1.5: Filtre passif amorti.....	10
Figure 1.6: Filtre actif série.....	11
Figure 1.7: Filtre actif parallèle.....	12
Figure 1.8: Filtre combiné actif parallèle Et passif parallèle.....	12
Figure 1.9: Filtre combiné actif Série et passif parallèle.....	13
Figure 2.1 : schéma de principe d'onduleur.....	17
Figure 2.2: Onduleur de tension en pont.....	18
Figure 2.3: Onduleur de courant en pont monophasé forme d'onde des courants.....	19
Figure 2.4 : Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé.....	20
Figure 2.5 : principe des onduleurs multi niveaux.....	21
Figure 2.6 : représente les topologies des onduleurs multi niveaux.....	22
Figure 2.7 : Onduleur NPC à trois niveaux.....	22
Figure 2.8 : Onduleur NPC à quatre niveaux.....	23
Figure 2.9: Onduleur de tension clampé par le neutre à n -niveaux.....	23
Figure 2.10 : structure d'Onduleurs FC à trois et à quatre niveaux (par phase).....	24
Figure 2.11 : Structure d'onduleur en cascade à 3 niveaux.....	25
Figure 2.12 : Séquence de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux.....	25
Figure 2.13 : schéma d'onduleur a cinq niveaux.....	26
Figure 2.14 : Séquence de fonctionnement d'un bras d'onduleur cinq niveaux.....	27
Figure 2.15 : Principe de la commande en fourchette.....	29
Figure 2.16 : Principe de la commande en MLI.....	29
Figure 3.1 : Les différents types de filtres actifs.....	34
Figure 3.2 : Structure générale d'un filtre actif.....	35
Figure 3.3: schéma de principe d'un FAP.....	36
Figure 3.4 : Bloc fonctionnel de calcul des courants de référence.....	38
Figure 3.5 : Transformation d'axe « abc » à « α - β »	

.....	39	Figure 3.6 : Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q.....
.....	41	Figure 3.7 : Référence comparé avec quatre porteuses pour le 5 niveau.....
.....	43	Figure 3.8 : Tension simple délivré par l'onduleur à cinq niveaux de tension (m=100)....
.....	43	Figure 4.1 : montage du réseau alimente charge non linéaire
.....	47	Figure 4.2 : Allure de isa avant de mettre le filtre actif.....
.....	48	Figure 4.3: courant isa et la tension vsa.....
.....	48	Figure 4.4:Circuit de puissance de filtre actif parallèle de deux niveau établi sous PSIM....
.....	49	Figure 4.5 : Circuit général de filtre actif parallèle de deux niveaux tension.....
.....	50	Figure 4.6 : les tension de la source Vs1,Vs2,Vs3.....
.....	51	Figure 4.7 : Les courants de référence Iref1, Iref2 ,Iref3.....
.....	51	Figure 4.8 : les courants injecté au réseau d'alimentation Inj1,Inj2,Inj3.....
.....	52	Figure 4.9 : allure de isa après de mettre le filtre actif a deux niveaux de tension
.....	52	Figure 4.10 : Circuit général de filtre actif parallèle a cinq niveaux de tension
.....	53	Figure 4.11 : les tension de la source Vs1 ,Vs2 ,Vs3.....
.....	54	Figure 4.12 :Les courant de référence Iref1,Iref2I,ref3
.....	54	Figure 4.13 : les courants injecté au réseau d'alémantation Inj1,Inj2,Inj3.....
.....	55	Figure 4.14 : Allure de isa après de mettre le filtre actif a deux niveaux de tension.....

LISTE DES TABLEAUX

Tableau2.1 : Le tableau suivant résumer les 3 états de séquence possible.....	26
Tableau2.2 : Le tableau suivant résumer les 5 états de séquence possible.....	28
Tableau4.1 : paramètres de simulation du réseau et charge non linéaire.....	47
Tableau4.2 : paramètre de simulation d'onlduleur deux niveaux.....	50
Tableau4.3 : paramètre de simulation d'onlduleur cinq niveaux.....	53

1.1 Introduction :

Le réseau électrique triphasé est toujours exposé au risque des perturbations ou de déséquilibre à cause des équipements électriques utilisés dans le domaine d'industrie ou domestique tel que les gradateurs, les redresseurs, les outils informatiques, le matériel de climatisation, et mêmes qui absorbent des courants non sinusoïdaux ; ce qui cause l'apparitions des harmoniques au niveau du réseau électrique, ces harmoniques influent sur certaines équipements même elles peuvent les endommagés complétements.

Dans ce chapitre suivant, nous définissons les harmoniques et les différents types de ces derniers ensuite nous parlons sur leurs sources excités et quelles sont les effets provoqués dans le réseau électrique à la fin du chapitre nous citons les méthodes utilisés pour réduire ou bien éliminés les harmoniques.

1.2 Définition des harmoniques :

Le terme 'Harmonique' a été originalement utilisé en relation avec le son et signifiait la vibration d'une corde ou d'une colonne d'air à fréquence multiple de celle du fondamental. En génie électrique les harmoniques c'est un signal périodique de fréquence (f) et de forme quelconque, qui peut se décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant :

- Un signal sinusoïdal à la fréquence fondamentale. Courbe fondamentale,
- Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental : Les harmoniques,
- Une éventuelle composante continue.

Chacun des harmoniques est caractérisé par une amplitude généralement exprimée en pourcentage de l'amplitude du fondamental et par une phase.

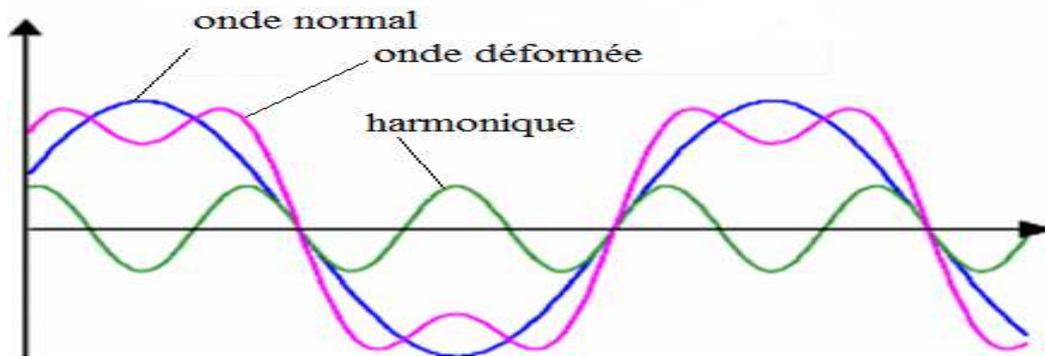


Figure1.1: Représentation d'une onde déformée

1.3 Les types d'harmoniques :

1.3.1 Décomposition d'un signal périodique :

Toute fonction périodique de fréquence « f » peut être représentée par une somme composée :

- D'un terme sinusoïdal appelé le fondamental de fréquence f et de valeur efficace Y_1 .
- De termes sinusoïdaux appelés harmoniques dont les fréquences sont n fois la fréquence du fondamental et de valeurs efficaces Y_n .
- D'une éventuelle composante continue de valeur Y_0 .

Cette somme est aussi appelée série de Fourier, elle est donnée par l'expression :

$$y(t) = y_1\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi_1) + \dots + y_n\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi_n) + y \dots \dots \dots (1.1)$$

Ou bien : $y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} y_n \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi_n) \dots \dots \dots (1.2)$

Les courbes de la figure 1.2 nous montrent la décomposition d'un signal période en série de Fourier.

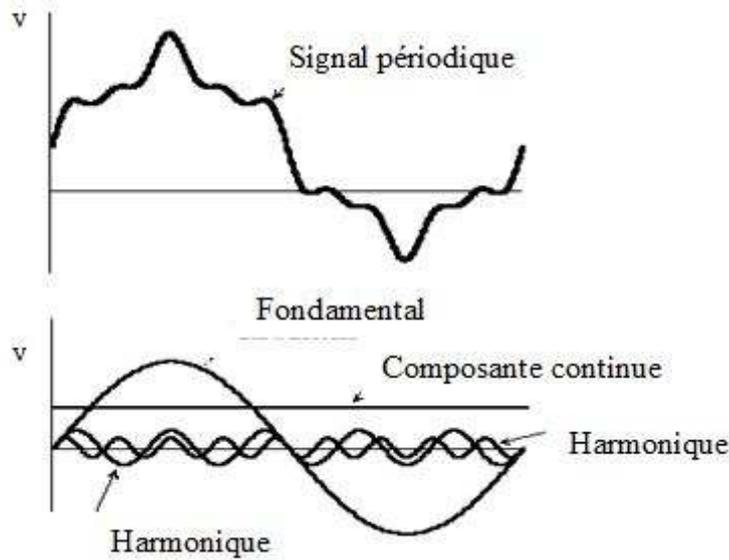


Figure1.2 : Décomposition d'un signal périodique

1.3.2 Représentation spectrale :

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous forme d'un spectre dans la figure 1.3, c'est à dire à l'aide d'un schéma où l'on porte abscisse la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pour cent) .

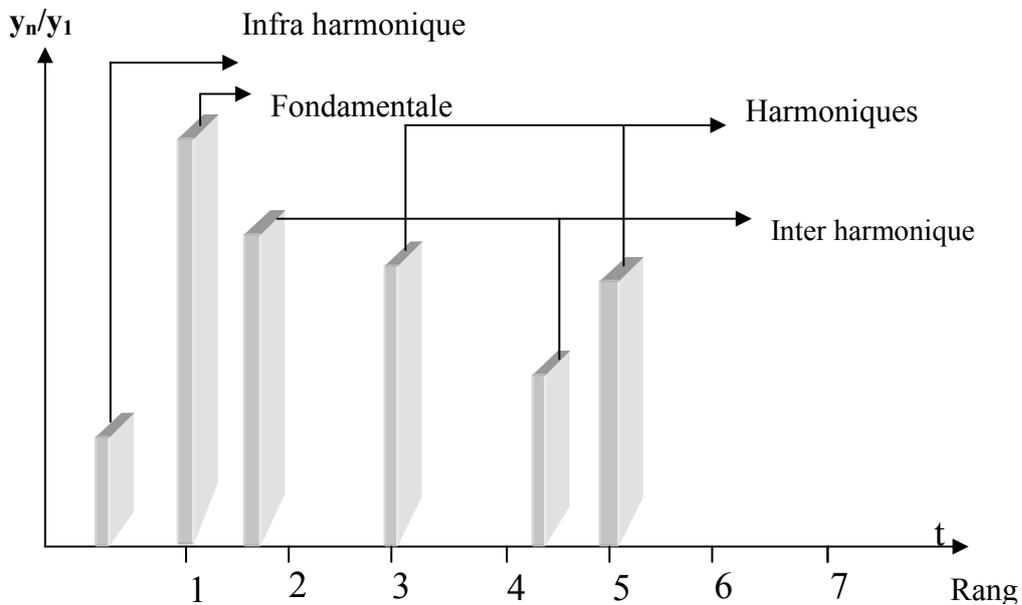


Figure1.3 : Représentation spectral d'un signal périodique

1.4 Source des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique [2].

Quelques récepteurs principaux qui provoquent les harmoniques :

- Démarreurs électroniques.
- Variateurs de vitesse pour les moteurs asynchrone et moteurs à courant continu.
- Redresseurs, / Chargeurs d'onduleurs
- Chargeurs de batterie
- Inductances saturables
- Appareils domestiques : téléviseurs, magnétoscopes, lampes à décharge.
- Gradateurs de lumière, de chauffage
- Micro-informatique : alimentation à découpage (PC, modems, imprimantes,...)

1.5 Les Effets Des Harmonique :

1.5.1 Les effets instantanés:

Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent le passage à zéro de la tension. Les compteurs d'énergie à induction présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques.

Les récepteurs de télécommande centralisée à fréquence musicale utilisée par les distributeurs d'énergie peuvent être perturbés par des tensions harmoniques de fréquence voisine de celle utilisée par le système. Nous évoquerons plus loin d'autres causes de perturbation de ces relais liées aux impédances harmoniques de réseau.

Vibrations, bruit Par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants harmoniques généreront des vibrations, des bruits

acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances). Des couples mécaniques pulsatives, dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes.

Perturbations induites sur les lignes à courants faibles (téléphone, contrôle-commande) Des perturbations surviennent lorsqu'une ligne à courants faibles chemine le long d'une canalisation de distribution électrique avec courants et tensions déformés. Les paramètres tels que : longueur du cheminement parallèle, distance entre les deux circuits, fréquence des harmoniques (le couplage augmente avec la fréquence), sont à prendre en compte [1]

1.5.2 Les effets à terme :

Se rapportent essentiellement aux machines tournantes, aux transformateurs et aux condensateurs, ce qui se manifeste par des échauffements supplémentaires et l'augmentation du niveau sonore. Il en découle la destruction de matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique. La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les :

a. Transformateurs : ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques. Ces derniers produisent pertes supplémentaires des transformateurs dues à l'effet de peau (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence), à l'hystérésis et aux courants de FOUCAULT (dans le circuit magnétique).[2]

b. câbles électriques : Les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, d'où une élévation de température. La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes[1]

c. alternateurs: pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liées à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces pertes provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines [2]

d. moteurs à courant alternatif: pertes supplémentaires dans les machines, dans leur stator (cuivre et fer), et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) par suite des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor [1]

e. condensateurs: ils sont aussi très affectés par les courants harmoniques. Les condensateurs branchés en parallèle sur les réseaux pour la compensation de la puissance

réactive (correction du facteur de puissance) ont des impédances d'autant plus faibles que la fréquence est élevée [2]

Les courants harmoniques se superposent au courant fondamental et causent des pertes supplémentaires qui peuvent excéder la capacité thermique des condensateurs et réduire considérablement leur durée de vie. De plus, des phénomènes de résonance peuvent survenir et soumettre les condensateurs à des surtensions, lesquelles sont susceptibles de les dégrader, voire de perforer leur isolation

1.6 Méthodes Réductions des harmoniques :

Pour diminuer les perturbations en tension ou en courant, il est possible d'agir à deux niveaux:

1. Du côté de la source en filtrant la tension du réseau ou en améliorant le réseau de transport et celui de distribution ;
2. Du côté du client en rendant le courant de ligne le plus sinusoïdal possible.

Plusieurs solutions ont été envisagées pour limiter la propagation des harmoniques et améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique. Elles peuvent être classées en deux catégories, classiques et modernes.

Ils existent plusieurs méthodes classiques de dépollutions des harmoniques et qui sont :

- Augmentation de l'indice de modulation ;
- Inductance de lissage des courants ;
- Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs ;
- Confinement des harmoniques ;
- L'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques [3, 4,5]
- Filtres passifs utilisant des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des condensateurs [3,6].

Comme les filtres passifs sont importants dans la pratique nous citons les différents types existés :

a. Filtre résonant :

Le filtre shunt résonant est constitué par la branche R- L-C la figure 1.4 montre clairement le montage de ce dernier dont la fréquence d'accord est placée sur la fréquence de la tension harmonique que l'on veut éliminer.

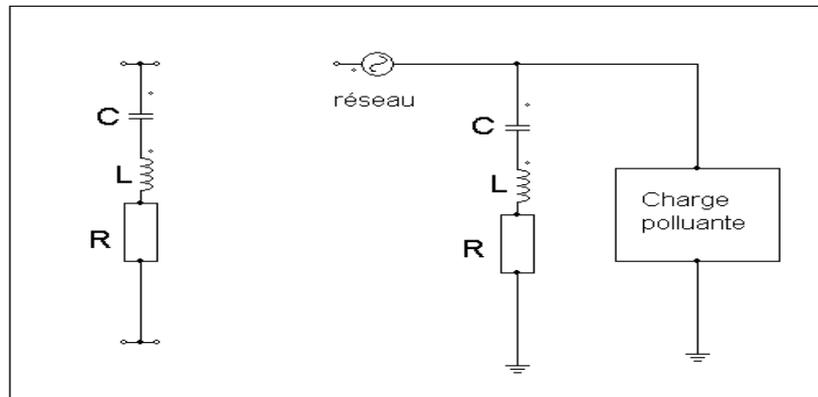


Figure 1.4 : Filtre passif résonant

b. Filtre amorti :

Le filtre passif amorti comprend les mêmes composants que le filtre passif résonant, sauf que la résistance est placée en parallèle avec l'inductance, cette résistance est appelée résistance d'amortissement. La figure 1.5 montre le montage de ce type de filtre, il n'est efficace que si le fond d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé.

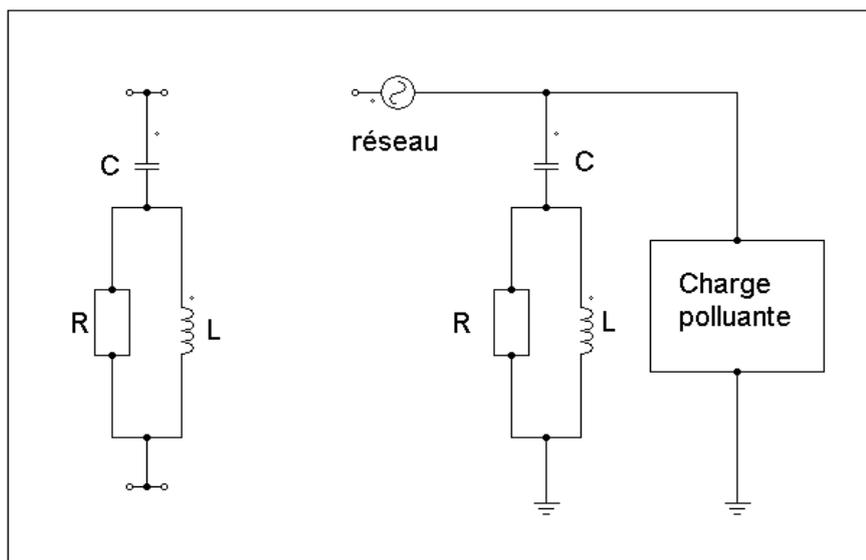


Figure 1.5: Filtre passif amorti

1.6.1 Solutions modernes :

L'avènement de l'électronique de puissance et l'apparition de nouveaux Semi-conducteurs de puissance tel que MOSCT, MOSFET, IGBT, a fait que de nouvelles méthodes de dépollution des harmoniques viennent remplacer les méthodes traditionnelles. Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance).

Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux)
- Le filtre actif hybride (série, parallèle).

1.6.1.1 Filtre actif série (FAS) :

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [2]

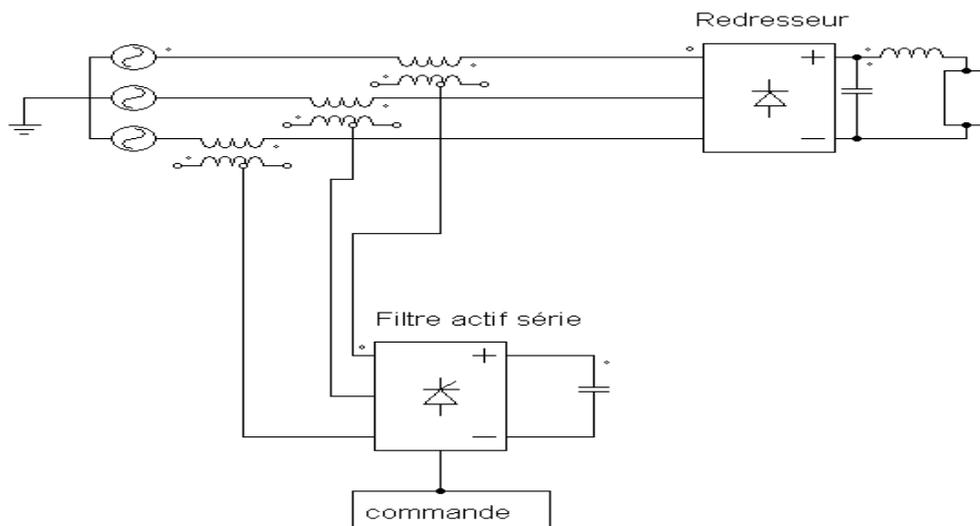


Figure 1.6: Filtre actif série

1.6.1.2 Filtre actif parallèle (FAP) :

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal [2]

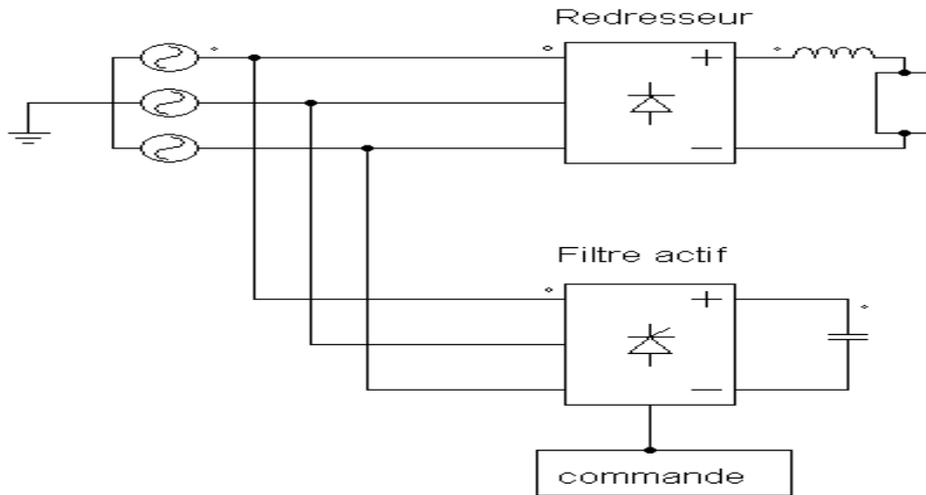


Figure 1.7: Filtre actif parallèle

1.6.1.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :

Dans ce cas les éléments du filtre passif sont accordés sur une fréquence élevée afin de compenser les courants harmoniques de rang élevé tandis que le filtre actif s'occupe des harmoniques de basses fréquences[7,8]. Ce type de filtre a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo convertisseur de forte puissance[9].

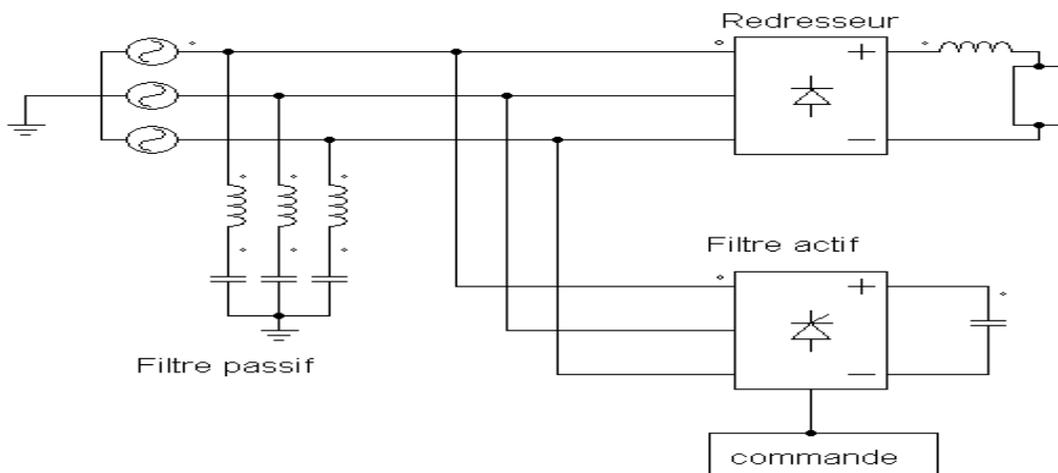


Figure1.8 :Filtre combiné actif parallèle Et passif parallèle

1.6.1.4 Le filtre actif série avec un filtre passif parallèle :

Le rôle du filtre actif série est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les faire passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.

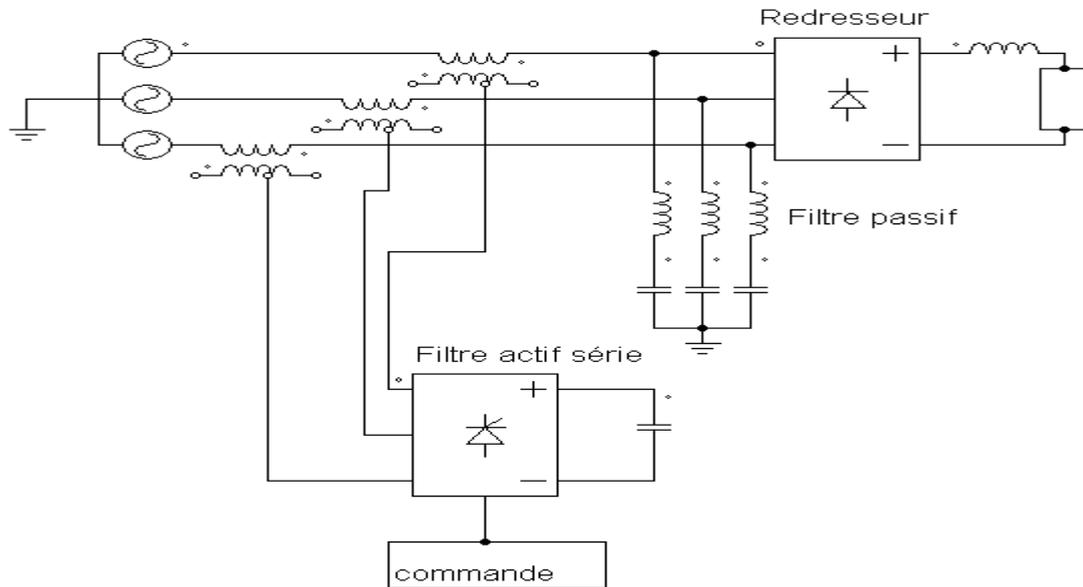


Figure1.9 : Filtre combiné actif Série et passif parallèle

1.6.1.5 Filtre hybride :

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs. [2]

1.7 Taux de distorsion harmonique THD (%) :

Le taux individuel d'harmonique est défini comme le rapport (en %) entre la valeur efficace des harmoniques à celle de la valeur efficace du fondamental

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2}}{C_1} \quad (1.3)$$

Selon la sensibilité des appareils, des rangs plus ou moins élevés, sont pris en compte. La tendance actuelle dans les normes est de considérer les harmoniques jusqu'au rang $h = 50$.

Précisons que, dans les normes CEI, on trouve une autre définition du *THD*.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} C_h^2}}{S_{eff}} \quad (1.4)$$

1.8. Conclusion :

Dans ce premier chapitre on a identifié l'origine et les effets des harmoniques ainsi que la définition de leurs méthodes de réduction nous passons aux généralités des onduleurs on se basant sur les onduleurs multi-niveaux et leurs commandes.

2.1 Introduction :

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la conversion continue alternatif. Ces dernières années, les convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des différents domaines. Il existe plusieurs types d'onduleurs, dont on trouve les onduleurs multi niveaux. Ces derniers peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux. Dans ce chapitre nous allons lever le voile sur la structure des convertisseurs multi-niveaux.

2.2 Définition des onduleurs :

L'onduleur est un convertisseur statique de l'électronique de puissance, qui permet de faire la conversion continue-alternative, on alimente les onduleurs par une tension continue, ils permettent d'alimenter un récepteur par une tension alternative, un onduleur est constitué d'interrupteurs électroniques (transistors de puissance ou thyristors), on peut commander ses interrupteurs par plusieurs techniques, pour gérer les créneaux de tension on utilise la méthode la plus utilisée, la commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Width Modulation).

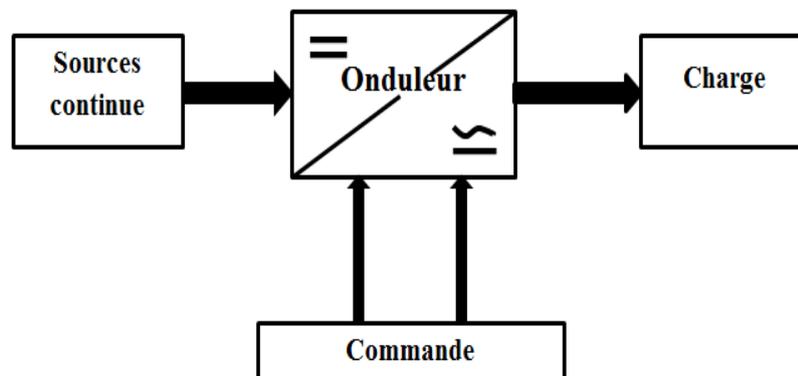


Figure 2.1 : schéma de principe d'onduleur

2.3. Les applications des onduleurs :

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement :

- Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonomes [10,13].

- Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcées : Alimentés à partir de redresseur, pour varier la fréquence et de la valeur efficace pour appliquer dans la variation de la vitesse de rotation des moteurs électriques ou des filtre actif pour dépolluer réseau d'alimentation.

2.4. Onduleur de tension :

On alimente un onduleur de tension par une source de tension continue, Nous présentons dans ce cas-là le principe d'onduleur de tension monophasée, sa structure est en pont, l'onduleur en pont à quatre interrupteurs commandés **K1, K2, K1', K2'**

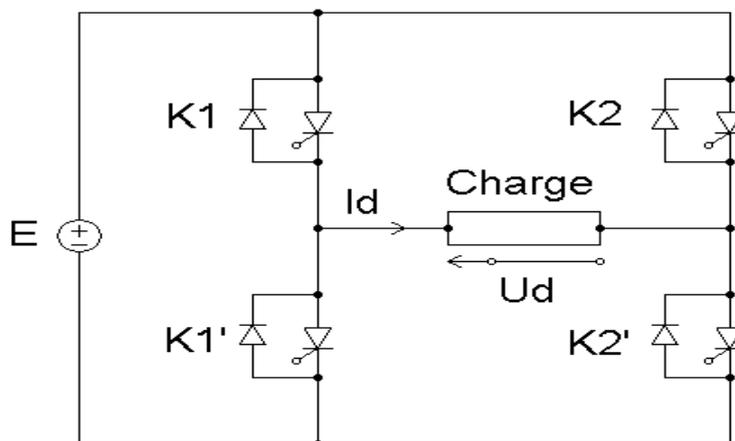


Figure 2.2: Onduleur de tension en pont

Les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de $U_d(t)$ comme suit:

Si la tension d'entrée de l'onduleur est constante et égale à U , quel que soit I on a :

- Pour $0 < t < T / 2$: les interrupteurs, $K1, K2'$ sont fermés, et $K2, K1'$ sont ouverts.

D'où: $U_d = +U$ (2.1)

- Pour $T / 2 < t < T$: les interrupteurs, $K2, K1'$ sont fermés, et $K1, K2'$ sont ouverts.

D'où: $U_d = -U$ (2.2)

Le courant de la sortie est donc le courant I à l'entrée, il dépend de la charge placée du côté alternatif.

Notant que les interrupteurs K_i de l'onduleur; Figure 2.2, sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur T_i commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une diode D_i ; Cette

dernière assure la continuité de courant, permettant ainsi la conduction d'un courant négatif dans le cas où le courant est déphasé par rapport à la tension de sortie [11,12].

2.5. Onduleur de courant :

On appelle onduleur de courant, un onduleur qui est alimenté par une source de courant continue. Comme exemple, on prend le montage de la figure ci-dessous illustrant le modèle d'un onduleur de courant monophasé, qui se compose de quatre interrupteurs de puissance **K1, K2, K1' et K2'**,

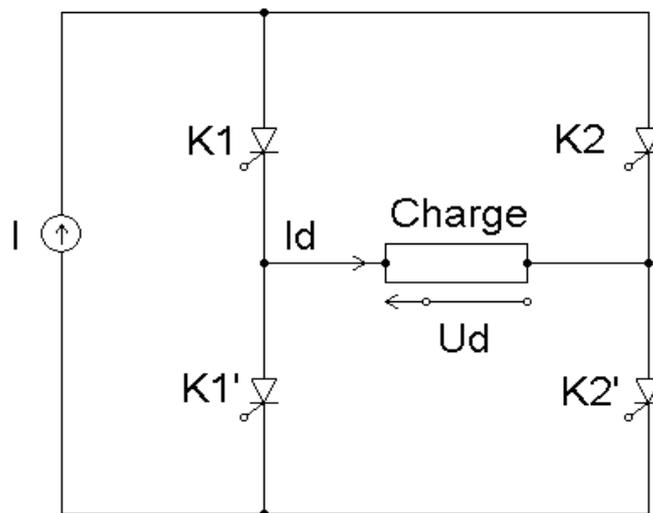


Figure 2.3: Onduleur de courant en pont monophasé forme d'onde des courants

De même, pour l'onduleur de courant, les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de $i_d(t)$. Si le courant d'entrée de l'onduleur est constant et égal à I , quel que soit U :

- Pour $0 < t < T / 2$: les interrupteurs, $K1, K2'$ sont fermés, et $K2, K1'$ sont ouverts :
D'où:

$$i_d = +I \dots\dots\dots(2.3)$$

- Pour $T / 2 < t < T$: les interrupteurs, $K2, K1'$ sont fermés, et $K1, K2'$ sont ouverts
D'où:

$$i_d = -I \dots\dots\dots(2.4)$$

La tension $U_d(t)$ de la sortie est donc la tension U à l'entrée, elle dépend de la charge placée dans le coté alternatif. Dans ce cas; l'interrupteur est formé d'un semi-conducteur commandé à l'ouverture et la fermeture, il n'a pas à être réversible en courant, alors on n'a pas besoin de diode mise en parallèle, [11,12].

2.6. Onduleur de tension triphasée :

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de 120° . En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représenté par la Figure 2.4 dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension continue U ne soit jamais en court-circuit et pour que les circuits des courants i_a , i_b , et i_c ne soient jamais ouverts. Afin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quelques soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant ; Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle. Ces interrupteurs peuvent être réalisées, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaires, des IGBTs ou des GTOS associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant [11,12,13].

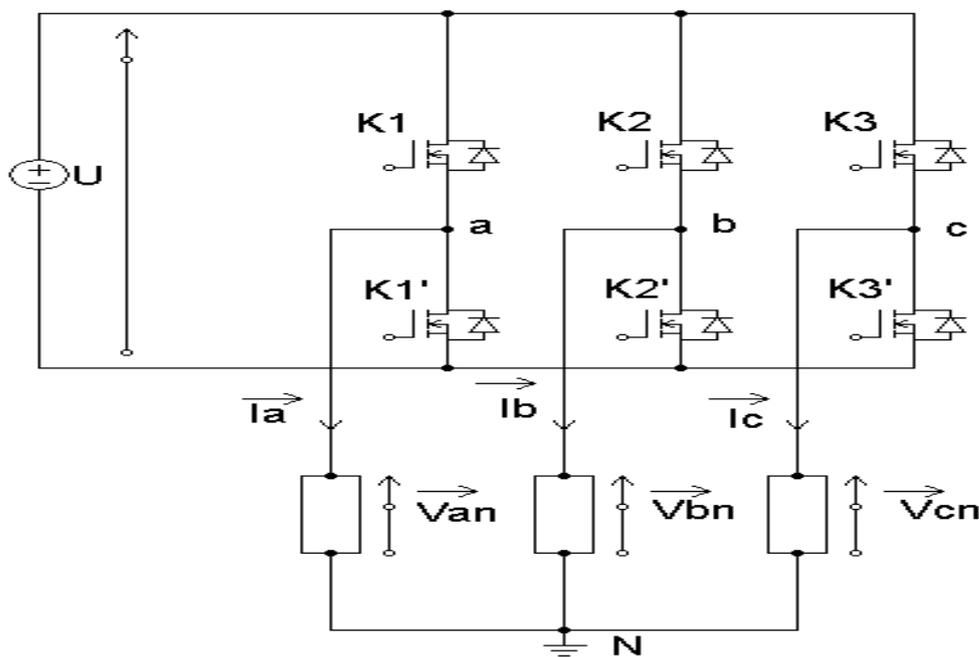


Figure 2.4 : Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé

2.7. L'onduleur multi niveau :

2.7.1. Principe de fonctionnement des onduleurs multi-niveaux :

On peut dire qu'un convertisseur statique est multi niveau lorsqu'il génère plusieurs niveaux de tension à sa sortie, la Figure.2.5 donne le principe de base d'un onduleur multi-niveau,

- Le schéma (a) représente un convertisseur à deux niveaux, la tension de sortie prend la valeur 0 ou E.
- Le schéma (b) représente un convertisseur à trois niveaux, la tension de sortie prend la valeur 0, E ou -E.
- Le schéma (c) représente un convertisseur de n niveaux le cas général de plusieurs niveaux de tension, la tension de sortie prend la valeur : 0, E ou $n \cdot E$.

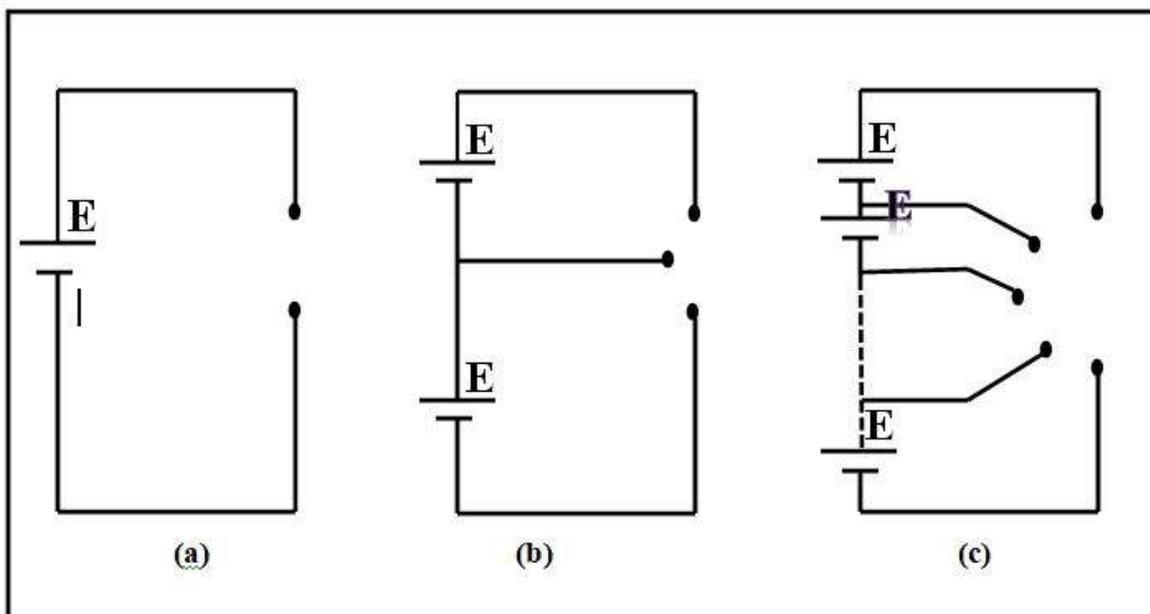


Figure 2.5 : principe des onduleurs multi niveaux

2.7.2 Les différentes topologies des onduleurs multi niveau

Dans cette séquence nous avons présenté les différents types des onduleurs, la topologie d'onduleur basé sur leur connexion des composants et l'association.

On a trois topologies les plus récentes : l'onduleur en cascade, l'onduleur à diode de bouclage, et l'onduleur à capacités flottantes.

Figure 2.6 : Représentation des topologies d'onduleurs multi niveaux [14]

a. Onduleur de tension clampé (NPC)

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi-niveau est le NPC (*Neutral-Point-Clamped*). Elle a été proposée, la première fois en 1980, par *Nabae et Al.* L'onduleur NPC à trois niveaux est donné par la figure 2.7[15,16 ,17].

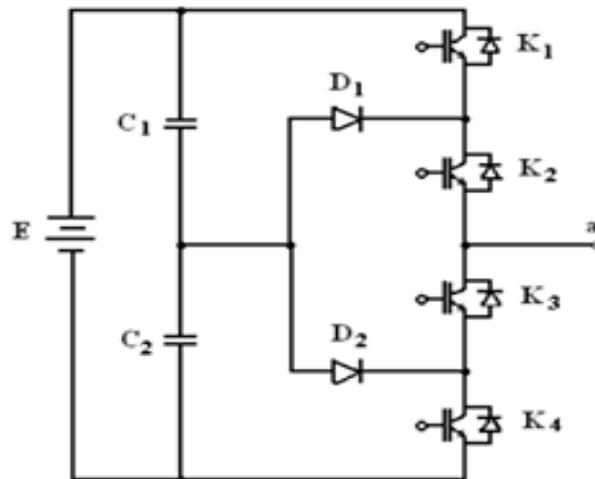


Figure 2.7 : Onduleur NPC à trois niveaux

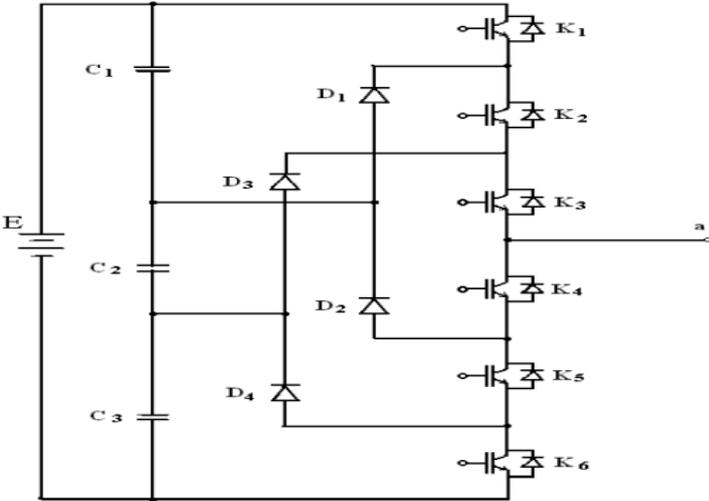


Figure 2.8 : Onduleur NPC à quatre niveaux

La figure ci-dessous représente la structure d'un onduleur NPC à n-niveaux

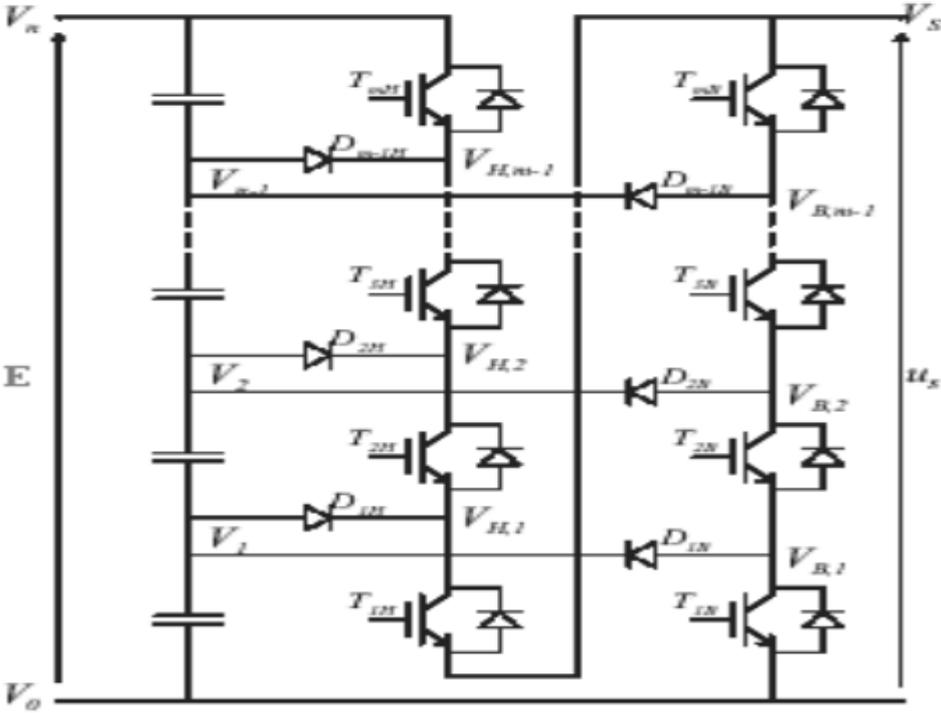


Figure 2.9: Onduleur de tension clampé par le neutre à n-niveaux

b. Onduleur a condensateurs flottants [18, 19]

Le convertisseur à condensateurs flottants (Flying Capacitor Multilevel Inverters) ou convertisseur multicellulaire est une topologie où les deux diodes de calage du convertisseur NPC ont été remplacées par un condensateur. Elle est apparue au début des années 1990 à la suite d'un brevet déposé par Meynard et Foch Cet onduleur est obtenue par raccordement de cellules de condensateurs de bouclage. Les combinaisons de fonctionnement sont les mêmes que pour la topologie NPC. Chaque bras d'un convertisseur monophasé 5 niveaux contient 4 interrupteurs, 4 diodes et une capacité. Pour un convertisseur à capacité flottantes de n niveaux, chaque bras doit contenir $(2n-2)$ interrupteurs et $(n-2)$ capacités. Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs.

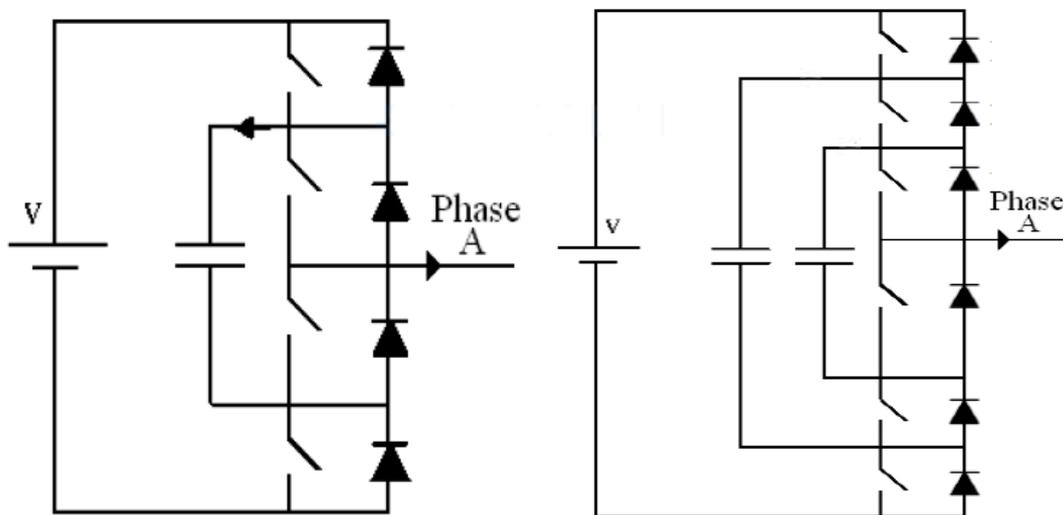


Figure 2.10 : Structure d'Onduleurs FC à trois et à quatre niveaux (par phase)

c. Onduleur en cascade :

Une des premières applications des connexions en série des topologies des convertisseurs monophasés en pont était pour la stabilisation de plasma en 1988 [20]. Cette approche modulaire a été étendue pour inclure aussi les systèmes triphasés.

Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série de telle sorte que l'onde de la tension synthétisée soit la somme des tensions de sortie.

c.1 Structure d'onduleur en cascade à 3 niveaux de tension :

La structure des trois bras d'onduleur trois niveaux de type cascade en pont H est identique à celui d'un onduleur classique monophasé en pont complet voir figure 2.13.

Cependant la technique de commande est différente ce qui permettra d'avoir les trois niveaux de tension.

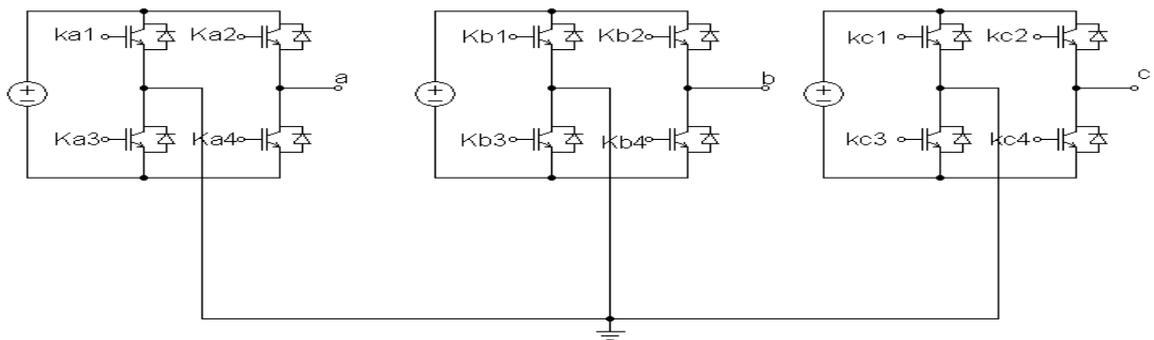


Figure2.11 : Structure d'onduleur en cascade à 3 niveaux

c.2 Principe de fonctionnement d'onduleur en cascade à 3 niveaux :

Dans l'onduleur en cascade à 3niveauxnous avons trois séquences de Fonctionnement possibles:

- Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteursK1, K4 sont ouverts et K2, K3sont fermés comme le montre la figure 2.14(b). Et la tension de sortie Vao est: $V_{ao}=+E$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K4vaut: $+E$

- Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2sont ouverts et K3, K4sont fermés comme le montre la figure 2.14(c). Et la tension de sortie Vao est: $V_{ao}=0$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K2 vaut: $+E$.

- Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K4sont fermés et K3, K2sont ouvert comme le montre la figure 2.14(a). Et la tension de sortie Vao est: $V_{ao}=-E$ La tension inverse appliquée aux interrupteurs K3, K2vaut: $+E$

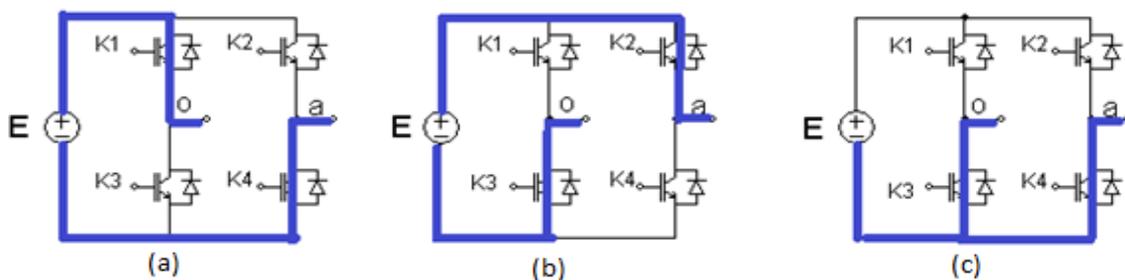


Figure2.12 : Séquence de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux

Le tableau suivant résumer les 3 états de séquence possible

K1	K2	K3	K4	Vao
0	1	1	0	+E
0	0	1	1	0
1	0	0	1	-E

Tableau2.1

c.3 Structure d'onduleur en cascade à 5 niveaux de tension :

La structure d'un convertisseur multi-niveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure 2.13

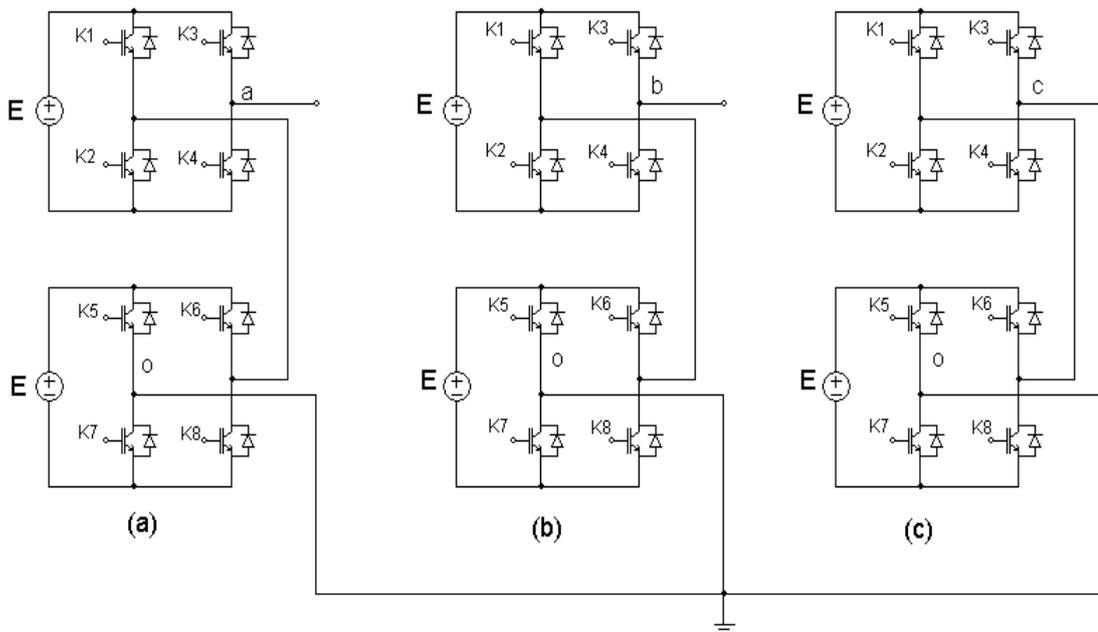


Figure2.13 : schéma d'onduleur a cinq niveaux

c.4 Principe de fonctionnement d'onduleur en cascade à 5 niveaux :

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure cascade en pont H à cinq niveaux de tension, nous allons nous limiter notre étude sur un seule bras et sera identique pour les autres bras. Il existe cinq séquences de fonctionnement possible :

- Séquence 1: K1,K4, K5, et K8 sont passants et K2, K3, K6, et K7 sont bloqués

Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie E et second pont monophasé (celui du bas) donne également E comme tension de sortie. D'où la tension de sortie du convertisseur en cascadé H à cinq niveaux de tensions : $V_{ao} = E + E = 2E$

- Séquence 2: K1, K4, K5 et K6 ~ sont passants et K2, K3, K7 et K8 sont bloqués,

On a toujours E à la sortie du premier pont, mais cette fois ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension $V_{ao} = E$

- Séquence 3: K2, K4, K6 et K8 sont passants et K5, K7, K1 et K3 sont bloqués,

On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. Et la tension de sortie du pont en H obtenue vaut: $V_{ao} = 0$

- Séquence 4: K2, K3, K6 et K8 sont passants et K1, K4, K5 et K7 sont bloqués,

Dans ce cas, la tension de sortie est : $V_{ao} = -E$

- Séquence 5: K2, K3, K6 et K7 sont passants et K1, K4, K5 et K8, sont bloqués,

On a alors la tension de sortie $V_{ao} = -E - E = -2E$

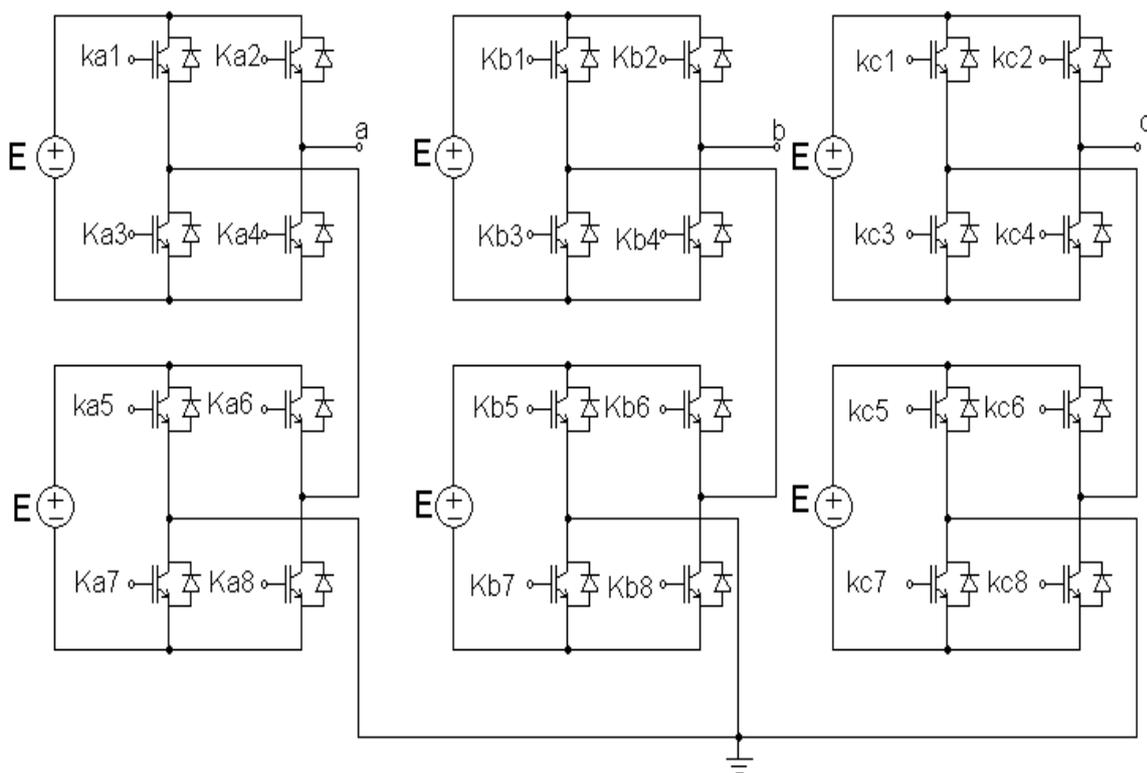


Figure2.14 : Séquence de fonctionnement d'un bras d'onduleur cinq niveaux

Le tableau suivant résumer les 5 états de séquence possible :

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Vao
1	0	0	1	1	0	0	1	2E
1	0	0	1	0	1	0	1	E
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1	-E
0	1	1	0	0	1	1	0	-2E

Tableau2.2

2.8 Les types de commande des onduleurs :

2.8.1 La modulation par hystérésis (commande en fourchette) :

De façon générale la commande par hystérésis, connue aussi sous le nom de commande en fourchette, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.

L'approche la plus simple utilisée pour cette fin, est la stratégie de contrôle qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence, à l'aide d'un comparateur à hystérésis. Celui-ci, produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence. La **figure 2.15** donne le schéma de principe de cette commande [9].

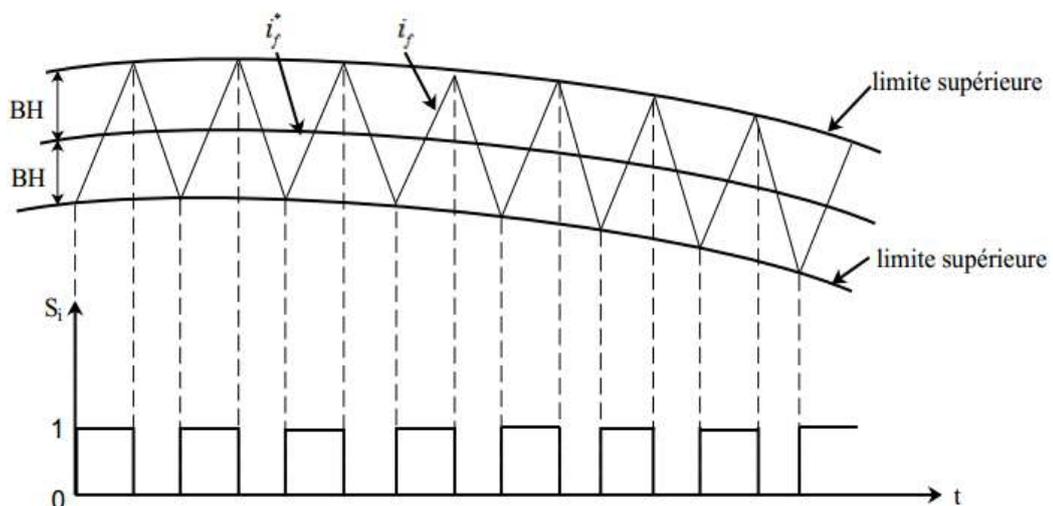


Figure2.15 :Principe de la commande en fourchette

2.8.2 Commande MLI :

La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : Pulse Width Modulation, soit PWM), est la plus utilisée pour la commande des onduleurs classiques (deux niveaux). C'est aussi la stratégie de modulation la plus utilisée dans les onduleurs multi-niveaux dite à modulation sinusoïdale. Elle consiste à comparer une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale (le signal à synthétiser) à une porteuse généralement triangulaire. Le signal de sortie change d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse [11].

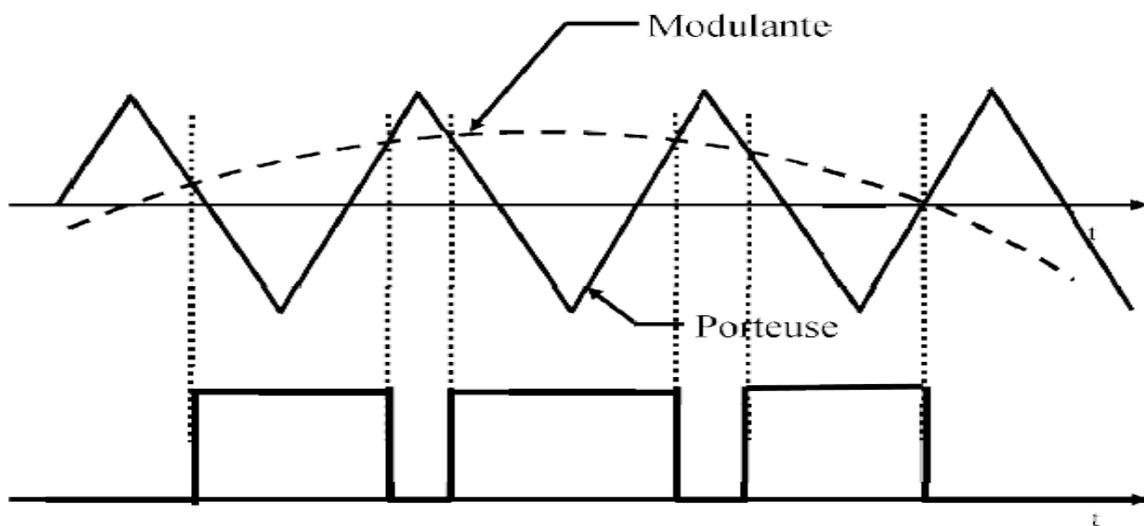


Figure2.16 :Principe de la commande en MLI

2.8.3 La commande vectorielle :

Utilisée dans les commandes modernes des machines asynchrones pour obtenir des formes d'ondes arbitraires non nécessairement sinusoïdales. Le principe de la MLI vectorielle consiste à reconstruire le vecteur tension statorique V_s à partir de huit vecteurs tension. Chacun de ces vecteurs correspond à une combinaison des états des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé, Cette méthode de MLI peut désormais être implantée dans des circuits intégrés numériques. Elle nécessite toutefois des calculs numériques rapides et précis. De ce fait, la fonction MLI est séparée des fonctions de "commande algorithmique" et implantée dans un circuit intégré spécifique. [21,22]

2.9. Conclusion :

Dans le chapitre précédent on a présenté les onduleurs en générale ainsi que les onduleurs multi-niveaux, en passant par la citation des différentes topologies, ensuite on a présenté le principe de fonction des onduleurs en cascade a trois et cinq niveaux. Vers la fin on a exposé les différents types de commande utilisée.

3.1 Introduction :

Les filtres actifs sont des structures qui fonctionnent en puissance active nulle, son rôle consiste à générer, en opposition de phase, les tensions ou les courants harmoniques trouvés sur le réseau électrique, dans le but de les diminuer ou les annuler complètement. Ces filtres sont contrôlés par des courants de référence qui sont obtenus à travers la méthode des puissances instantanées.

3.2 Filtrage actif

3.2.1 Principe du filtre actif :

Les filtres actifs sont des structures qui fonctionnent dans un mode à puissance active nulle. Ils utilisent une source contrôlable pour introduire la tension ou le courant dans le réseau, présentant ainsi une forme d'onde qui compense les harmoniques. Donc son principe consiste à générer, en opposition de phase, les courants ou tensions harmoniques présents sur le réseau, afin de les annuler ou les diminuer par connexion au réseau.

Ces filtres ont pour but d'injecter sur le réseau soit :

- Des harmoniques de courant dans le cas d'un filtre actif parallèle.
- Des harmoniques de tension dans le cas d'un filtre actif série.
- Soit les deux dans le cas de filtres hybrides. [23]

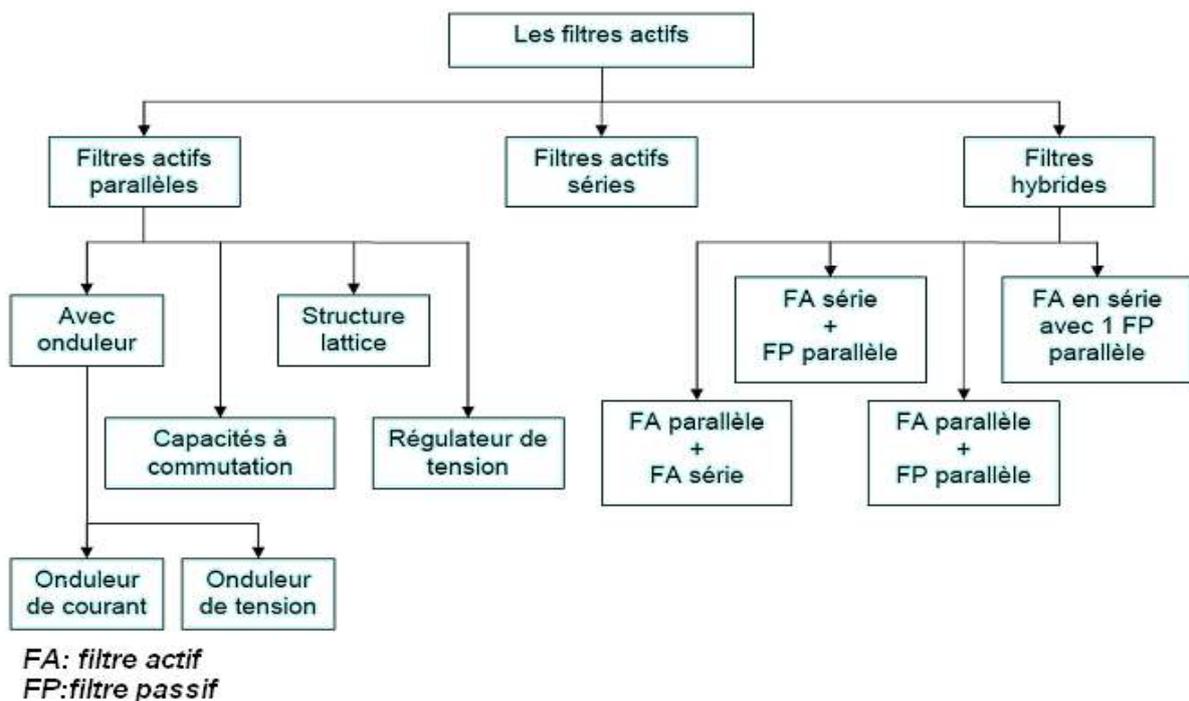


Figure 3.1: Les différents types de filtres actifs [23]

3.2.2 Structure générale d'un filtre actif :

Un filtre actif est composé de deux parties comme le montre la figure 3.2. La partie puissance est constituée d'un circuit de stockage d'énergie, d'un onduleur destiné à répartir le courant dans les différentes phases et un filtre de sortie destiné à réaliser l'interface entre le réseau et l'onduleur. La partie contrôle tient compte du circuit de stockage d'énergie, du filtre de sortie et des harmoniques sur le réseau et permet d'actionner le circuit onduleur.

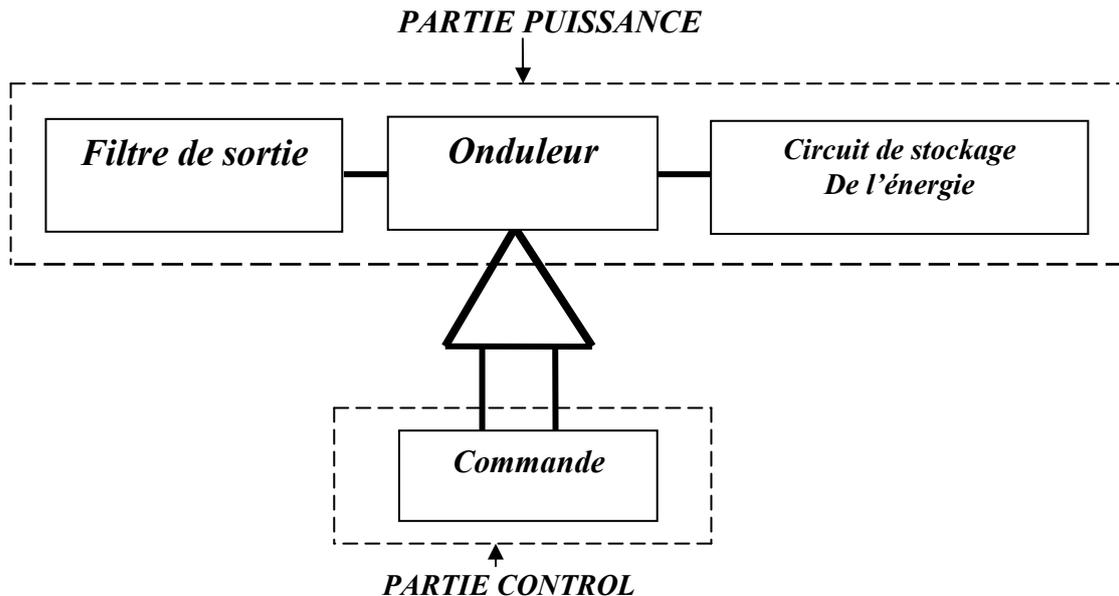


Figure 3.2 : Structure générale d'un filtre actif

3.2.3 Filtres actifs parallèles :

3.2.3.1 Principe de fonctionnement d'un Filtre Actif Parallèle:

Le FAP est constitué principalement d'un convertisseur statique à base de semi-conducteurs de puissance commandé par un système de contrôle approprié. Il peut être assimilé à une source de courant qui compense en temps réel les courants harmoniques en injectant au niveau du point de raccordement des courants en opposition de phase avec les perturbations harmoniques identifiées. Dans le cas où l'élément de stockage est un condensateur le FAP est dit à structure tension et dans le cas où l'élément de stockage est réalisé par une inductance, le FAP est nommé à structure courant. Toutefois, les FAPs à structure tension sont plus fréquemment mis en œuvre dans les applications industrielles pour la simplicité de leur commande [24], leur coût limité et leur taille physique réduite [25, 26].

Nous avons donc choisi de considérer la structure tension dans ce manuscrit. Le schéma de principe d'un FAP à structure tension est donné par la figure 2-1. Un Filtre Actif

Parallèle est composé de deux blocs: un bloc puissance et un bloc commande [27]. Le premier bloc est composé essentiellement d' :

- Un convertisseur de puissance,
- Un filtre de découplage,
- Une source de stockage d'énergie.

Ce sont ces deux derniers éléments qui déterminent la nature du filtre actif (structure tension ou courant), suivant qu'il est réalisé à base d'un convertisseur de tension ou de courant. Le deuxième bloc est constitué d' :

- Un estimateur des courants de référence,
- Un régulateur maintenant la tension continue aux bornes de l'élément de stockage,
- Un contrôleur qui peut être conventionnel à hystérésis, MLI ou évolué travaillant avec les techniques intelligentes.

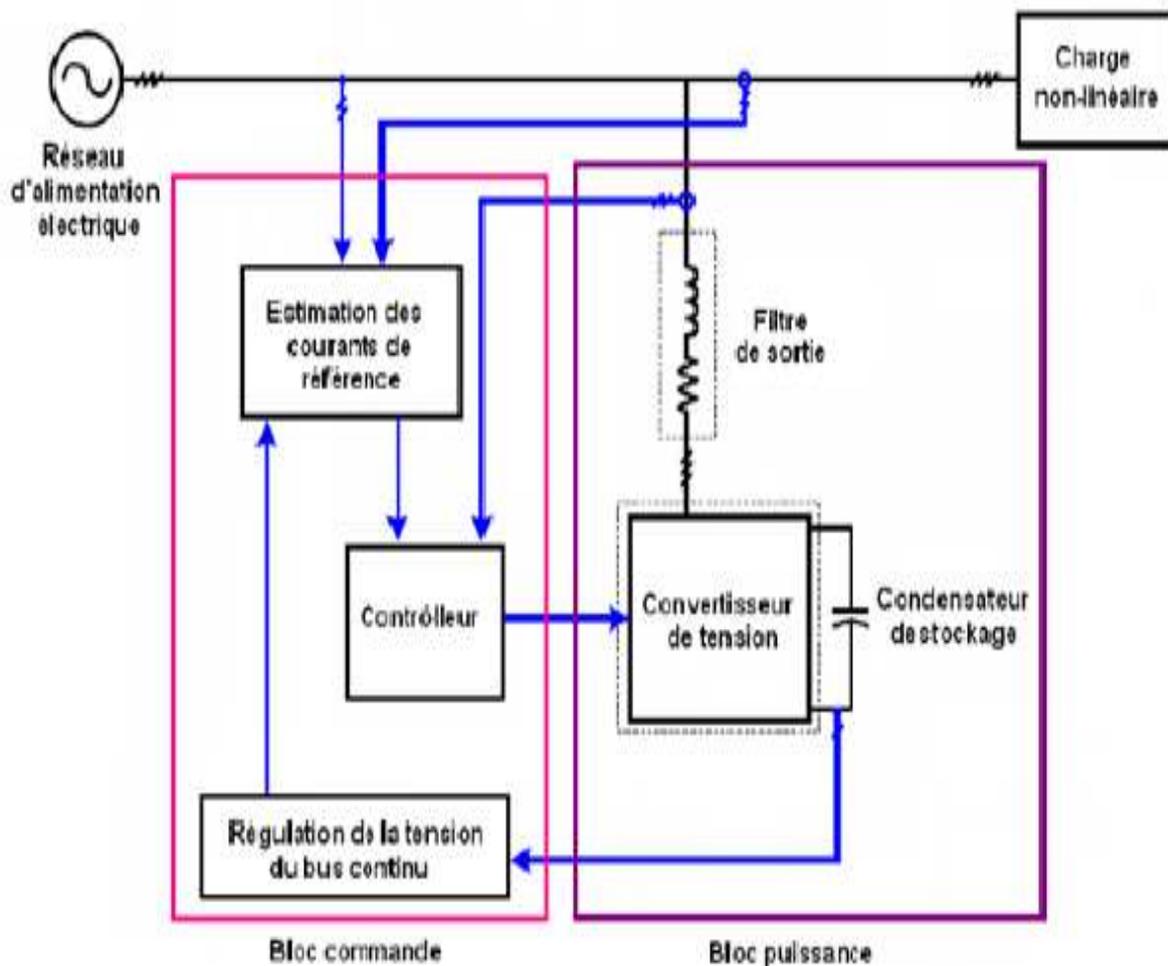


Figure3.3: schéma de principe d'un FAP

3.2.3.2 Topologies d'un Filtre Actif Parallèle à structure tension : [28]

Il existe une grande variété de types de filtres actifs parallèles, ils sont classés de différentes manières. La première classification est basée sur le nombre de phases, en effet un FAP peut être :

- Monophasés ou triphasés.
- Avec ou sans neutre raccordé.
- Utilisant un convertisseur de tension ou un commutateur de courant.

Industriellement les filtres actifs monophasés sont moins utilisés que les filtres actifs triphasés qui sont les plus répandus (pour des applications de type variateurs ou redresseurs à dépolluer) du fait que les filtres monophasés sont normalement limités aux applications en basse puissance (les redresseurs des sources d'alimentation en continu), sauf dans le cas de la traction électrique

La technologie du convertisseur de tension et sa topologie est un autre type de classifications des FAPs. La topologie de puissance utilisée peut être :

- Un convertisseur de tension standard à deux niveaux : Voltage Source Inverter (VSI),
- Un convertisseur de tension multi-niveaux : exemple, le convertisseur de tension trois-niveaux (NPC),
- Un convertisseur matriciel sans étage continu

3.2.3.3 Les avantages et les inconvénients des filtres actifs parallèles :

Le filtre actif parallèle peut-être une solution de filtrage économique pour la compensation d'harmonique sous les conditions suivantes :

- L'amplitude des harmoniques de courant est limitée.
- Il y a un déplacement des contraintes du facteur de puissance sous des conditions de charges légères.
- Si les interactions avec le filtre passif sont un problème (ce qui est généralement le cas pour les charges de puissances moyennes et faibles) sinon le filtre passif est plus approprié.

- Pour les charges industrielles de puissances apparentes faibles et moyennes, où les efforts de développement et les coûts d'installation sont une très grosse part des coûts globaux du système final.

Les avantages des filtres actifs parallèles sont les suivants :

- Ils ne créent aucun problème de variation du facteur de puissance.
- Ils ne nécessitent pas de condensateurs de découplage à la sortie de l'onduleur.
- Plusieurs filtres peuvent être utilisés pour augmenter les capacités de charge.
- Les filtres actifs parallèles ne nécessitent pas d'appareil de protection

Les principaux défauts des filtres actifs parallèles sont :

- Les filtres actifs parallèles peuvent poser des problèmes pour la compensation à des niveaux de puissances élevés.
- Les onduleurs MLI génèrent des harmoniques qui peuvent circuler dans des filtres passifs qui seraient connectés au système.

Ainsi pour cette étude c'est le FAP qui a été retenu car il répond principalement à la problématique des harmoniques de courant qui est la plus cruciale actuellement, tout en restant simple à mettre en œuvre et offre de très bonnes performances.

3.3 La partie contrôle-commande

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

- identification à partir de la détection du courant de la charge polluante,
- identification à partir de la détection du courant de la source,
- identification à partir de la détection de la tension de la source.

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes [9]. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

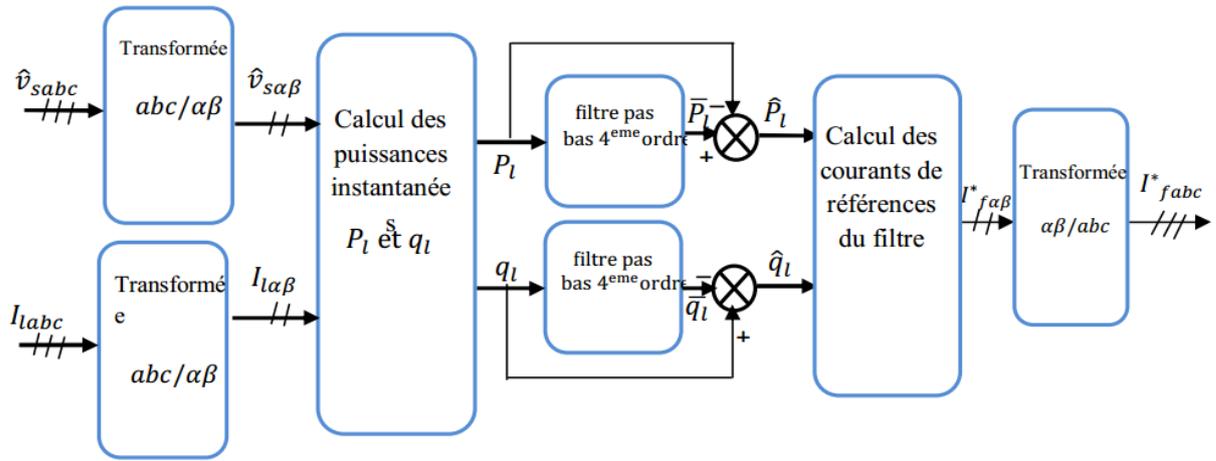


Figure 3.4 : Bloc fonctionnel de calcul des courants de référence

3.3.1 La méthode d'identification des courants harmonique :

Il existe deux différentes familles des méthodes d'identification des courants harmoniques qui sont :

- a) La première utilise la transformer de Fourier, rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul. [2]
- b) La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant totale.

3.3.2 Méthode de la puissance instantanée P-Q :

a) Définition :

La méthode des puissances instantanées est une méthode temporelle. Elle a été utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre des méthodes fréquentielles telle que la méthode de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète). Cette méthode a été introduite par H. Akagi. Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système

diphassé (repère $\alpha-\beta$) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées.

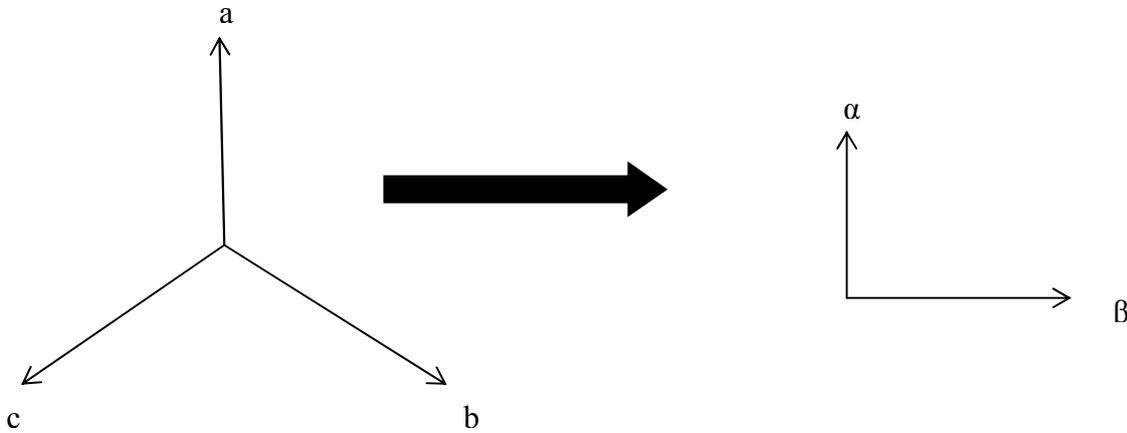


Figure3.5 Transformation d'axe « abc » à « $\alpha-\beta$ »

b)-Principe de fonctionnement :

La théorie (P-Q) met en œuvre une transformation d'un système de référence stationnaire en coordonnées abc, à un système de coordonnées (α,β) . Elle correspond à une transformation algébrique, connu sous le nom de la transformation de Clark, qui produit également un système de référence fixe, où les coordonnées $(\alpha-\beta)$ sont orthogonales les unes aux autres [29].

La transformation se fait à partir de la relation suivant :

$$\begin{bmatrix} X\alpha \\ X\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Nous appliquons cette relation sur la tension de la source et le courant de charge nous trouvons :

$$\begin{bmatrix} V\alpha \\ V\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vsa \\ Vsb \\ Vsc \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

Après avoir obtenu les tensions v_α, v_β , et les courants i_α, i_β , nous utilisons des multiplicateurs et des additionneurs afin de déterminer les puissances instantanées réelles et imaginaires dans le but d'en extraire les composantes harmoniques.

$$\begin{cases} p = V\alpha i\alpha + V\beta i\beta \\ q = V\alpha i\alpha - V\beta i\beta \end{cases} \quad (3.4)$$

Avec: p : la puissance instantanée réelle en [W].

q : est la puissance instantanée imaginaire en [var]

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées p et q ont pour expression :

$$\begin{cases} p = p_c + p_h \\ q = q_c + q_h \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec :

- P_c, q_c : puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant
- P_h, q_h : Puissance alternative liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

L'étape qui suit nous allons utiliser un filtre passe bas dans le but d'éliminé les composantes continues pour avoir seulement les composantes alternatifs relatives aux composantes harmoniques recherchées.

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés. Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre en vue de simplifier l'approche d'implantation numérique de ce dernier. En effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs ce qui peut être préjudiciable dans notre étude. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre :

$$F_{pb}(p) = \frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2} \quad (3.6)$$

Avec:

p opérateur de Laplace égal à $j\omega$

ω_n fréquence propre du filtre, sa valeur égale à : 314rad/s

ξ est le dépassement ou le coefficient d'amortissement, sa valeur égale a : 0.4

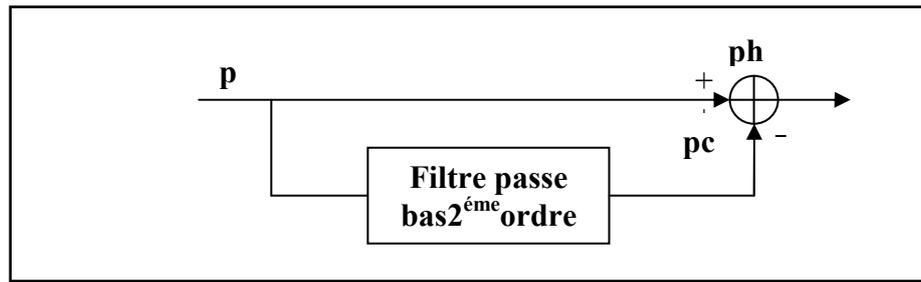


Figure 3.6 : Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q

On pose :

$$\Delta = V\alpha^2 + V\beta^2$$

Et à partir de l'expression (3.4) on a:

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

On remplace (3.5) dans (3.7) on trouve :

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ph \\ qh \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Donc le courant harmonique sera déterminé par la relation :

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ph \\ qh \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Pour obtenir les courants de référence nous avons appliqué la transformé inverse de Clark sur la matrice (3.9) :

$$\begin{bmatrix} iaref \\ ibref \\ icref \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.4 Algorithme de la commande MLI à cinq niveaux :

Pour commander un onduleur à N niveaux de tension, (N - 1) porteuses triangulaires sont nécessaires. Les signaux triangulaires doivent toutes avoir la même fréquence d'échantillonnage, et la même amplitude [30], les signaux triangulaire pouvant être verticalement ou horizontalement, si les porteuse sont horizontalement ,le déphasage entre deux signaux donne par $2\pi/N-1$., Et si elles sont décalées verticalement, les signaux N -1 triangulaires peuvent être en phase ou non,on compare signal de référence avec signal triangulaire, si la porteuse est supérieur ou égale à la référence on donne 1,si la référence est

supérieur on donne 0 ,pour le multi niveau chaque niveau de tension on augmente les nombre des porteuse.

- L'indice de modulation m , qui est égale au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_r de la référence $m = f_p / f_r$ (3.11)

- Le taux de modulation, r est le rapport de l'amplitude V_m de la tension de référence à l'amplitude V_{pm} de la porteuse V_m / V_{pm} (3.12)

- Dans le cas de MLI multi-niveau le rapport est entre l'amplitude V_m de la tension de référence a la somme des amplitudes des porteuses verticales $m = V_m / (N-1)V_p$ (3.13)

Dans notre cas on a travail sur l'onduleur deux niveaux et cinq niveaux, pour l'onduleur cinq niveaux on utilise $(N-1)$ prèteuse, c'est-à-dire 4 prèteuses en phase décalées occupent une bande continue avec le même décalage vertical, comme le montre la figure 3.7

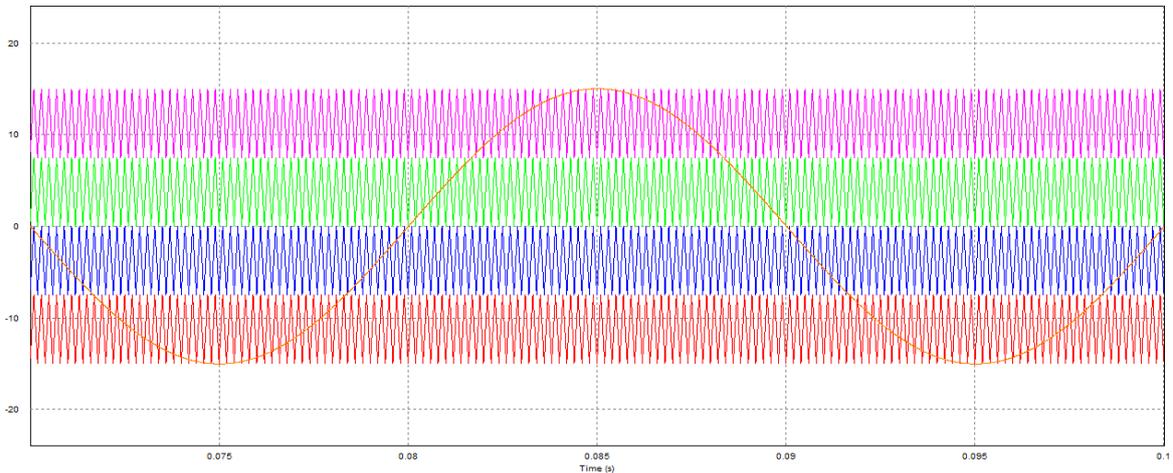


Figure3.7 Référence comparé avec quatre porteuses pour le 5 niveau

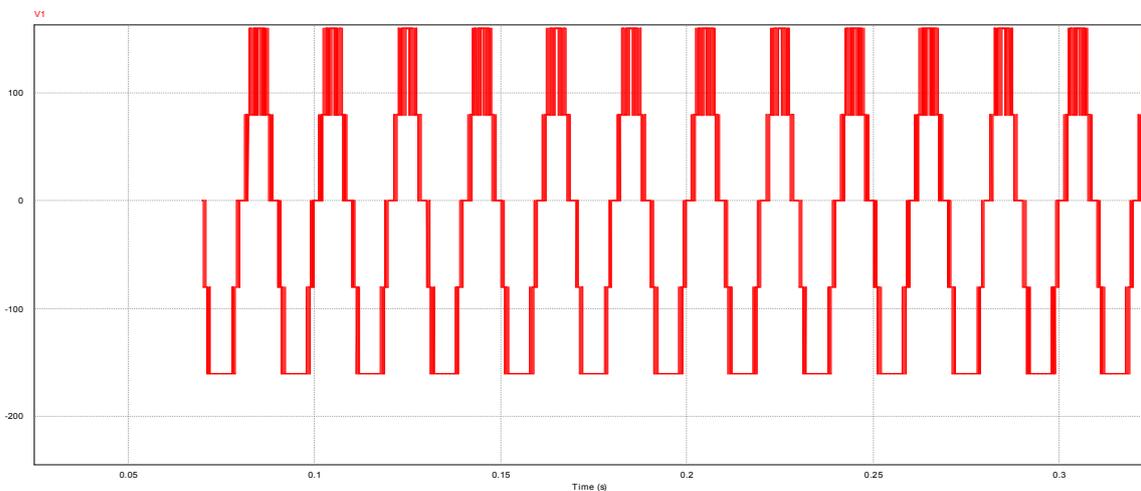


Figure3.8 Tension simple délivré par l'onduleur à cinq niveaux de tension ($m=100$)

Conclusion :

Dans ce troisième chapitre on s'est intéressé à expliquer le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle et on a donné les différentes topologies de ce dernier. Ensuite on a passé à la modélisation de la méthode des puissances instantanées P-Q et à la fin du chapitre on a parlé de la commande de modulation large amplitude.

4.1 Introduction

Le filtre actif est un élément idéal pour l'améliorer de la qualité de l'énergie électrique pour cela on va étudier et simuler un filtre actif parallèle, pour l'élimination des harmoniques de courant. Cette simulation a été réalisée pour confirmer l'étude théorique et voir l'efficacité, par une comparaison entre les résultats de filtre de deux niveaux classique et un autre de cinq niveaux en cascade. Les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel P-SIM, pour l'évaluation des performances d'augmentations de niveau de tensions.

Dans ce chapitre, on va montrer l'allure des courants de source avant et après l'implantation de filtre actif, ensuite on passe à une comparaison des taux harmoniques de distorsion THD (détails dans le chapitre 1) entre un filtre à deux niveaux classique et un autre à cinq niveaux en cascade, en exposant le circuit de puissance, le bloc d'identification du courant harmonique ainsi que le circuit de commande.

4.2. Simulation :

Dans ce travail on a utilisé le logiciel de simulation d'électronique de puissance PSIM a fin de réaliser les trois montages qui ce suit :

1. Montage d'un réseau électrique alimentant une charge non linéaire avant application d'aucun bloque de filtrage.
2. Montage d'un réseau électrique alimentant une charge non linéaire avec un filtre active parallèle classique de trois niveaux de tension commandé en MLI.
3. Montage d'un réseau électrique alimentant une charge non linéaire avec un filtre active parallèle de cinq niveaux de tension aussi commandé en MLI.

4.2.1 Montage d'un réseau électrique alimenté une charge non linéaire:

On a utilisé les paramètres suivants :

Paramètres		Valeurs numériques
Réseau d'alimentation [9]	Tension efficace ES	230 V
	Fréquence f	50Hz
	Résistance de ligne Rs	0.25m Ω
	Inductance de ligne Ls	19.4mH
Charge non-linéaire (pont de Graétz a six thyristors) [31]	Puissance apparente S	43.7 KVA
	Ongle de retard à l'amorçage α	0°
Charge linéaire (aval a la charge non-linéaire)	Résistance de charge DC Rc	6.7 Ω
	Inductance de charge DC Lc	25mH

Tableau4.1 : paramètres de simulation du réseau et charge non linéaire

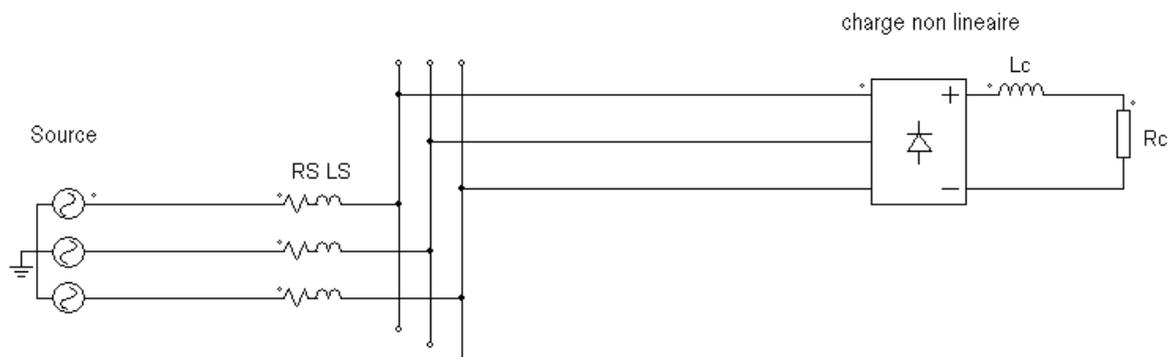


Figure4.1 : montage du réseau avec une charge non linéaire

Après la simulation on a obtenu les résultats suivants :

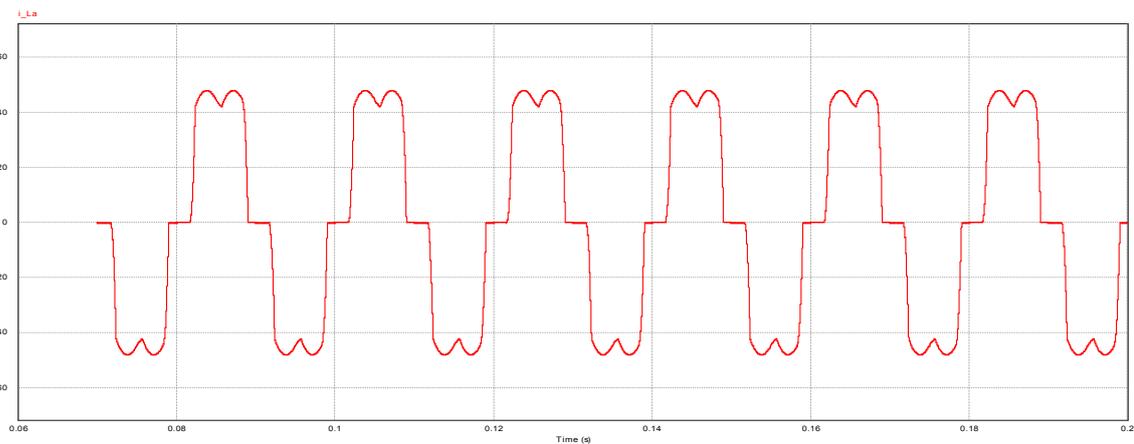


Figure 4.2 : Allure d' i_{La} avant de mettre le filtre actif

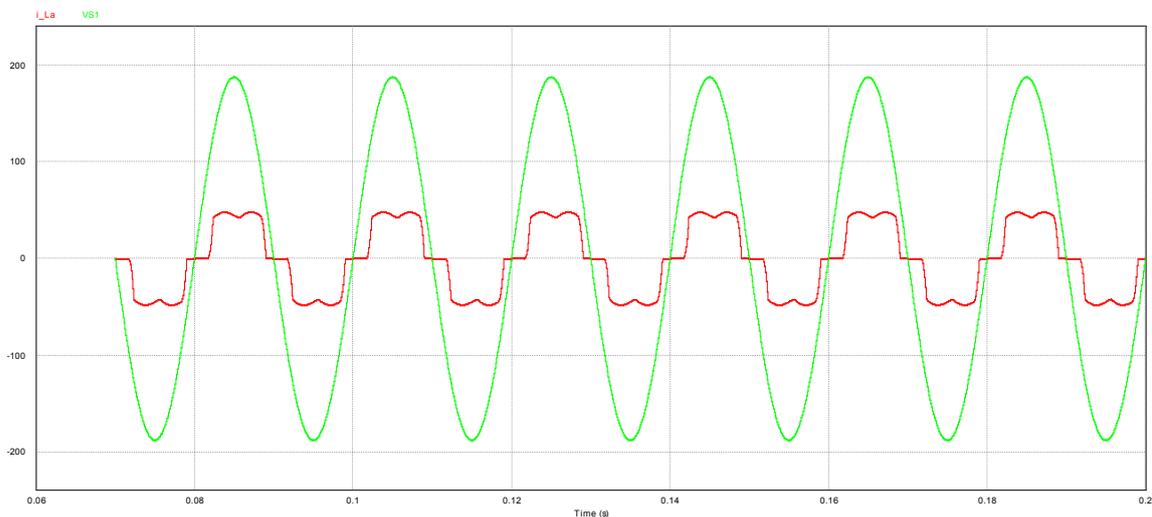


Figure 4.3 : courant i_{La} et la tension v_{s1}

Le THD obtenu dans le montage précédent est de 26.57%

4.2.2 Applications aux filtres actifs parallèles :

1^{er} cas onduleur de tension deux niveaux :

a. Circuit de puissance :

Le circuit de puissance d'un filtre actif placé en parallèle avec le réseau électrique qui comporte une charge non linéaire polluante, le filtre est à base d'un onduleur de tension de deux niveaux composé de six thyristors commandé par la méthode MLI. Ce circuit est représenté par la figure 4.4.

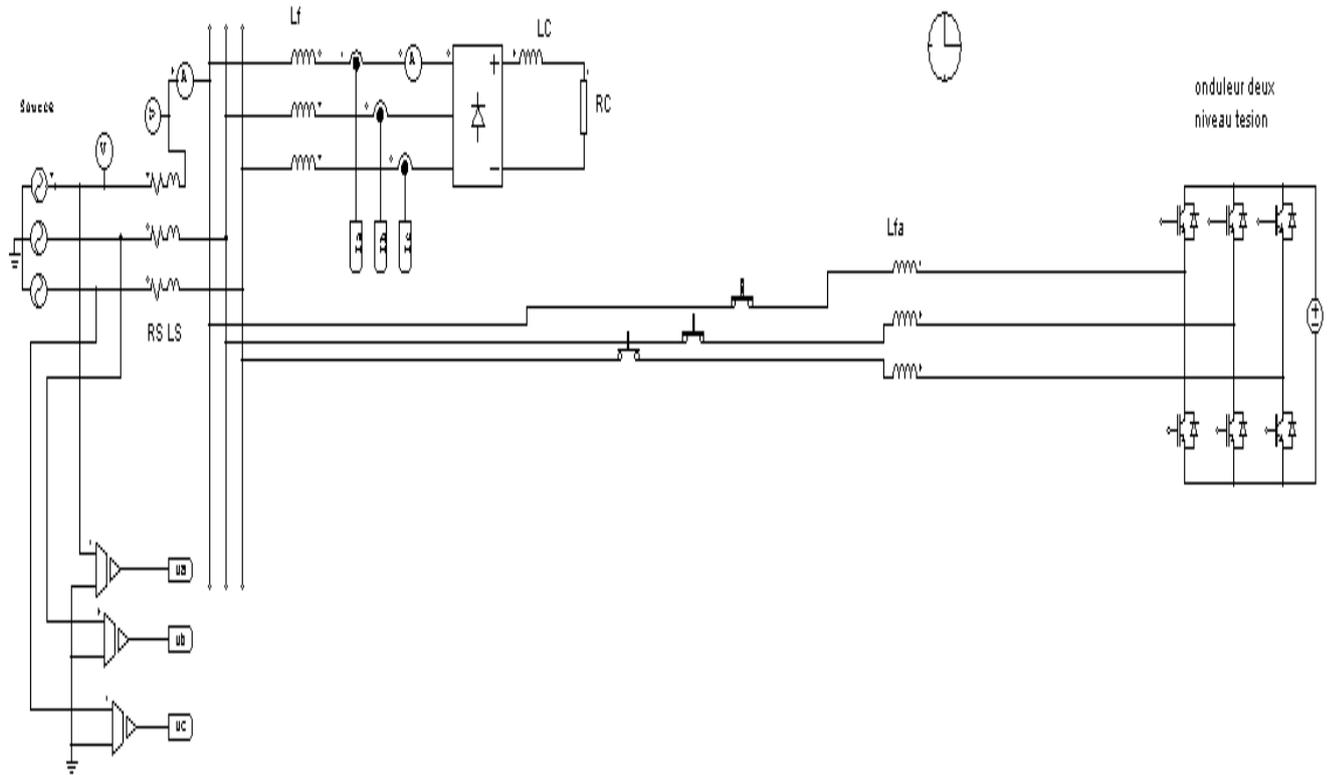


Figure 4.4 : circuit de puissance de filtr actif parallèle de deux niveaux établi sous le PSIM

b. Circuit de commande :

Le circuit de commande est constitué de trois blocs :

- Bloc d'indentification des courants de références
- Bloc de régulation des courants de références
- Bloc de commande impulsion de l'argeure d'amplitude

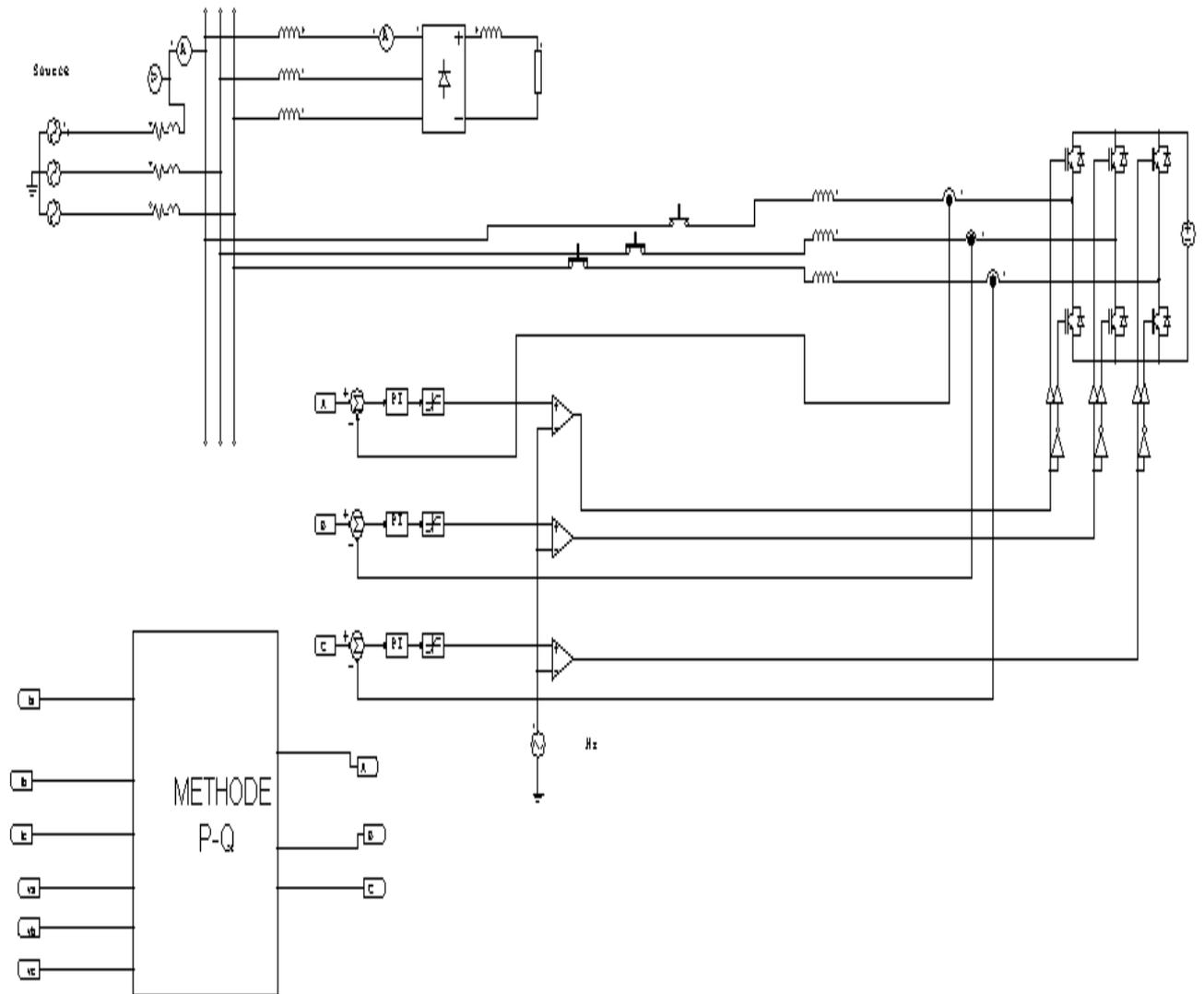


Figure4.5 :circuit générale de filtre actif parallèle de deux niveaux tension

4.2.2.1.1. Resulta de sumulation sur PSIM :

les pramètres de simulation sont donnés dans le tableau suivant :

Parmètres	Valeurs numériques
Vdc	840V
Lfa	1.25mH
Lf	0.3 mH
Fs (fréquence de commutation)	11KHz
Ts	0.9ms

Tableau4.2 : paramètre de simulation d'onlduleur deux niveaux.[31]

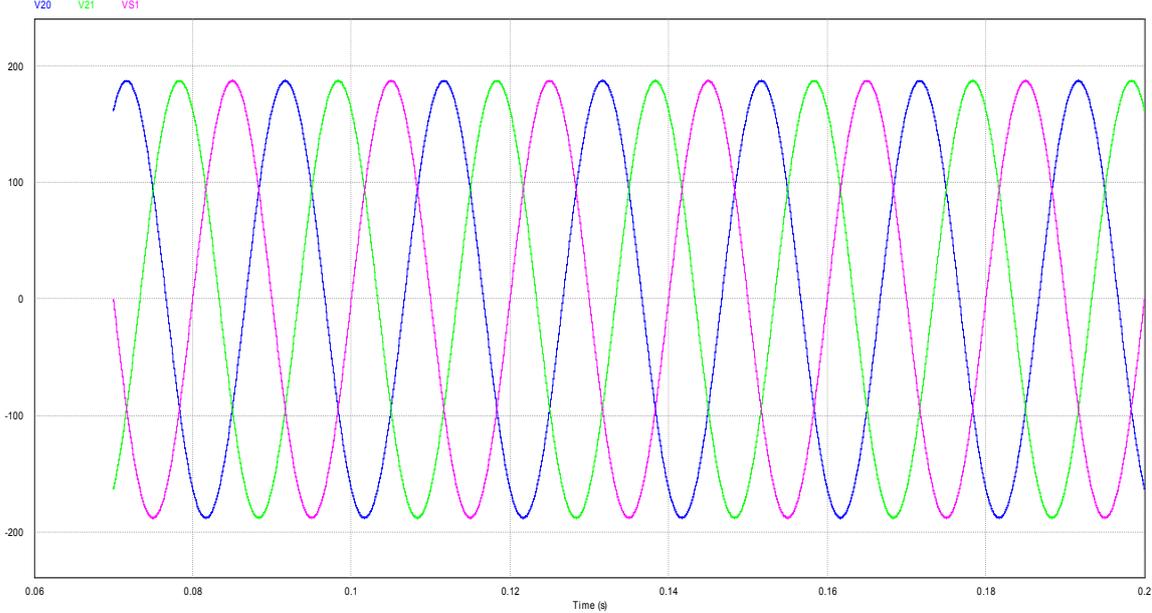


Figure4.6 : les tension de la source Vs1,Vs2,Vs3

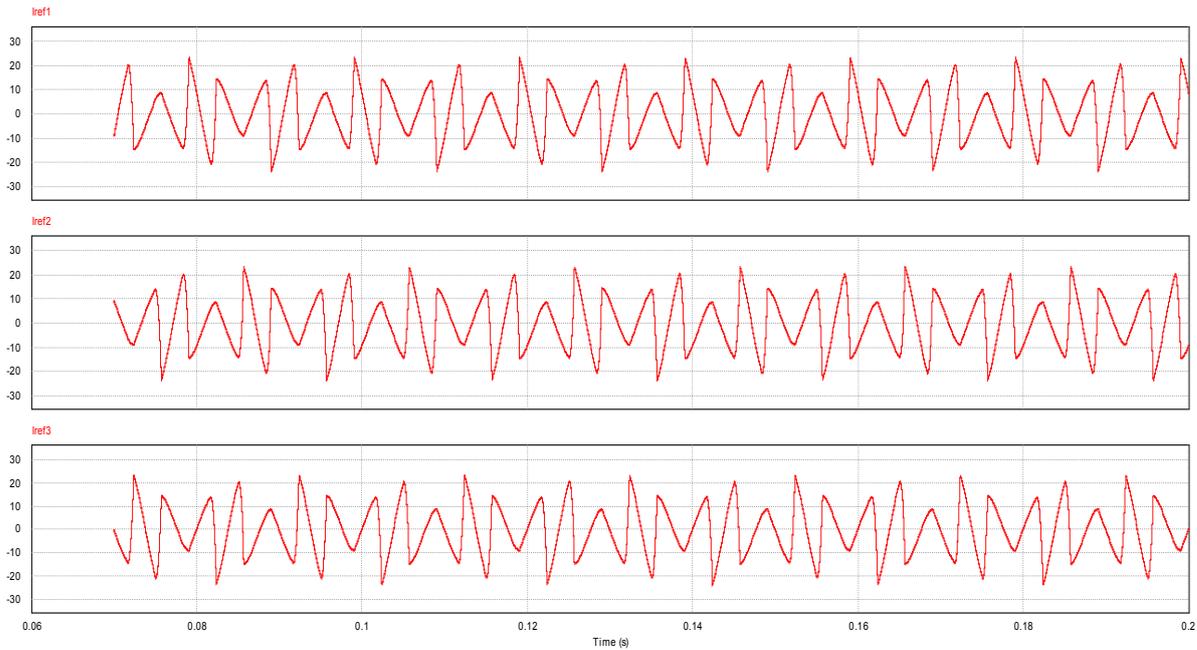


Figure4.7 : les courants de référence Iref1,Iref2,Iref3

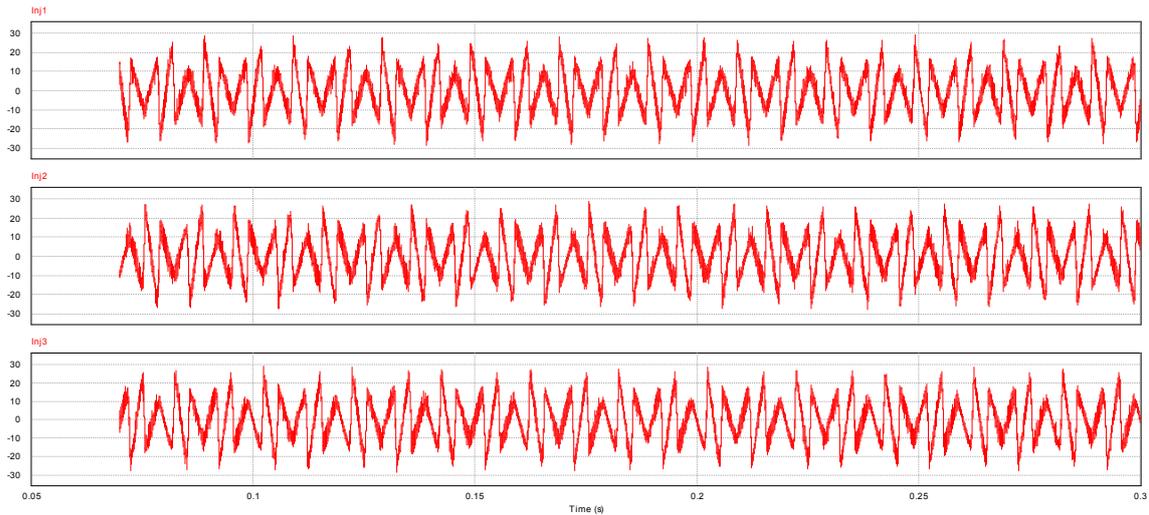


Figure4.8 : les courants injecté au réseau d'alimentation Inj1,Inj2,Inj3

Le courant de sortie après avoir met le filtre actif parallèle de deux niveaux de tension est illustré dans la figure suivante

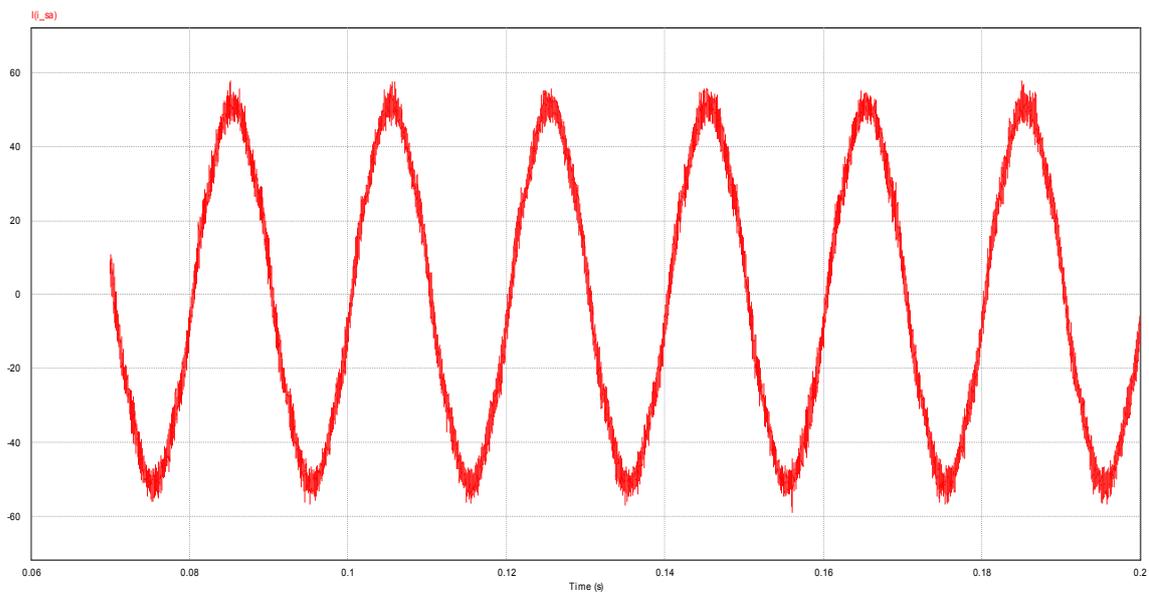


Figure 4.9 :Allure du courant isaaprès de mettre le filtre actif a deux niveaux de tension

Le THD obtenu dans le montage précédent est de : 6.96%, on remarque que après l'emplacement du filtre actif a deux niveaux de tension, le courant de la source deviens moins pollué avec une diminution du THD par rapport au premier montage.

4.2.2.2. 2ème cas onduleur de tension a cinq niveaux :

Schéma du montage sur PSIM

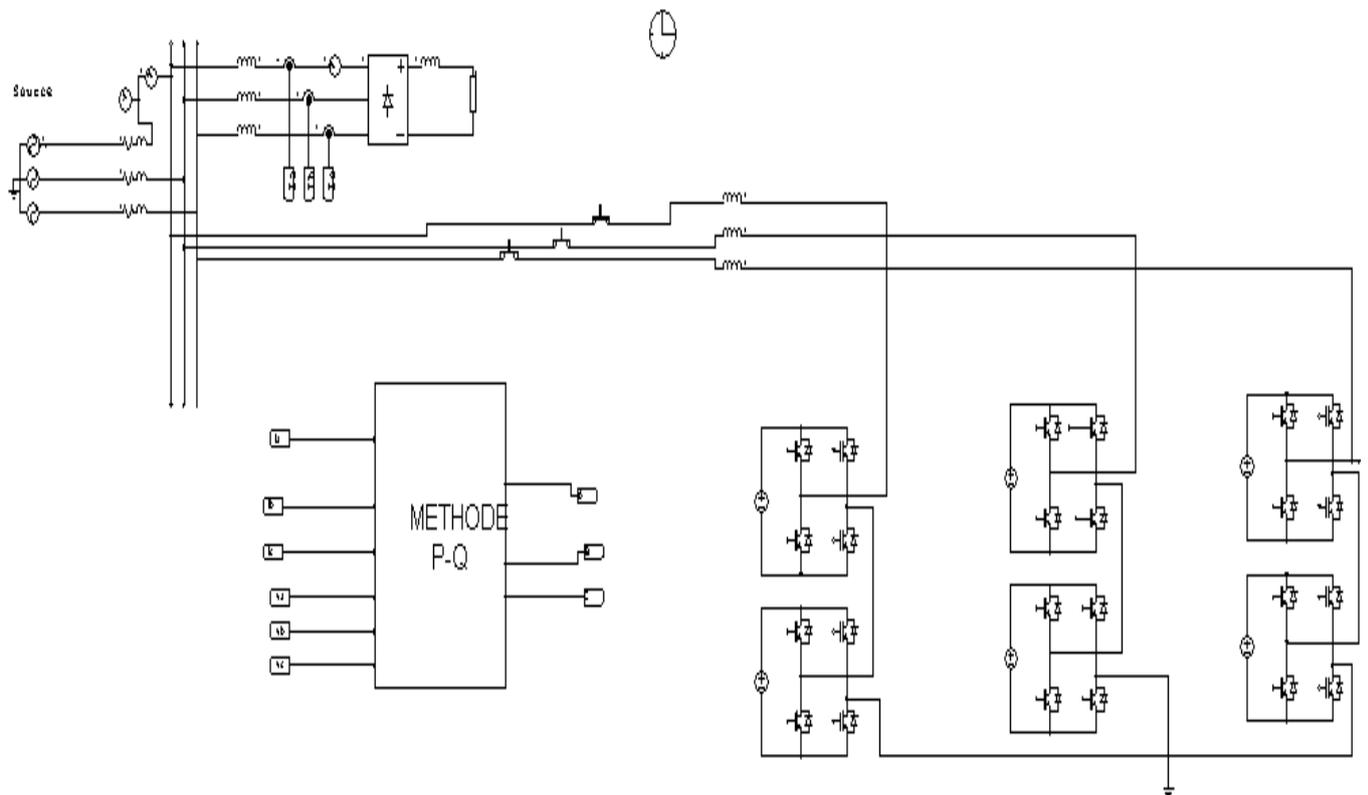


figure4.10 : circuit générale de filtre actif parallèle a cinq niveaux de tension

4.2.2.2.1. Résulta de simulation sur PSIM :

les pramètres de simulation sont données dans le tableau suivant :

Parmètres	Valeurs numériques
Vdc	420V
Lfa	1.25mH
Lf	0.3 mH
Fs (fréquence de commutation)	11KHz
Ts	0.9ms

Tableau4.3 : paramètre de simulation d'onduleur cinq niveaux.[31]

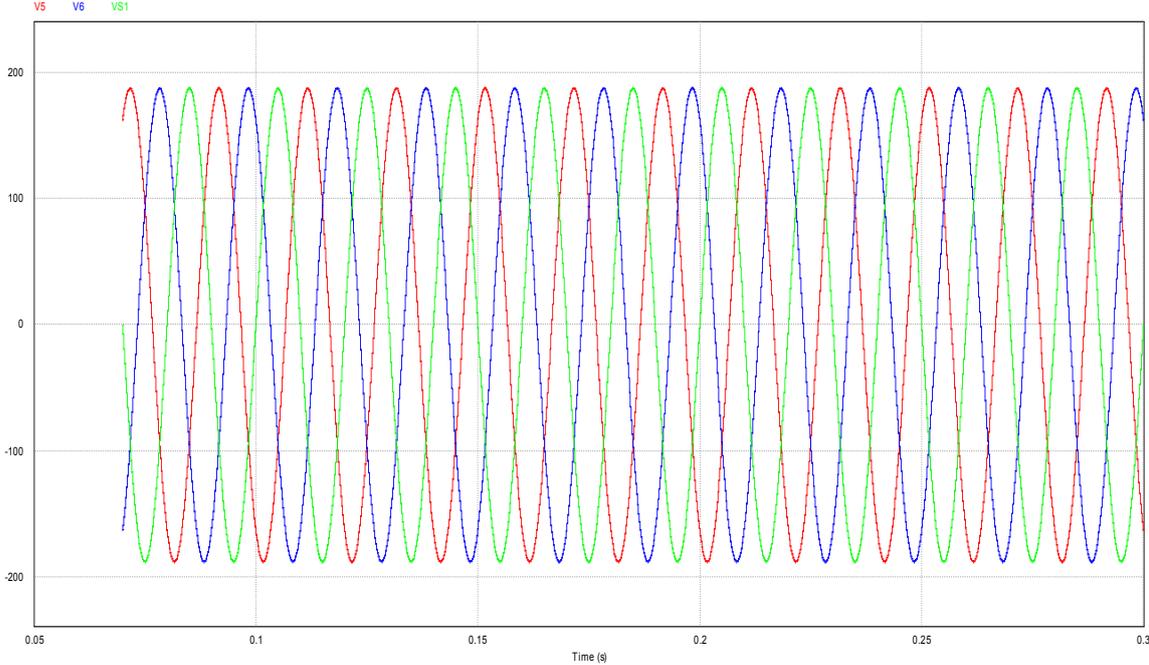


figure4.11 : les tension de la source Vs1,Vs2,Vs3

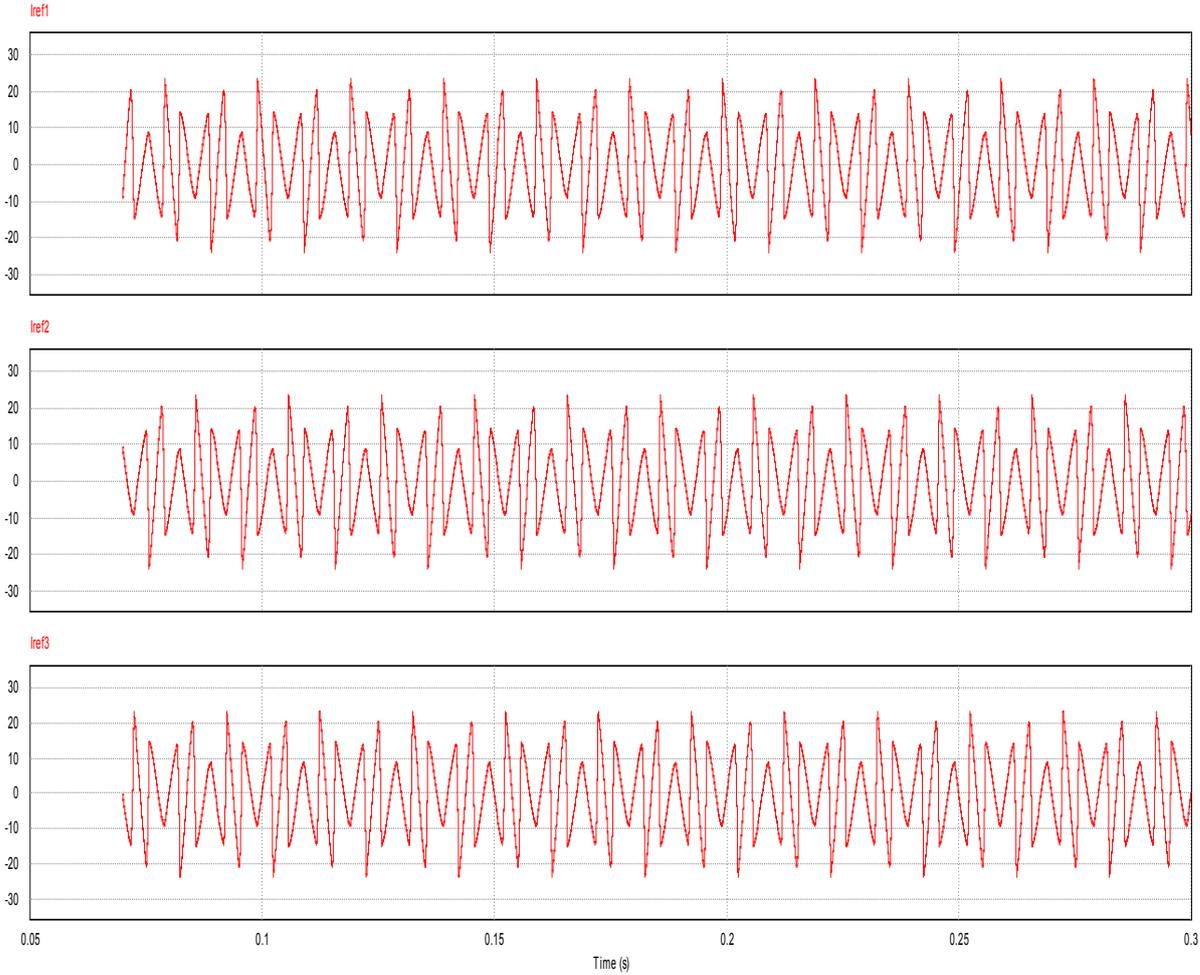


figure4.12 : les courants de référence Iref1,Iref2,Iref3

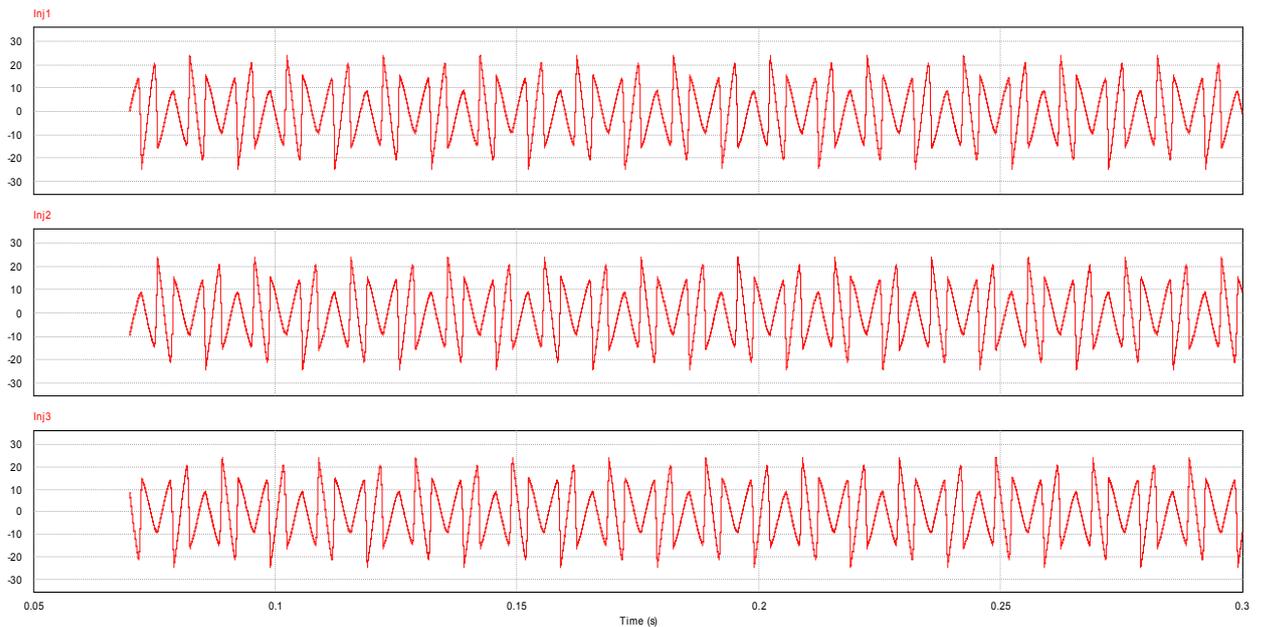


Figure4.13: les courants injecté au réseau d'alimentation Inj1,Inj2,Inj3

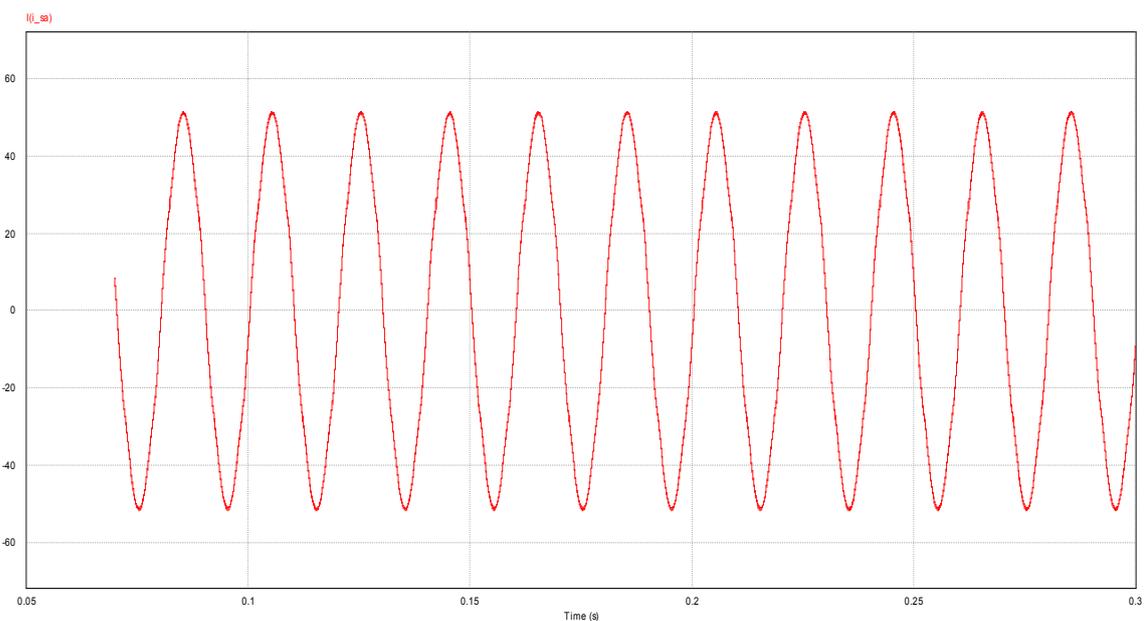


Figure 4.14 :Allure de isa après de mettre le filtre actif a deux niveaux de tension

Le THD obtenu dans le montage précédent est égale 3.14%, on remarque qu'après avoir augmenté le nombre de niveau de tension du filtre actif la disparation de l'harmonique sur le courant de la source et on a obtenu un THD faible par rapport aux deux autres montages.

4.3 Conclusion :

Les résultats obtenus dans ce travail il permette de montrer l'efficacité d'un filtre actif parallèle par l'utilisation de la méthode des puissances instantanées P-Q et l'augmentation de niveau de tension d'onduleur influe positivement.

La chute de Taux de distorsion harmonique (THD) est remarquable après l'utilisation du filtre active parallèle de 26.57% à 6.96% pour le filtre deux niveaux classique et a 3.14% pour le filtre en cascade de cinq niveaux.

Introduction générale

Les réseaux électriques est un ensemble de circuits interconnectés qui doit diriger de l'énergie électrique à partir des centrales de production aux consommateurs d'électricité, les consommateurs d'énergie électrique utilise un matériel qui comporte des charges non linéaires, peuvent être des consommateurs de grande puissance comme les industriels qui utilisent des convertisseurs statiques pour les systèmes de commande, pour la variation de vitesse d'un moteur électrique ou pour l'alimentation des charges continues, ces convertisseurs sont à base de composants de puissance qui provoque des problèmes au niveau du réseau électrique.

Ces composants sont considérés comme des charges non linéaires, ainsi un redresseur à diode ou à thyristors, un gradateur, un onduleur, un hacheur, consomment un courant non sinusoïdale, génèrent une puissance réactive, ce qui provoque des perturbations et pollution harmoniques dans le réseau électrique.

La pollution harmonique, engendre des perturbations au niveau de la source, ce qui influe sur le fonctionnement des charges linéaire. D'où l'intérêt de diminuer et éliminer ces harmonique. Pour cela il existe plusieurs techniques, parmi eux la solution la plus classique, la plus utilisée et la moins couteuse qui est l'injection d'un filtre passif dans le réseaux, malgré ces avantages cette technique présenter des inconvénients majeurs comme l'encombrement, le phénomène de résonance, la difficulté à caractériser avec le réseau, Pour cela nous avons opté à travailler sur une autre technique qui consiste à injecter un filtre actif de puissance dans le réseau qui est moins encombrant et plus facile à caractériser, Ce filtre est un convertisseur statique, qui peut être un onduleur de tension ou de courant, son rôle est d'injecter dans le réseau des courants perturbés en opposition de phase avec le courant non sinusoïdal de la charge polluante, ce qui éliminer les courants harmoniques de perturbation et garde le courant de réseau sinusoïdal à tout instant.

L'objectif de ce travail est l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle dans le but d'éliminer les harmoniques de courant provoquées par une charge non linéaire, coté puissance on utilise des onduleurs classiques en deux niveaux de tension et un onduleur en cascade cinq niveaux commandés par la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), on a identifié le courant perturbé par la méthode de la puissance instantanée (P-Q).

Ce mémoire a été fondé en quatre chapitres

Le *premier chapitre* donne des généralités sur les différentes sources de pollution des réseaux électriques, l'influence d'harmoniques et les différentes solutions de dépollution.

Le *deuxième chapitre* présente les différents types d'onduleurs et leur principe de fonctionnement ainsi que la structure de l'onduleur multi niveau en cascades et ses différentes commandes.

Dans le *troisième chapitre* nous avons détaillé chaque étage du filtre actif parallèle, par la suite on a présenté la méthode d'identification de courant harmonique et la commande de l'onduleur cinq niveaux.

Enfin le *quatrième et dernier chapitre* qui est consacré à la simulation du filtre actif parallèle de deux niveau classique ensuite celui de cinq niveaux en cascades, par la technique de commande MLI avec la méthode de la puissance instantané (P-Q) avec le logiciel P-SIM. Finalement, on termine notre travail par une *conclusion générale*.

Notations

φ	Angle de déphasage
P	La puissance active
S	La puissance apparente
Q	La puissance réactive
R_c, L_c	Impédance de la charge
R_s, L_s	Impédance de la ligne
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Les tensions simples du réseau triphasé
E_s	Tension efficace
V_{dc}	Tensions alternatives de l'onduleur
I_A, I_B, I_C	Courants alternatifs de l'onduleur
K_1, K'_2	L'interrupteur de l'onduleur
f	La fréquence
THD	Taux de distorsion harmonique
ω	Pulsation du réseau
F_s	Fréquence du porteuse
m	L'indice de modulation
r	Coefficient de réglage
i_a, i_b, i_c	les courants dans les systèmes triphasés
v_c, v_b, v_a	Les tensions dans les systèmes triphasés
i_α, i_β	les courants dans les systèmes biphasés
v_α, v_β	Les tensions dans les systèmes biphasés
p	la puissance instantanée réelle
q	est la puissance instantanée imaginaire
P_c	puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant
q_c	puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant
P_h	Puissance alternative liées à la somme des Composantes harmoniques active du courant
q_h	Puissance alternative liées à la somme des Composantes harmoniques réactive du courant
s	opérateur de Laplace

ξ _____ Déphasement ou le coefficient d'amortissement

I_{ref} _____ Courant de référence

I_{inj} _____ Courant injecté

MLI _____ la Modulation de Largeur d'Impulsion

L_{fa} _____ Inductance de lissage

P-Q _____ méthode de la puissance instantanés

Bibliographie

- [1] Cahier technique n°152 « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement »
- [2] K. Djazia « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus » thèse doctorat université Ferhat Abbas. Sétif 1. (UFAS) Algérie, 2015.
- [3] A.Bouafia, Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI, Thèse de doctorat de l'Université de Sétif, Algérie, 2010.
- [4] S. Guffon, « Modélisation et commandes à structure variable de filtres actifs de puissance ». Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble, 2000.
- [5] O.C.N. Souto, J.C de Oliveira, « Practical proposals to reduce harmonic currents in electrical power systems ». ELECTRIMACS '96. pp. 887-891, 1996.
- [6] C. Lotto, O. Lapierre, H. Pouliquen et S. Saadate « Filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électriques: Modélisation, Simulation numérique et Expérimentation » Journal Physique III, pp. 1433-2457, France Déc 1997.
- [7] T. Deflander, M. Philippe « Les harmoniques sur les réseaux électriques ». Electricité de France (EDF) – Direction des études et recherches, Edition Eyrolles. France 1998.
- [8] N. BRYANT « Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles : Compensation globale ou sélective des harmoniques : Régime équilibré ou déséquilibré ». Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1999.
- [9] MAE. Alali « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques Basses Tension ». Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2002.
- [10] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif » (volume 4). Edition tec&doc, 1995.
- [11] Techniques d'ingénieur, « Onduleur de tension: mise en œuvre et Structures principes-applications ». Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [12] M. Gerin, « Onduleurs et harmoniques », Cahiers techniques N°159.
- [13] T. Wildi « Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université 1999.
- [14] S.A. Menéndez « Aportación al Control del Convertidor CC/CA de tres Niveles » Thèse de Doctorat de l'Université Polytechnique de Catalunya, Nov. 2004.

- [15] A.M Lienhardt, « Etude de la Commande et de L'Observation d'une Nouvelle Structure de Conversion d'Energie de Type SMC (Convertisseurs Multicellulaire Superposé) », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [16] Nikola Celanovic, « Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters », Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, September 2000.
- [17] SurinKhomfoi, Leon M. Tolbert, «Multilevel Power Converters », the University of Tennessee USA, Department of Electrical and Computer Engineering, August 2007
- [18] Mohamed TalelChebbah, « Etude Et Simulation D'un Convertisseur Multiniveaux Type Puc », Ecole De Technologie Supérieure Université Du Québec, 2014.
- [19] Kambiz ARAB TEHRANI « Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multi-niveaux » thèse doctorat Université de Lorraine, 2010.
- [20] Alexandre Leredde, « Etude, Commande et Mise en Oeuvre de Nouvelles Structures Multiniveaux », mémoire de doctorat, université de Toulouse, 2011.
- [21] Y. Diaf, D. Ben antar. « L'électricité solaire photovoltaïque ».PFE En vue d'obtention du Diplôme de Master en Génie électrique Université KasdiMerbah–Ouargla, Juin 2012.
- [22] C.De Almeida Martins, « Contrôle direct de couple d'une machine asynchrone alimentée par convertisseur multiniveaux à fréquence imposée », Thesis of doctorateelectricgenius, Institut national polytechnique of Toulouse, December 2000.
- [23] I. Etxeberria et S. Bacha, Convertisseurs dédiés à la distribution électrique-application à la qualité de l'énergie
- [24] C. Zoubir “Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique”, Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Annaba.
- [25] H. AKAGI, “Modern active filters and traditional passive filters”, Bulletin of the PolishAcademy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 54, No. 3, 2006.
- [26] M. ROUTIMO, M. SALO, H. TUUSA, “Comparison of voltage-source and current source shunt active power filters”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No.2, pp. 636-643, March 2007.

- [27] S. NIA, "Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commandes analogique et numérique temps réel". Thèse de doctorat de l'I.N.P.L, Nancy, (France) 1996.
- [28] C.Salim " Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle" Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra (Algérie) 2013.
- [29] A, Hirofumi. New trends in active filters for power conditioning. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1996, vol. 32, no 6, p. 1312-1322.
- [30] J,S.Manguellr ; "cinvertisseur multi-niveau asymétrique alimenter par transformateurs multi-secondaire basse fréquence : rection u réseau d'alimentation " thesecolepolytecgniquefédéralrfr lausanne,EPFL2014
- [31] H.Djeglroud, " Filtre actif de puissance" Thèse de doctorat, université Mentouri CONSTANTINE Algérie 2007