

Chapitre 6

Qualité d'énergie dans les convertisseurs statiques avancés

6.1 : Introduction

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes, il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

- Les perturbations de tensions causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibre et réactifs.
- Les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques, le déséquilibre et les creux de tension.

Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers. Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des harmoniques. La problématique des harmoniques, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau, elle est actuellement la préoccupation de plusieurs groupes de recherche activant dans le domaine de l'amélioration de la qualité d'énergie électrique à cause du nombre important des charges non linéaires connectées au réseau électrique. Ces charges provoquent une distorsion dans le courant donc dans la tension, ce qui peut entraîner un dysfonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ces harmoniques.

6.2. Notions de la qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est reliée étroitement à la qualité de l'onde de tension laquelle est caractérisée par les paramètres suivants :

- Les fluctuations.
- Le déséquilibre.
- La fréquence.
- La forme d'onde.

6.3. Mesure de la qualité d'énergie

La mesure de la qualité de l'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électriques par :

- Creux de tension et coupures.
- Surtensions.
- Fluctuations de tension.

- Déséquilibres de tension.
- Variation de la fréquence
- Harmoniques

6.3.1. Creux de tension et coupures

Les creux de tension sont dus aux phénomènes naturels comme la foudre, et à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur les réseaux de distribution (les courts circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordés et le démarrage des moteurs de fortes puissances). Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90% et sa durée est inférieure à 3 minutes. Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.

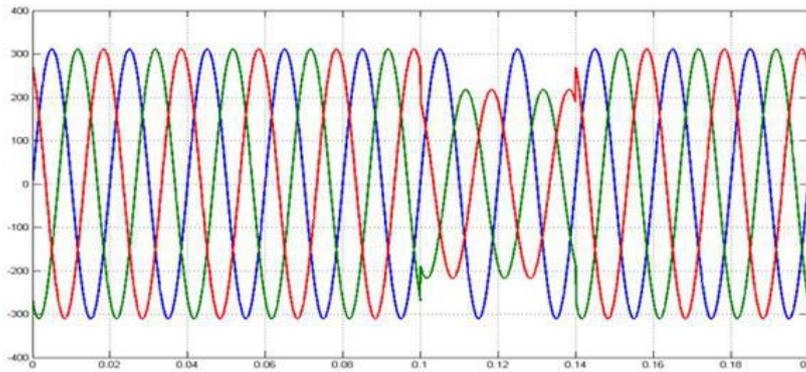


Fig.6.1. Creux de tension

6.3.2. Surtensions

Une augmentation de tension est définie lorsque l'amplitude de la tension est supérieure à la tension nominale de (110% à 180%). Ce phénomène est causé par l'arrêt d'un grand nombre de charges, il peut durer une minute.

6.3.2.1. Sources des surtensions

- Mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).
- Mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase-phase ou phase-neutre).

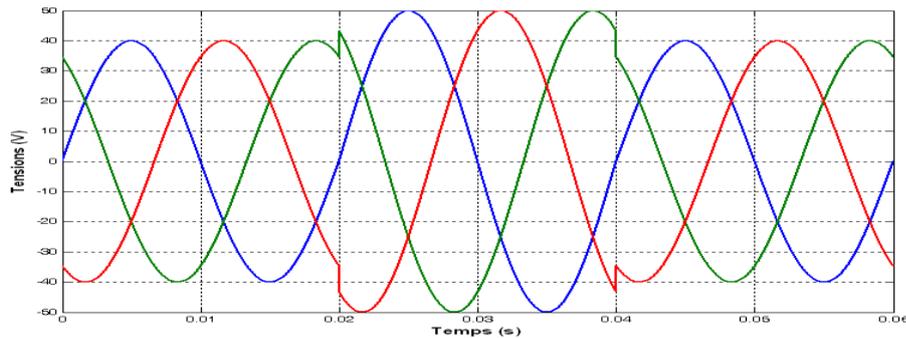


Fig.6.2. Exemple d'une surtension

6.3.3. Variation et fluctuation de tension (Flicker)

Les fluctuations de tension sont une suite de variation de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques la fréquence de la variation et l'amplitude. Les variations lentes de tensions sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé Flicker.

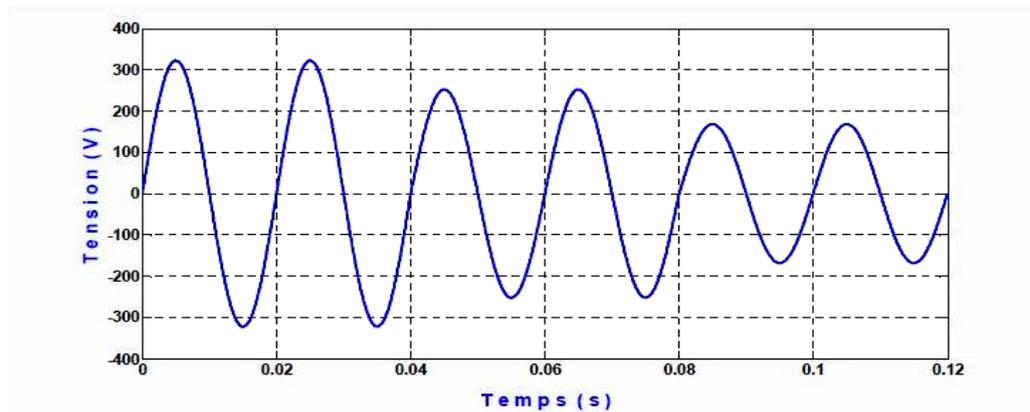


Fig. 6.3: Exemple d'une fluctuation

6.3.4. Déséquilibre (asymétrie)

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de 120° .

La principale cause de déséquilibre réside dans l'utilisation des charges monophasées. Les systèmes d'éclairages, et les équipements électriques, électroniques et informatiques pour l'usage domestique et administratif exigent une alimentation à basse tension monophasée.

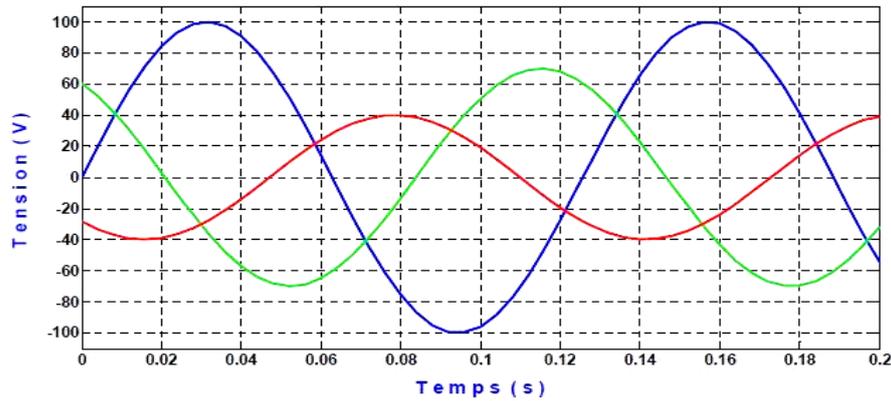


Fig. 6.4: Exemple d'un déséquilibre.

6.3.5. Variation de la fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non **interconnectés** ou alimentés par une source autonome. Cette variation de la fréquence est très rare la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$.

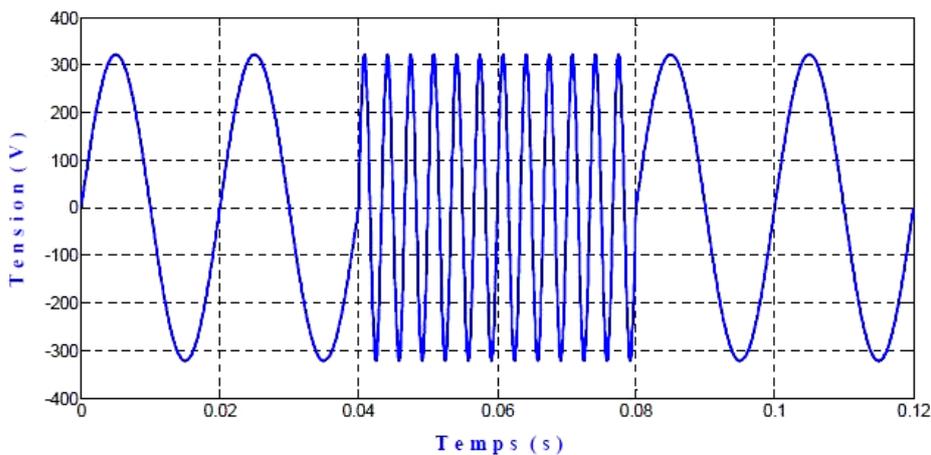


Fig. 6.5: Exemple Variation de fréquence

6.4.1. Charges Non-linéaires sources des harmoniques

- Les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu
- Les équipements industriels ((machines à souder, fours à arc)
- Les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, ...)
- Les appareils domestiques (TV, fours micro-onde, éclairage néon, ...)
- Les onduleurs.

Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés

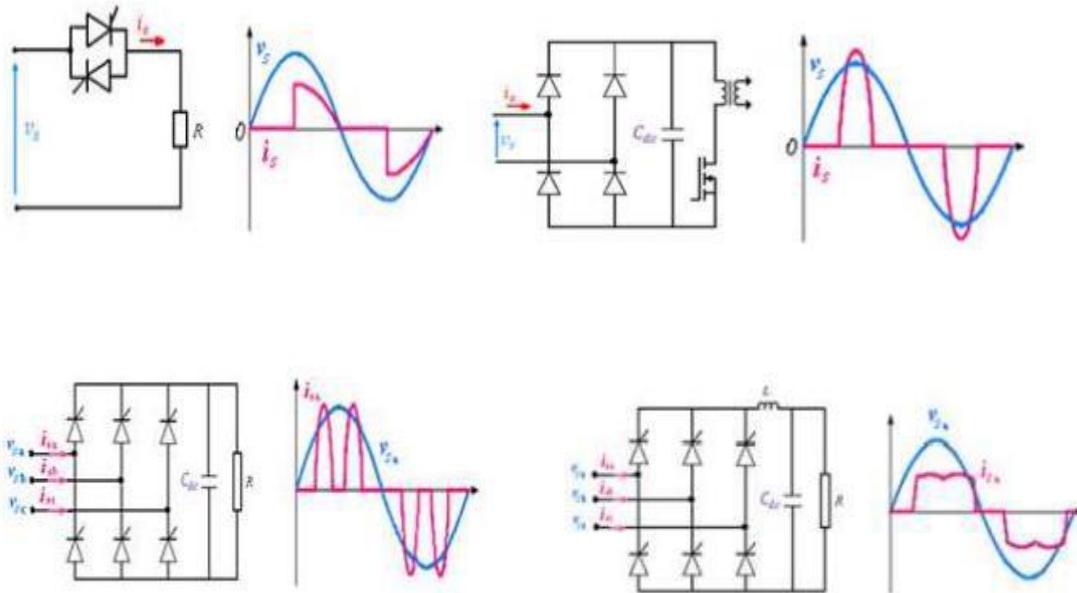


Fig. 6.6. Principaux convertisseurs statiques (charges non linéaires) qui provoquent la pollution harmonique.

Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions sinusoïdales, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. Ces distorsions sont appelées harmoniques d'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser.

6.5. Les harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Les principaux harmoniques présents sont la troisième, la cinquième, la septième et la neuvième.

6.5.1. Origine des harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale et d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. Les principales sources d'harmoniques sont les semis conducteurs à commutation tel que les convertisseurs statiques et les dispositifs caractéristiques tension courant non linéaire. Les dispositifs suivants sont des sources d'harmoniques :

- Les convertisseurs statiques à base de composants d'électronique (diodes, transistors... etc)
- L'éclairage par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques.
- Pour les fours à arc à courant alternatif, l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable.
- Les inductances saturées (cas des transformateurs à vide soumis à une surtension

- permanente) leurs impédances dépendantes de l'amplitude du courant qui les traverse et donc provoquent des déformations de ce courant.
- Les machines tournantes génèrent des harmoniques de rangs élevés et d'amplitudes négligeables.

6.5.2. Harmoniques et inter harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamentale.

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale, mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquences, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique.

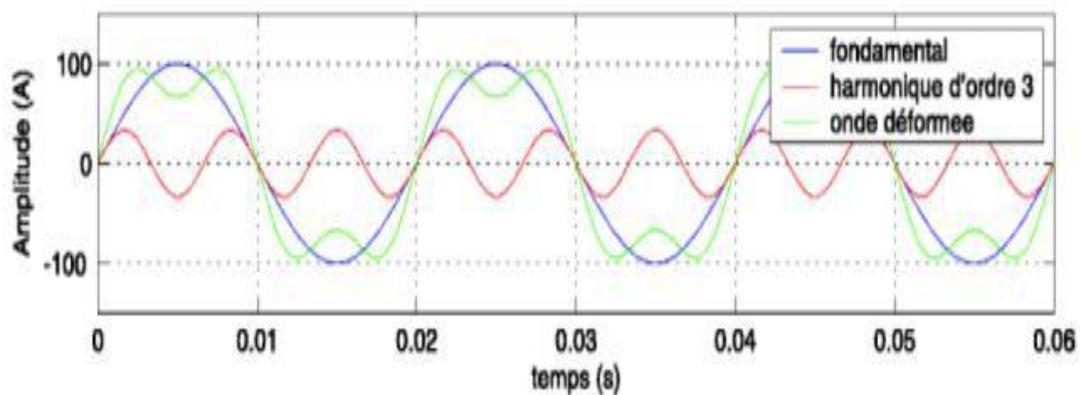


Fig. 6.7. Exemple des harmoniques

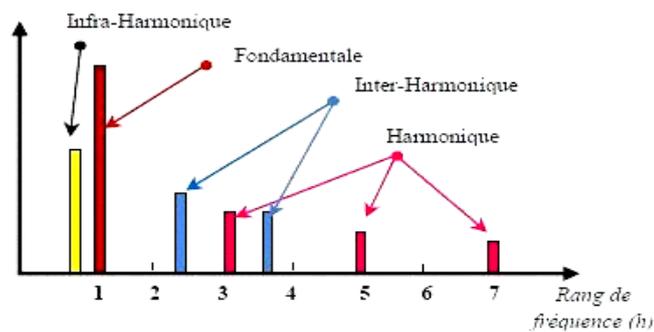


Fig. 6.8: Représentation des harmoniques, inter-harmonique et infra-harmonique

Un signal déformé est la résultante de la superposition des différents rangs d'harmoniques

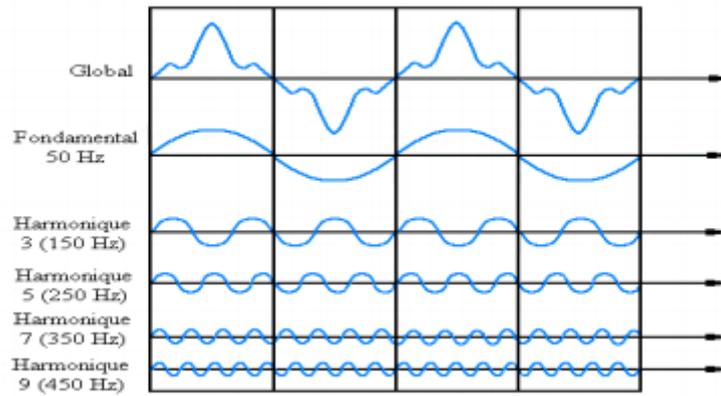


Fig. 6. 9 : Décomposition d'un courant distordu en composantes harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5,7 et 9.

6.6.Perturbations harmoniques

Une harmonique est une composante sinusoïdale d'un signal périodique, de fréquence multiple de celle du signal fondamentale. Généralement le domaine fréquentiel correspondant à l'étude des harmoniques est entre le rang $h = 2(100Hz)$ et $h = 50 (2500 Hz)$.

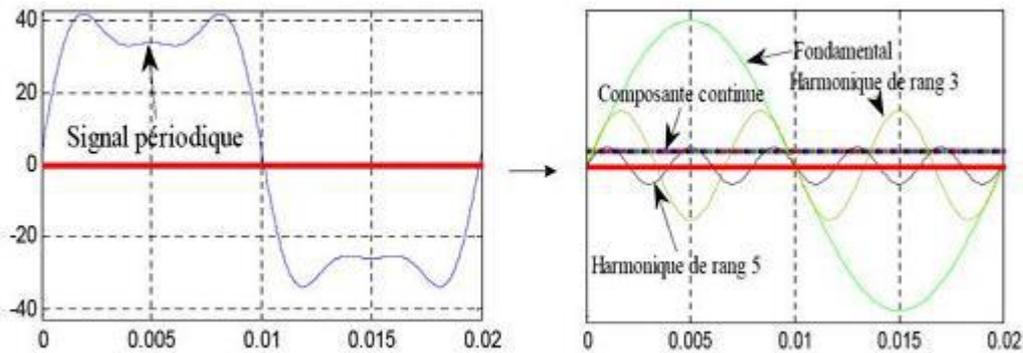


Fig. 6.10: Décomposition d'un signal périodique.

6.6.1.Représentation d'harmonique

Le courant absorbé, par les charges non linéaires, peut être généralement modélisé comme l'addition de plusieurs sources de courant, une de chaque composante fréquentielle, mise en parallèle

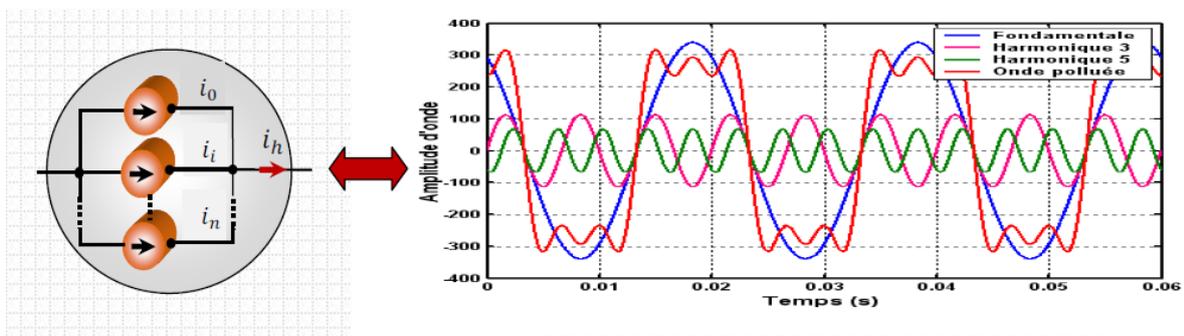


Fig. 6.11: Modélisation d'une charge non linéaire génératrice d'harmoniques.

Pour une charge non-linéaire triphasée (a, b, c), les courants absorbés par chaque phase seront :

$$I(t) = I_0 + \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t + \Phi_1) + \dots + \sqrt{2}I_n \cos(n\omega t + \Phi_n) \quad (5.1)$$

$$(\omega t + \Phi_1 - 2\pi/3) + \dots + \sqrt{2}I_n \cos(n\omega t + \Phi_n - n2\pi/3) \quad (5.2)$$

$$I_b(t) = I_0 + \sqrt{2}I_1 \cos$$

$$I(t) = I_0 + \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t + \Phi_1 - 4\pi/3) + \dots + \sqrt{2}I_n \cos(n\omega t + \Phi_n - n4\pi/3) \quad (5.3)$$

Dans les réseaux électriques triphasés, les principales composantes harmoniques sont de rang 5, 7, 11, et 13 du type ($6 * h \pm 1$), avec $h = 1, 2, \dots$) Les harmoniques de rang 2 généralement sont nulles, car les charges sont symétriques.

6.6.2. Effets des harmoniques

- **Echauffement** : les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$RI^2 = \sum_{h=0}^{\infty} RI_h^2 \quad (5.4)$$

- **Interférence avec les réseaux de télécommunication** : le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits.
- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques** : en présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période.
 - **Risque d'excitation de résonance** : les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances des transformateurs et des câbles sont normalement élevées. les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrées par les convertisseurs statiques ; dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques.

6.6.3. Caractérisation des perturbations harmoniques

Les perturbations harmoniques sont caractérisées par le taux de distorsion harmonique (THD) de la tension ou du courant, par rapport à leurs une onde fondamentales respectives.

6.6.3.1. Taux de distorsion harmonique

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

$$Sh = Xh/X1 \quad (5.5)$$

Où,

Xh : composante harmonique de rang h ;

$X1$: composante fondamentale.

6.6.3.2. Taux d'harmonique global de distorsion

Le taux d'harmonique de distorsion global (THD) définit la déformation de la grandeur alternative:

$$THD(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} X_h^2}}{X_1} \quad (6.6)$$

6.6.3.3. Facteur de puissance (power factor)

Le facteur de puissance $\cos \varphi$ est exprimé par le rapport de la puissance active (P) sur la puissance apparente (S).

$$\cos \varphi = P/S = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (6.7)$$

Q : représente la puissance réactive.

En présence des harmoniques, la puissance déformante (D) donnée par la relation (6.8).

$$D = 3 \cdot V \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{h=50} I_h^2} \quad (6.8)$$

Où,

V : Valeur efficace de la tension du réseau électrique.

Le diagramme de Fresnel en présence d'harmoniques

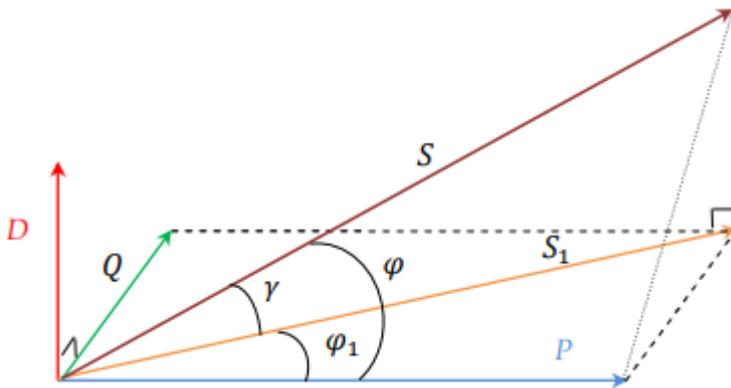


Fig. 6.12: Diagramme de Fresnel des puissances en présence des harmoniques

En présence des harmoniques le facteur de puissance devient :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} = \cos \varphi_1 \cos \gamma \quad (6.9)$$

Où :

φ : Déphasage entre la puissance active (P) et la puissance apparente (S) ;

γ : Déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système linéaire et celle-là dans le cas

d'un système non-linéaire.
puissance active (P) et la puissance apparente (S_1) ;

φ_1 : Déphasage entre la

6.6.3.4. Facteur de Crête (Crest Factor)

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur de crête du courant ou de la tension et la valeur efficace.

$$F_c = \frac{X_{max}}{X_{eff}} \quad (6.10)$$

Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est donc égal à $\sqrt{2}$.

Un facteur de crête très élevé signifie des surintensités ponctuelles importantes. Ces surintensités, détectées par les dispositifs de protections, peuvent être à l'origine de déclenchements intempestifs.

6.7. Effets des perturbations harmoniques sur le réseau électrique

Leurs effets sont liés à l'augmentation des valeurs crêtes (claquage diélectrique) et efficaces (échauffement supplémentaire), ainsi qu'au spectre en fréquence (vibration et fatigue mécanique) des tensions et des courants. On distingue trois catégories.

6.7.1. Aspect économique

- Dégradation du rendement
- Surdimensionnement des équipements
- Perte de productivité
- Influence sur les transformateurs du réseau
- Influence sur les câbles de HT
- Pertes supplémentaires dans les condensateurs
- Bruit additionnel des moteurs et d'autres appareils
- Influence sur le fonctionnement des redresseurs
- Influence sur la télécommande dans les réseaux
- Influence sur les condensateurs des réseaux.

6.7.2. Effets instantanés

- Déclenchements intempestifs des protections
- Perturbations induites des systèmes à courants faibles
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux
- Perte de précision des appareils de mesure

6.7.3. Effets à terme

- Echauffement des câbles et des équipements

- Echauffement des condensateurs
- Echauffements des pertes supplémentaires des machines et de transformateurs.

6.8. Normes standards internationaux sur les perturbations harmoniques

- **La norme CEI 61000-2-2** :elle définit les niveaux de comptabilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension, elle est représentée par le tableau 5.1.

Tableau 5.1.Limites des émissions de tensions harmoniques (la norme CEI 61000-2-2).

Harmonique impairs				Harmoniquespairs	
Non multiples de 3		Multiples de 3			
Rang	Taux %	Rang	Taux %		
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3*25/h				

- **La norme CEI 61000-3-2** :cette norme fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

Tableau 5.2 : Limites des composants harmoniques (la norme CEI 61000-3-2).

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé A
Harmonique impaires	
3	2.3
5	1.14
7	0.77
9	0.4
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 40$	$0.15*15/h$
Harmonique paires	

2	1.08
4	0.43
6	0.3
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot 8/h$

- **La norme IEEE 519-1992** :cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents surale réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau.

Tableau 6.3: limites pour la distorsion harmonique de la tension (la norme IEEE 519-1992).

Tension au point de raccordement (v)	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	<i>THDv</i> (%)
$V_n \leq 69 \text{ KV}$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161 \text{ KV}$	1.5	2.5
$V_n > 161 \text{ KV}$	1.0	1.5

- **La norme IEEE 1159-1995** :cette norme réalise un bilan exhaustif et donne une définition de tous les phénomènes électromagnétiques qui ont lieu dans le réseau en fonction de leur contenu spectral, leur durée et leur amplitude.
- **Les normes Allemandes :**
 - .VDE 0838 : pour les appareils électroménagers
 - .VDE 0160 : pour les convertisseurs
 - .VDE 0712 : pour les ballasts de lampes fluorescentes.
- **BSI-5406(UK)** :Ces normes indiquent les limites strictes de distorsion de courant, très difficiles à respecter pour les industriels pour garantir une bonne qualité de puissance. Alternativement, la limite maximale permise pour les différents harmoniques dominants est également parfois employée comme mesure de la qualité de l'énergie, une limite pratique de moins de 5% du *THD* doit être utilisée par tous les concepteurs de système et/ou les utilisateurs pour assurer la conformité aux normes établies.

6. 9. Les solutions de dépollution

Le respecte des normes de la qualité de l'énergie électriques impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composants harmoniques. Afin de compenser les perturbations du courant, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne existent pour compenser toutes les perturbations peuvent être envisagés.

- ✓ Les solutions traditionnelles qui sont les plus utilisés industriellement
 - Les filtres passifs
- ✓ Les solutions modernes qui sont conçus afin de surmonter les limitations des filtres passifs.

- Il existe trois types de filtres permettant de réduire les tensions et courant harmoniques
 - Filtres actifs : parallèles (FAP), Séries (FAS).
 - Les filtres actifs combinés (UPQC)
 - Les filtres hybrides (actif et passif)
 - Les Facts compensateurs

6. 9. 1. Les solutions traditionnelles

Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et /ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.

- **Agit sur la structure de l'installation**

Une distribution en étoile permet de découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.

- **Rééquilibrage des courants du réseau électrique**

Répartition égale des charges sur les trois phases quand les charges monophasées et biphasées sont mal réparties à cause des courants déséquilibrés dans le réseau électrique de basse tension.

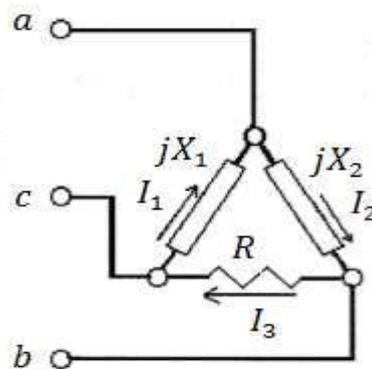


Fig. 6.13 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage des courants

- **Compensation de la puissance réactive**

Pour compenser la puissance réactive et améliorer le facteur de puissance il consiste à placer des condensateurs en parallèles avec le réseau. Les machines synchrones triphasées **servent** aussi à compenser la puissance réactive

- **Utilisation du redresseur dodécaphasé**

C'est une méthode pour une dépollution sélective des harmoniques, le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30 **degré** entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Gretz qui réalise un redresseur hémiphase. C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus

importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restant sont donc de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel.

➤ **Transformateur à couplage spécial**

Cette solution empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et de leurs multiples, Elle n'a cependant aucun effet sur les autres rangs d'harmoniques 5, 7.

➤ **Renforcement de la puissance de court-circuit**

La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique de tension au point de raccordement.

➤ **Filtres passifs**

Un filtre résonant série est placé en parallèle sur le réseau est sélectif, un filtre passif amorti du second ordre est préférable, Les filtres harmoniques passifs ont l'avantage de pouvoir régler la tension au nœud de leur raccordement et corriger le facteur de puissance en dimensionnant correctement les condensateurs afin d'échanger une quantité déterminée de puissance réactive avec le réseau.

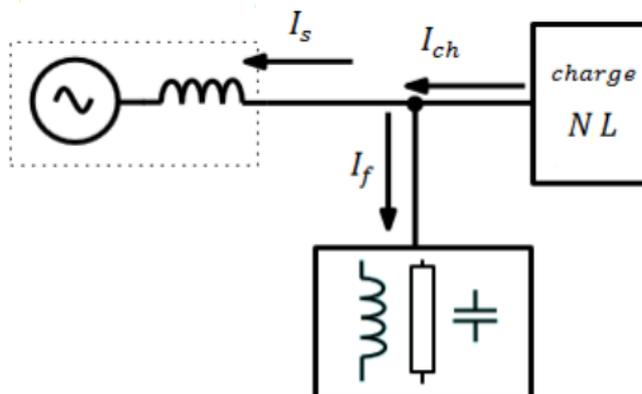


Fig. 6.14: Raccordement d'un filtre passif

➤ **Filtres passifs résonants**

Ils sont constitués d'un circuit RLC en série accordé sur une fréquence déterminée. Ces filtres sont très sélectifs.

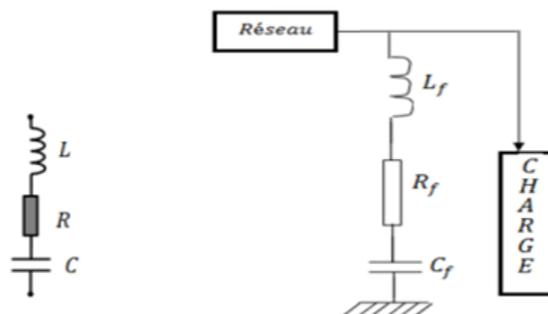


Fig. 6.15: Filtre passif résonant

➤ **Filtre passif amorti (Passe Haut)**

Il est beaucoup moins sélectif et réduit les harmoniques supérieures au voisinage de leurs rangs. C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur.

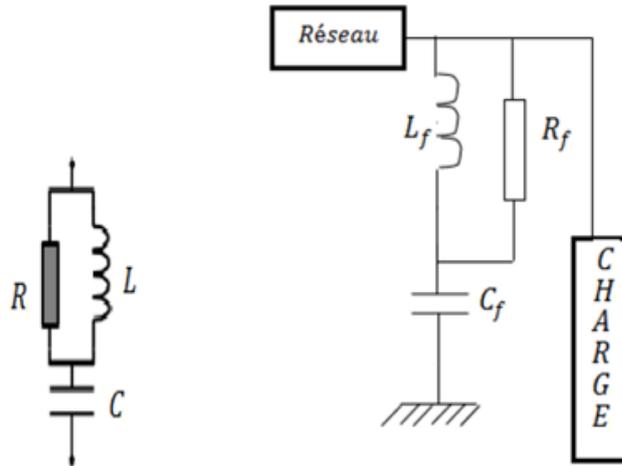


Fig. 6.16: Filtre passif Amorti

- **Phénomène de l'antirésonance**

L'impédance du réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance seront alors amplifiées.

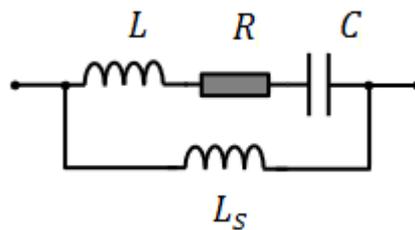


Fig. 6.17 : Filtre passif parallèle anti-résonant

6.9.2. Solutions modernes

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les IGBT, IGCT, GTO et MOSFET, la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles solutions modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations

(harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques. Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques.

6. 9.2.1. Filtres Actifs

Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Quatre types de filtres actifs sont envisagés :

- Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série actif (UPQC): solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.
- Les structures hybrides actives et passives : utilisées pour réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs.

6. 9.2.1.1. Filtre Actif parallèle (FAP)

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution, Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques I_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension.

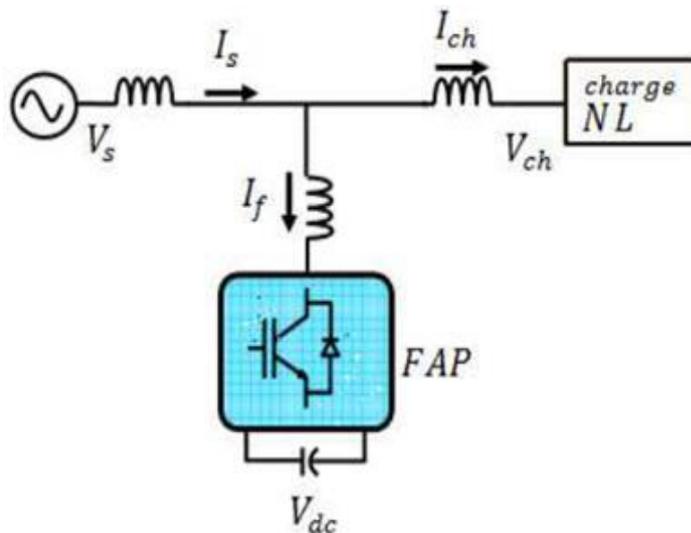


Fig. 6.18: Filtre actif parallèle

6. 9.2.1.1.1. Structure générale du filtre actif parallèle

Le FAP est constitué principalement d'un convertisseur statique (onduleur) à base de semi-conducteurs de puissance pilotés par un système de contrôle approprié. Le schéma de principe d'un FAP à structure tension.

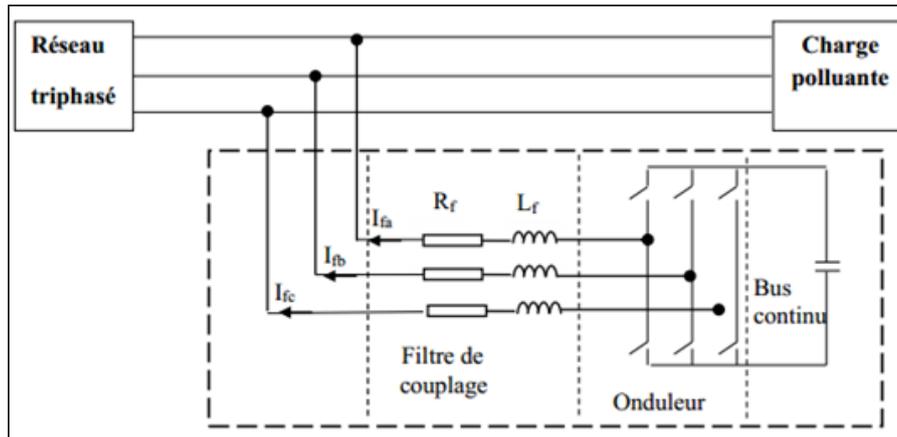


Fig. 6.19: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux

Le filtre actif parallèle est constitué de deux parties distinctes : une partie puissance, une partie commande.

La partie puissance est composée :

- d'un convertisseur de puissance (onduleur à structure tension ou à structure courant)
- d'un filtre de couplage
- d'une source de stockage d'énergie (bus continu)

La partie commande est constitué :

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

6. 9.2.1.1.2. Modélisation du convertisseur du (FAP)

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de tension dépendent de l'état des signaux de commande (S_a , S_b , S_c) :

$S_a = 1$, si T1 fermé et T4 ouvert , $S_a = 0$ si T1 ouvert et T4 fermé

$S_b = 1$, si T2 fermé et T5 ouvert, $S_b = 0$, si T2 ouvert et T5 fermé

$S_c = 1$, si T3 fermé et T6 ouvert, $S_c = 0$, si T3 ouvert et T6 fermé

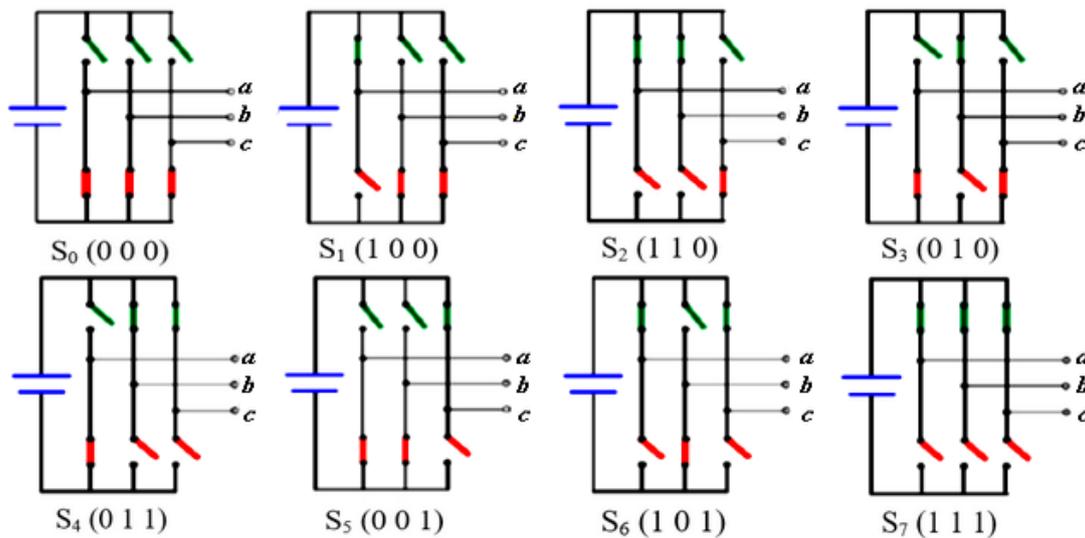


Fig. 6.20: Schéma de l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur.

6. 9.2.1.1.3. Filtre de couplage

Afin de connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et lui faire remplir le rôle de source de courant, il est nécessaire de disposer entre les deux un filtre de raccordement ou dit de sortie de nature inductive (filtre de découplage).

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant
- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

6. 9.2.1.1.4. Élément de stockage d'énergie (DC Link)

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} .

Une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. Pour dimensionner la capacité du condensateur du système de stockage d'énergie deux méthodes peuvent être utilisées :

- La première méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le FAP pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques 5 et 7.
- La deuxième méthode se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible.

6. 9.2.1.1.5. Commande du convertisseur

Les performances du filtre actif dépendent :

- La compensation souhaitée
- La nature des charges polluantes

- La stratégie de commande

La stratégie de commande contrôle du filtre actif parallèle (FAP) se répercute sur la méthode d'identification des harmoniques et le contrôle de onduleur.

❖ Méthode d'identification des perturbations

1. Dans le domaine fréquentiel (la transformée de Fourier rapide)
2. Dans le domaine Temporel (Méthode des puissances instantanées P Q).

❖ contrôle d'onduleur.

- La commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par logique floue.

L'objectif de la commande, que ce soit à MLI, hystérésis ou par Logique floue, est de générer les ordres d'ouverture et fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence.

6. 9.2.1.2. Filtre Actif Série (FAS).

Le filtre actif série est connecté en série avec le réseau. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge non linéaire.

Le filtre actif série crée une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour la fondamentale et de valeur élevée pour les harmoniques.

Le principe de base du rénovateur de tension dynamique est d'injecter une tension d'amplitude et de fréquence requise, de sorte qu'il puisse rétablir la tension du côté de la charge à l'amplitude souhaitée et la forme d'onde, même lorsque la tension de source est déséquilibrée ou déformée.

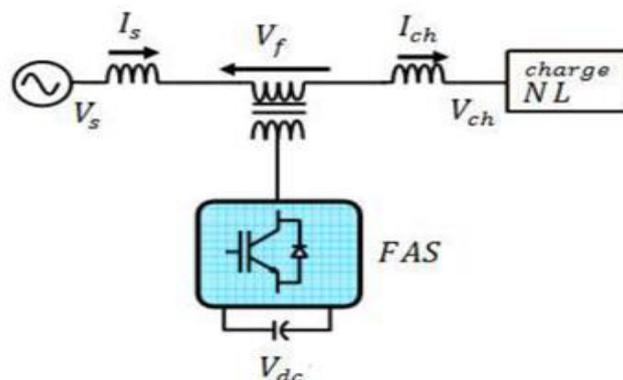


Fig. 6.23: Filtre actif Série

6. 9.2.1.2.1. Structure générale d'un FAS

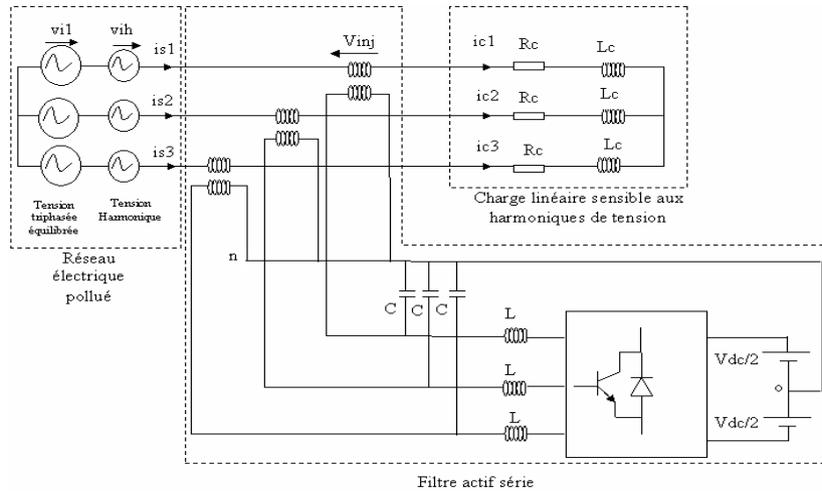


Fig. 6.24: Association (réseau électrique - charge linéaire - FAS)

La configuration générale d'un filtre actif série consiste à deux parties : partie puissance et partie commande.

A. Partie puissance

La partie puissance est composé de:

- **Convertisseur de source de tension (SVC)**

Le SVC est un convertisseur (onduleur) de source de tension qui génère une tension sinusoïdale avec toutes les amplitudes, fréquences et angle de phase. qui est composé des commutateurs à IGBT (interrupteurs) contrôlés par des impulsions. Le SVC est capable de remplacer temporairement la tension d'alimentation et génère une partie de cette tension manquante.

- **Filtre de sortie L C**

Est un filtre passif contient une bobine en série et un condensateur en parallèle du côté haute tension du transformateur d'injection. Ce filtre son rôle de rejeter les composantes harmoniques de commutation de la tension injecté. On connecte le filtre de sortie du côté convertisseur de façon à éviter l'injection des harmoniques dans le transformateur de couplage pour atténuer les composants dues aux commutations de l'onduleur.

Pour l'atténuation des harmoniques de découpage, on choisit les valeurs de L et C de façon que :

$$LC = \frac{1}{(2\pi f_c)^2} \quad (6.11)$$

▪ Transformateur d'injection et protection

Le but d'utilisation d'un transformateur de couplage ou d'injection de tension est qu'il permet de raccorder les compensateurs à des tensions supérieures en assurant l'isolation galvanique par rapport à la haute tension.

L'inconvénient majeur de l'emploi des transformateurs d'injection est la chute de tension occasionnée par leur inductance de fuite (L_f, f).

Les transformateurs d'injection utilisés dans le filtre actif série jouent un rôle crucial pour assurer la fiabilité et l'efficacité du système de restauration.

En outre, le transformateur d'injection d'appoint sert à isoler la charge non linéaire du système.

Le FAS est protégé contre un court-circuit par des transformateurs à circuit magnétiques saturable et grâce à leurs caractéristiques magnétiques de saturation contribuent à la protection contre les défauts coté charge.

▪ Élément de stockage

La capacité du dispositif de stockage d'énergie a un impact important sur la capacité de compensation du système. La compensation de la puissance réelle est essentielle lorsqu'une grande chute de tension se produit. Le système de stockage sans point milieu permet à l'onduleur de tension d'avoir une tension de sortie maximale $V_{max} = \frac{2}{3} V_{dc}$. La capacité de compensation d'un creux est donc limitée par son circuit de stockage

B. Partie commande

Pour contrôler la tension lors des perturbations tel que : la chute de tension, surtension et déséquilibre. Le FAS doit compenser d'une façon continue sur chaque phase. La compensation des défauts de tensions peut être limitée par un certains nombres de facteurs, y compris l'estimation de puissance active du filtre, les conditions sur la charge et les types de défauts avec une stratégie de commande pour compenser n'importe quelles perturbations de tension.

B.1. Mise en œuvre de la commande du FAS

❖ Identification des tensions harmoniques de référence

Pour déterminer les tensions perturbatrices qui seront injectées par le convertisseur en opposition de phase, on utilise la méthode qui se base sur la théorie référentielle synchrone (dq).

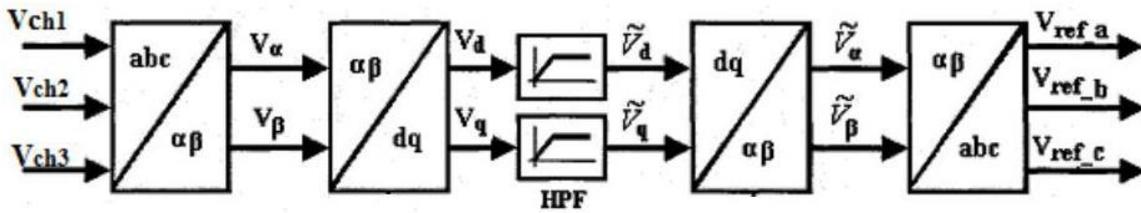


Fig. 6.25. Algorithme de la méthode d'identification dq

❖ Régulation de la tension du bus continu (DC-Link)

Lors d'un déséquilibre de puissance active, le condensateur doit fournir la différence de puissance, donc une variation de tension aux bornes du condensateur d'où une régulation pour la stabilisation de la tension au borne du condensateur.

La régulation de la tension du bus continue permet de :

- Maintenir la tension aux bornes du condensateur à un niveau fixe, avec une assurance des compensations des pertes aux commutations des interrupteurs du filtre actif série.
- Limiter les variations de la tension pour éviter la détérioration des performances du filtre. La régulation de la tension confère au filtre actif de charger et maintenir constante la tension aux bornes des condensateurs et de créer une puissance réactive qui devra être ajoutée à la consigne de la composante harmonique de la puissance réactive.

❖ Commande des interrupteurs du convertisseur

Les performances du FAS est notamment la diminution du THD de la tension de source sont certes liées aux performances de la génération des références de tension.

La stratégie de commande de l'onduleur de tension, trois techniques de commande peuvent être utilisées :

- La commande par PI
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)
- La commande par logique floue

6. 9.2.1.3. Combinaison parallèle série actif (UPQC)

Cette structure s'appelle : Conditionneur de qualité d'énergie unifiée (UPQC: Unified Power Quality Conditionner) est principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle qui partagent la même capacité du bus continu. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance.

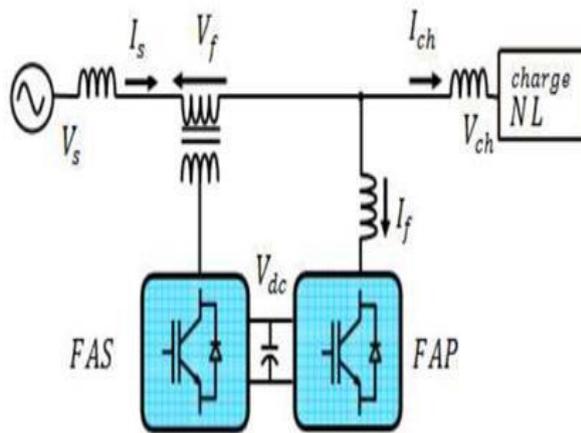


Fig. 6.26: Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

Tableau.6.2. Récapitulatif des méthodes de rejet des courants et de tensions harmonique.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Filtrage passif	Amélioration du $THDi$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Risque de résonance ▪ Pas d'adaptabilité
Filtrage actif parallèle (FAP)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amélioration du $THDi$ ▪ Adaptabilité aux variations de la charge et du réseau 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas d'amélioration de la forme de la tension
Filtrage actif Série (FAS)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amélioration du $THDv$ ▪ Adaptabilité aux variations de la charge et du réseau 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas d'amélioration de la forme du courant
Filtrage universelle (UPQC)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amélioration du $THDi$ et $THDv$ ▪ Adaptabilité aux variations de la charge et du réseau 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réalisation difficile

6. 9.2.1.4. Filtre hybride actif et passif

Les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

A. Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

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

Le filtre série règle la tension au point PCC tandis que le filtre parallèle règle quelques harmoniques de courant (rangs inférieurs) qui doivent être supprimés.

Cette topologie possède la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant.

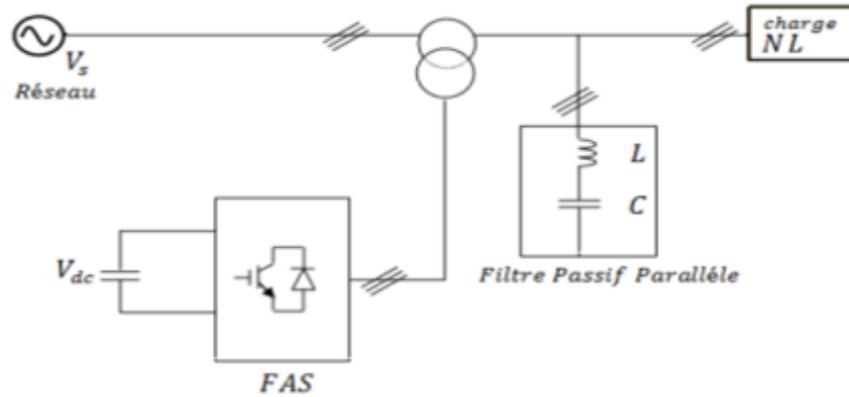


Fig.

6.27: Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

B. Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Il atténue fortement les courants harmoniques entre charge et la source par «abaissement» de l'impédance globale (filtres passifs et le compensateur actif). Puisque le compensateur actif n'est pas traversé par la totalité du courant réseau, son dimensionnement peut être réduit.

Le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

Dans cette configuration, le compensateur n'agit que sur les courants harmoniques, et améliore l'efficacité des filtres passifs.

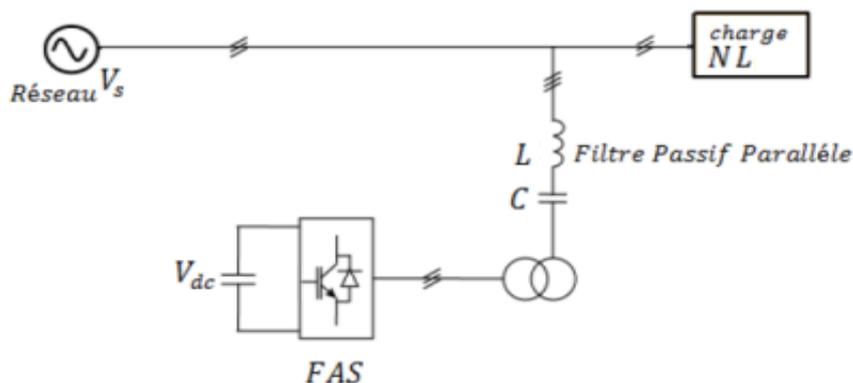


Fig. 6.28: Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

C. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle est de compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle.

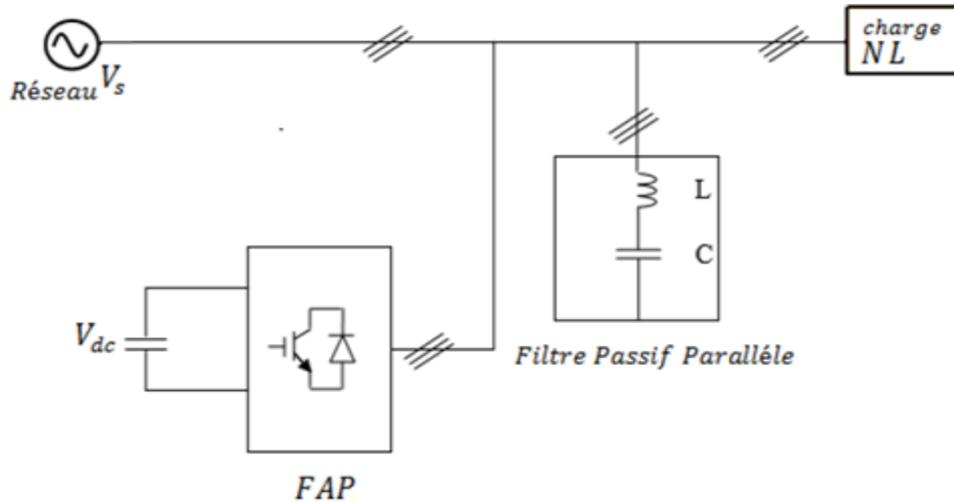


Fig. 6.28: Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

D. Les Systèmes FACTS

Un FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la tension, augmenter les capacités de transit, ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité.

1. Types de FACTS:

a) FACTS de type série:

Ces types de FACTS connectés en série avec le réseau peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable.

a.1. Condensateur série commandé par thyristors

peut être réalisé de deux manières:

- TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor)

Ce système permet:

- ✓ Accroître la longueur électrique d'une ligne de transmission à courant alternatif;
- ✓ L'amortissement des oscillations de puissance;
- ✓ La stabilité de la tension;
- ✓ L'équilibrage des flux de charge dans les réseaux de transmission;
- ✓ Une grande plage de variation de l'impédance équivalente capacitive et inductive;

- ✓ La réduction des problèmes dus aux phénomènes de résonance sub-synchrone.
 - **TSSC**(Thyristor Switched Series Capacitor)

La différence entre TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés soit de 180 degrés.

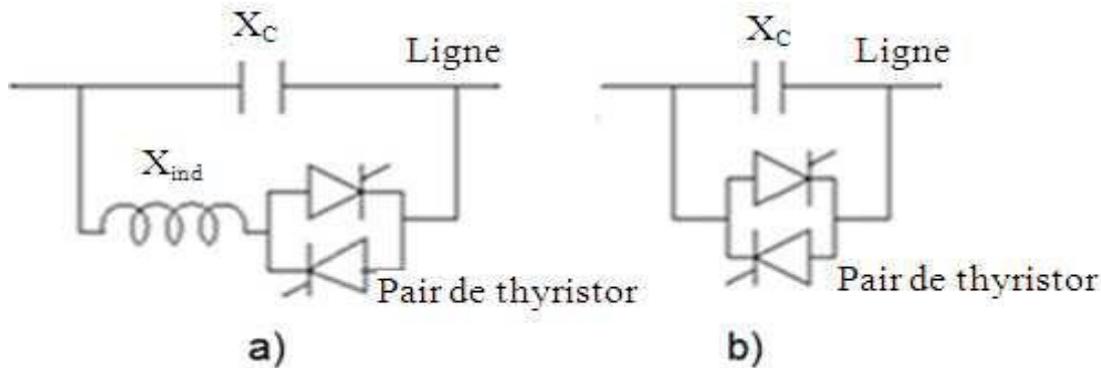


Fig 6.30. Schéma de principe de a) TCSC et b) TSSC

a.2. Réactance Série Contrôlée par Thyristor TCSR (Thyristor Switched Series Reactor (TCSR):

Le TCSR est un compensateur inductif placé en série avec la ligne de transmission.

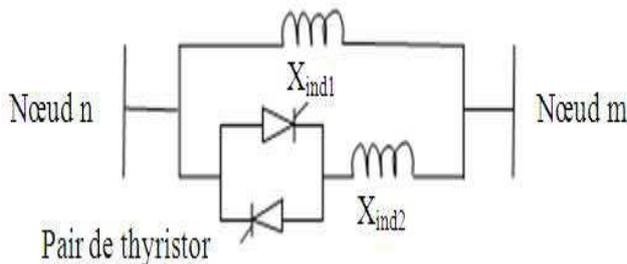


Fig 6.31. Structure d'un TCSR.

a.3 .Compensateur Série Synchrone Statique (SSSC) (Static Synchronous Series Compensator (SSSC):

Le SSSC est constitué d'un convertisseur statique avec une source d'énergie V_{dc} , connectée en série avec la ligne de transmission à travers un transformateur de tension placé en série. Le SSSC injecte en série une tension alternative V_c en quadrature avec le courant de ligne I_L à l'aide d'un transformateur série.

b. FACTS de type parallèle:

b.1 Compensateur Statique Synchrone (STATCOM):

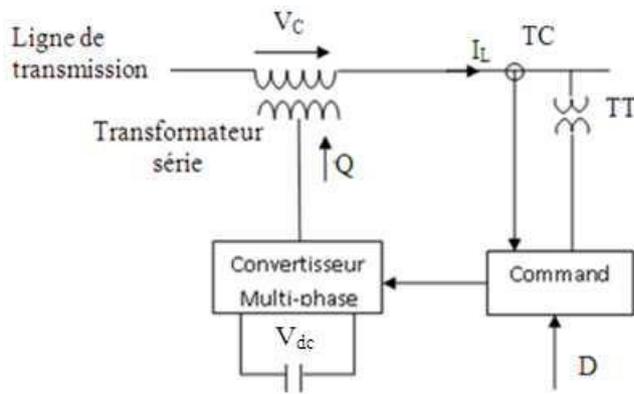


Figure 6.32. Schéma de principe d'un SSSC.

Conclusion

Les perturbations pouvant affecter la tension du réseau électrique, ces perturbations **présentées** par : les harmoniques, les déséquilibres du courant et de tension, les creux de tension et les surtensions. Ces perturbations ont des effets néfastes sur les équipements électriques pouvant aller à des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

La solution classique à base des filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. L'utilisation des convertisseurs statiques avancés liés au progrès des composants d'électronique de puissance (IGBT, MOSFET...) portent des solutions peu encombrantes qui ne subissent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une adaptation et une grande flexibilité face à l'évolution du réseau et de la charge non linéaire.

REFERENCES

1. [Belguidoum Hocine](#) « Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandés »Mémoire de Magister En Electrotechnique, Option : Réseaux Electriques, Université Ferhat Abbas— Sétif
2. [MOSTEFA TOUNSI Mahmoud](#) « Compensation des harmoniques et des perturbations du réseau connecté à une charge non linéaire utilisant les convertisseurs statiques avancés ».Thèse de doctorat En Electrotechnique, Option : Commande électrique, USTO 2021.
3. [Hasnaoui Othman B.A](#) « Support de cours et TD d'électronique de puissance »Ecole Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis, Université de Tunis.
4. [A Lopez De Heredia Bermeo](#). "Commande avancée des systèmes dédiée à l'amélioration de la qualité de l'énergie: de la basse tension à la montée en tension". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique (Grenoble), Novembre 2006.
5. [S. K. Mohsen](#). "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs: série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques". Diss. (Nantes), 2006.
6. [A. Omeiri](#). "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant". Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar (Annaba),2007.
7. [L. Hichem](#). "Contribution par une Nouvelle Approche Modulaire au Filtrage Actif des Harmoniques Dans les réseaux Electriques de Distribution," Thèse de doctorat en science, Université de Batna, 1993.
8. [G. Thierry](#). "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique». Dissertation, Nantes, 1997
9. [H.Djehloud](#) . "Filtrage actif de puissance." Thèse de doctorat, Université Mentouri-(Constantine), 2007.