

III. Les interactions sources-récepteurs

III-1. Déséquilibré

Dans un réseau triphasé, on a idéalement des amplitudes égales de la tension et du courant respectivement sur chacune des trois phases et un angle de phase de 120 degrés. Lorsque les tensions ou les courants présentent une différence d'amplitude, il y a déséquilibre et cela peut causer des problèmes pour les équipements triphasés branchés au réseau. L'impact le plus courant du déséquilibre est la surchauffe des équipements et, par conséquent, la dégradation de l'isolation électrique et la réduction de la durée de vie.

Le phénomène de déséquilibre est la situation où les trois tensions/courants du système triphasé ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas décalées normalement les unes par rapport aux autres de 120°.

Les déséquilibres de tension surviennent habituellement en présence d'un déséquilibre des charges et de leurs appels de courant. En effet, toute charge triphasée doit appeler un courant identique sur chaque phase.

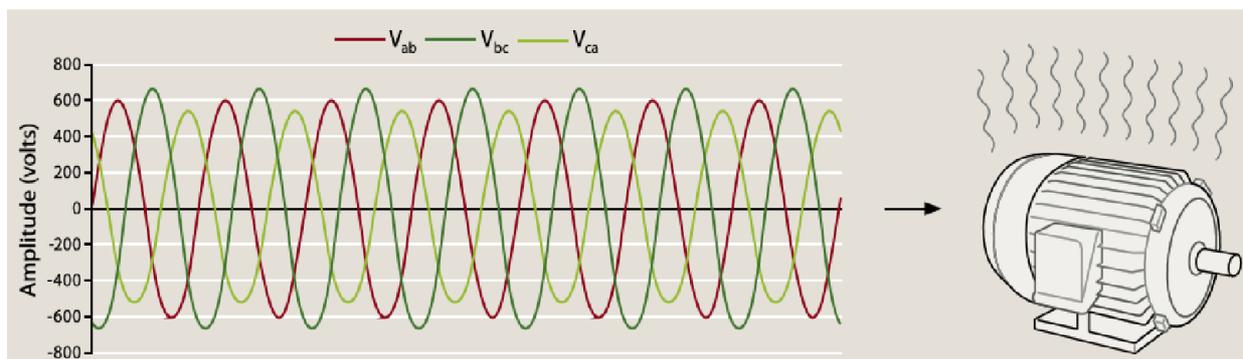


Figure.1. Forme d'onde illustrant un déséquilibre de tension

III-1-1. Types de circuits triphasés déséquilibrés

1. Charge déséquilibrée : Il peut exister un court-circuit dans la charge, ou une mauvaise répartition des charges monophasées sur le réseau 3φ.
2. Source déséquilibrée : Court-circuit à la source ou dans un transformateur.
3. Combinaison de source et charge déséquilibrées.

De façon pratique, on retrouve des charges déséquilibrées plus souvent que des sources déséquilibrées. On conçoit les sources pour qu'elles soient le plus équilibrées possible.

III-1-2. Comment détecter un problème de déséquilibre de tension ?

Voici comment obtenir une bonne approximation du déséquilibre dans un réseau :

1. Mesurer les trois tensions phase-phase.
2. Calculer la tension moyenne.
3. Déterminer la tension qui présente le plus grand écart par rapport à la moyenne.
4. Calculer le rapport entre cet écart et la tension moyenne.

Exemple

1. Tensions mesurées : $V_{ab} = 600 \text{ V}$; $V_{bc} = 630 \text{ V}$; $V_{ca} = 570 \text{ V}$
2. $V_{\text{moyenne}} = 600 \text{ V}$
3. $\Delta V = 630 \text{ V} - 600 \text{ V} = 30 \text{ V}$
4. $V_{\text{déséquilibre}} = (30 \text{ V} \div 600 \text{ V}) \times 100 = 5 \%$ (déséquilibre très élevé)

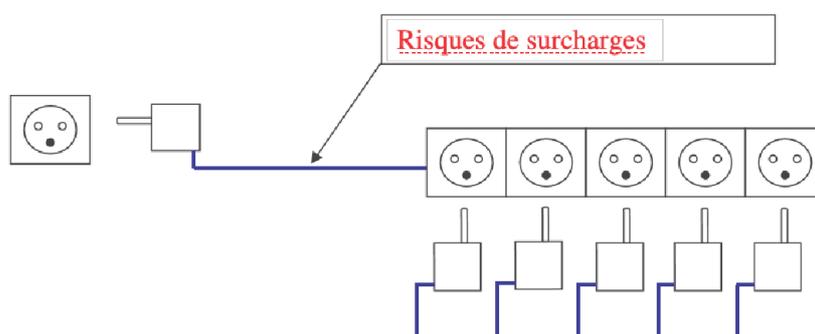
Une bonne répartition des charges et un réglage judicieux des protections contre les déséquilibres de courant permettent une exploitation optimale. Il est également recommandé de vérifier en continu la tension pour détecter toute dégradation du réseau et ainsi préserver la durée de vie des équipements.

III-2. Les surintensités

Les causes et les valeurs des surintensités sont multiples. On distingue habituellement dans les surintensités, les surcharges et les courts-circuits.

III-2-1. La surcharge

Le courant de surcharge est en général une faible surintensité se produisant dans un circuit électrique sain. L'exemple type en est le circuit alimentant des prises de courant sur lesquelles on a raccordé un trop grand nombre d'appareil.



Le terme "surcharge" est utilisé pour un courant excessif circulant dans un circuit en bon état électriquement. Les surcharges sont en général inférieures à 10 fois le courant nominal du circuit. Les surcharges de courant ne sont pas beaucoup plus élevées que le courant maximum permanent d'une installation, mais si elles se maintiennent trop longtemps elles peuvent faire des dégâts. Les dégâts, plus particulièrement aux matières isolantes en contact avec les conducteurs de courant, sont la conséquence de l'effet thermique du courant. La durée de cet effet thermique est relativement longue (de quelques secondes à quelques heures), et la surcharge peut donc être caractérisée par la valeur efficace du courant. La protection contre une surcharge est réalisée par un dispositif de protection capable de diminuer la durée de la surcharge.

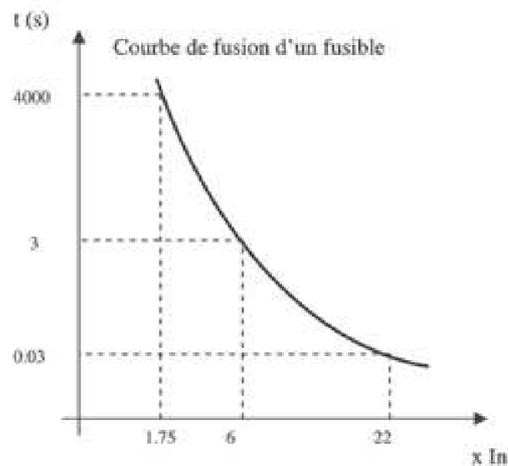
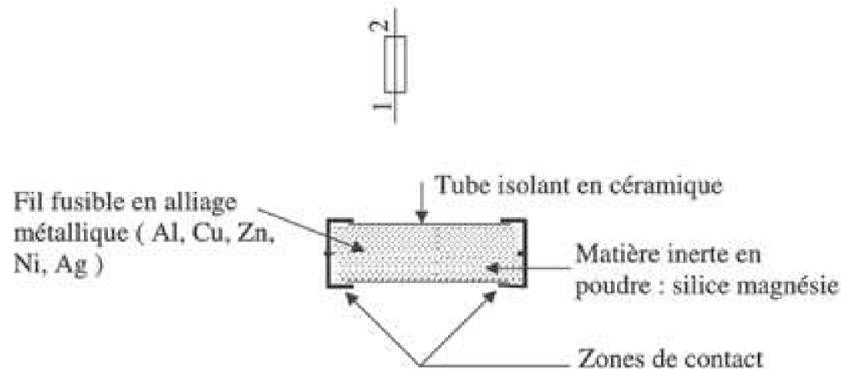
III-2-1-1. Causes habituelles des surcharges

- Manque de maintenance : Accumulation de poussières ...
- Vieillesse des équipements : Pièces usées, lubrification insuffisante ...

- Problème thermique : Isolement dégradé, composants défaillants
- Qualité de l'énergie : Surtensions et sous tensions transitoires

III-2-1-2. Protection

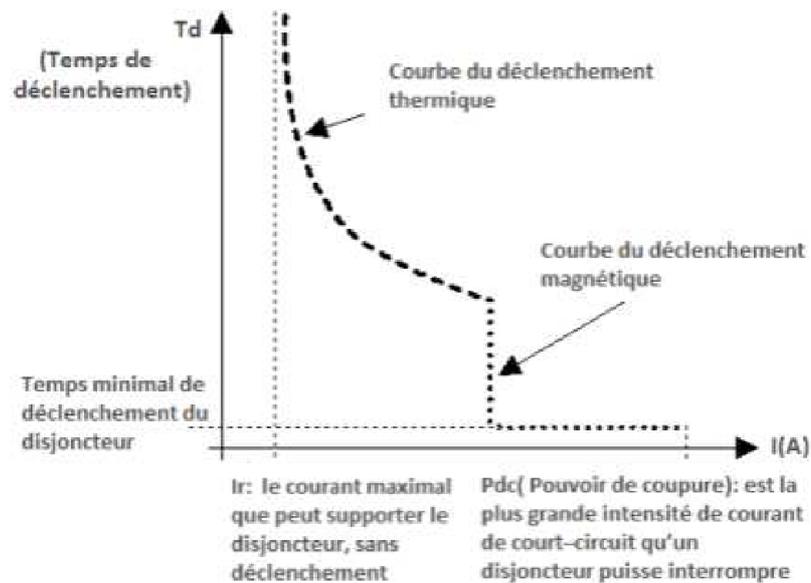
- **Les fusibles** : Un fusible est un appareil de connexion dont la fonction est d'interrompre le circuit par la fusion d'un élément calibré lorsque le courant qui le traverse dépasse la valeur de son calibre. La fusion est créée par un point faible dans le circuit grâce à un conducteur dont la nature, la section et le point de fusion sont prédéterminés par le conducteur.



On remarque les indications portées sur un fusible :

- **La marque**
- **Le calibre**
- **Le type**
- **La tension maximum d'utilisation**
- **La couleur de l'inscription**

- **Les Disjoncteurs** : cette protection est assurée par l'association d'un relais thermique, qui assure la protection contre les surcharges, et d'un relais magnétique, qui assure la protection contre les courts-circuits, d'où l'appellation fréquente d'un disjoncteur magnéto-thermique.



La courbe de fonctionnement d'un disjoncteur

III-2-2. Le court-circuit

Un court-circuit est le contact accidentel entre deux conducteurs de polarité différente. Le courant de court-circuit est en général une forte intensité produite par un défaut de résistance négligeable entre des points présentant une différence de potentiel en service normal.

Le court-circuit est souvent dû à une défaillance électrique importante comme la rupture d'un isolant, la chute d'un objet métallique sur des barres ou la défaillance d'un semi-conducteur. Il en résulte un courant de défaut dont la valeur efficace est très élevée (typiquement supérieure à 10 fois la valeur du courant nominal de l'installation).

III-2-2-1. Types de court-circuit

Sur le réseau triphasé, trois types de courts-circuits peuvent être observés :

- Monophasé : phase et neutre reliés ensemble (80 % des cas) ;
- Biphasé : deux phases reliées ensemble (15 % des cas) ;
- Triphasé : les trois phases sont raccordées (5 % des cas).

III-2-2-2. Les risques d'un court-circuit

- dégradation de matériel ;
- dégradation du circuit ;
- électrocution ;
- incendie ;
- etc.

III-2-2-3. Causes habituelles des courts-circuits

- Élément étranger : Boulons, tournevis autres objets conducteurs
- Défaillances de composants : Claquage de semi-conducteur
- Surtensions : Foudre, commutations, interruptions
- Défauts de terre de grande amplitude : Court -circuit à la terre

III-3. Les surtensions

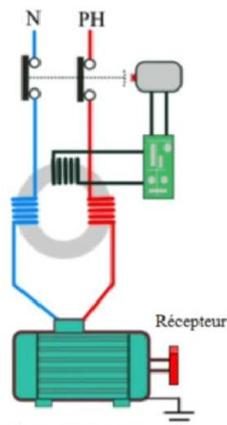
En électrocinétique, la surtension désigne le fait pour un élément particulier d'un dipôle électrique d'avoir à ses bornes une tension supérieure à celle aux bornes du dipôle complet. C'est le cas par exemple de la tension aux bornes d'un condensateur dans un dipôle RLC série en résonance.

Lorsqu'un composant électrique à deux bornes reçoit une tension supérieure à la tension normale du circuit, on dit qu'il est en « surtension ». Quand ils sont branchés sur le secteur, vos appareils ménagers subissent automatiquement ces petites pointes de tension, à l'allumage par exemple. On estime ainsi qu'un four reçoit en moyenne une vingtaine de pointes de tension par jour. Ces surtensions à faible intensité ne sont pas d'une grande gravité, mais endommagent très lentement les circuits électroniques de vos appareils.

III-3-1. Différents type de surtension dans les réseaux électriques

- **Surtension permanente** : d'une durée de plusieurs heures (l'effet Ferranti peut être une cause de surtension permanente).
- **Surtension temporaire** : d'une durée d'une ou de plusieurs secondes. Un court-circuit d'une des phases d'un réseau triphasé à la terre (défaut d'isolement d'un câble HT par exemple) peut produire une surtension temporaire sur les autres phases (phénomène non négligeable en haute tension).
- **Surtension de manœuvre** : liée à la manœuvre d'un disjoncteur ou d'un sectionneur, d'une durée de quelques dizaines microsecondes à quelques millisecondes. La manœuvre d'un sectionneur dans un poste électrique à isolation gazeuse engendre en particulier des surtensions à fronts très raides.
- **Surtension de foudre** : due au foudroiement d'une ligne à haute tension.

III-3-2. Protection



Fonctionnement du dispositif différentiel d'un disjoncteur

III-4. Les harmoniques

Les harmoniques sont les tensions ou les courants sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du réseau (50 Hz dans notre cas).

III-4-1. Charges linéaires et non linéaires

Une charge est dite "linéaire" si le courant qu'elle absorbe est sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ce type de récepteur ne génère pas d'harmonique.

Les charges non linéaires appellent du réseau un courant non purement sinusoïdal. Seul le fondamental à 50 Hz de ce courant déformé contribue, avec la tension, à l'apport de la puissance active consommée par l'équipement. Les charges non linéaires génèrent des harmoniques.

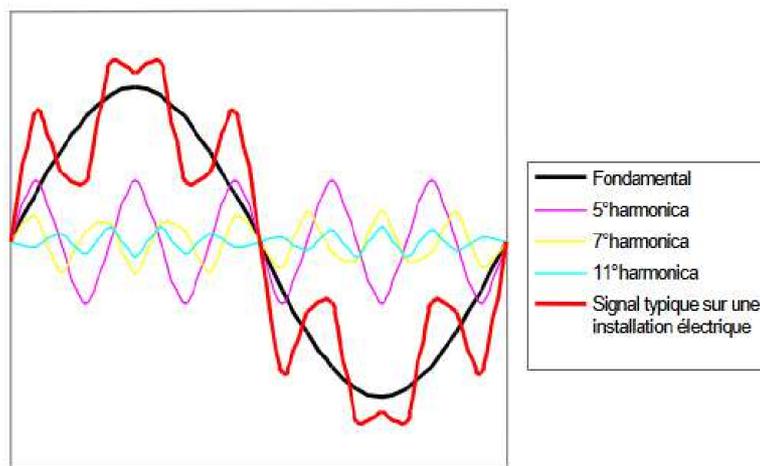
III-4-2. Décomposition en série de Fourier

Tout signal périodique quelle que soit sa forme, peut être décomposé en somme de signaux sinusoïdaux dont la fréquence respective est un multiple entier de la fréquence de fondamental. La fréquence du fondamental est la fréquence du signal d'origine (50 Hz).

$$S(t) = \sum_1 (A_0 + A_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1) + A_2 \cdot \sin(2\pi \cdot 2f_1) + A_3 \cdot \sin(2\pi \cdot 3f_1) + \dots + A_n \sin(2\pi \cdot nf_1))$$

Cette expression mathématique permet de décomposer n'importe quel signal en somme de signaux sinusoïdaux, où f_1 est fréquence de la composante fondamentale et $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ sont les amplitudes respectives de chaque sinusoïde. Ces amplitudes se calculent en appliquant des relations définies par les séries de Fourier.

Nous pouvons donc, définir les harmoniques comme des oscillations sinusoïdales multiples du fondamental. De ce fait, les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est supérieure à celle du fondamental.

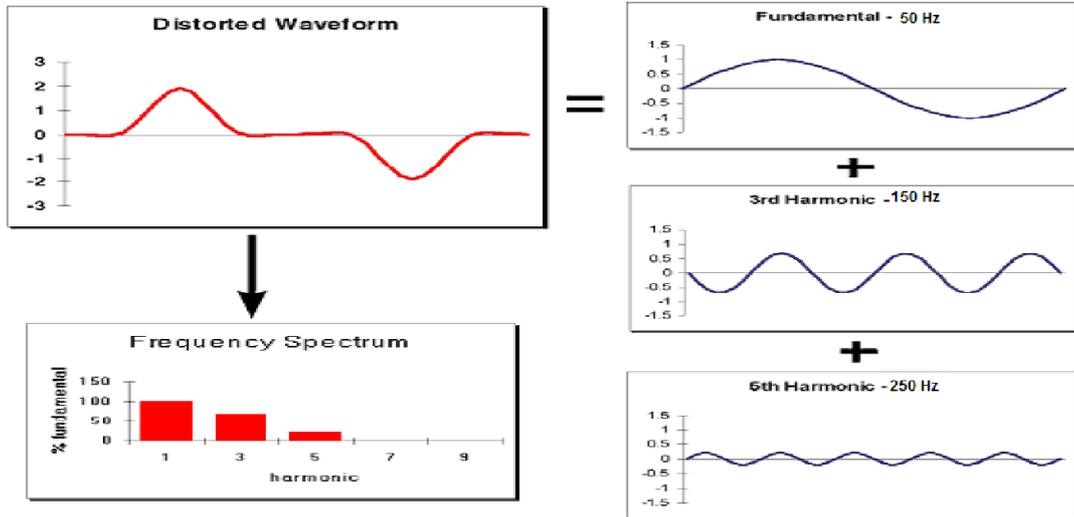


Un signal périodique de fréquence f peut s'écrire comme la somme de :

- un terme constant qui correspond à la composante continue (c'est-à-dire la valeur moyenne dans le temps)
- un terme sinusoïdal de fréquence f (c'est le fondamental ou harmonique de rang 1)
- un terme sinusoïdal de fréquence $2f$ (harmonique de rang 2)
- un terme sinusoïdal de fréquence $3f$ (harmonique de rang 3)
- etc ...

$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n>2} V_n \sin(n \omega t + \varphi_n)$$

$$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n>2} I_n \sin(n \omega t + \theta_n)$$



III-4-3. Notions de tensions et courants harmoniques

⊙ Valeur efficace (True RMS)

Par définition, la valeur efficace d'un courant périodique $i(t)$ est : $I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$

$$I_{eff} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \sum_{n \geq 2} I_n^2} \quad V_{eff} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + \sum_{n \geq 2} V_n^2}$$

⊙ Valeur efficace des harmoniques

Il s'agit de la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques

$$I_H = \sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2} \quad V_H = \sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}$$

III-4-4. Total Harmonic Distorsion, THD (Taux de distorsion harmonique)

Les courants harmoniques circulant à travers les impédances du système électrique provoquent des baisses de tension harmonique, observées sous forme de distorsion harmonique en tension.

L'une des solutions destinées à déceler la présence d'harmoniques est le calcul du THD, taux de distorsion harmonique.

Définition du taux de distorsion harmonique : $THD = \frac{\text{valeur efficace des harmoniques}}{\text{valeur efficace du fondamental}}$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}}{V_1} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}}{I_1}$$

III-4-5. Problèmes créés par les harmoniques

⊙ Effets immédiats

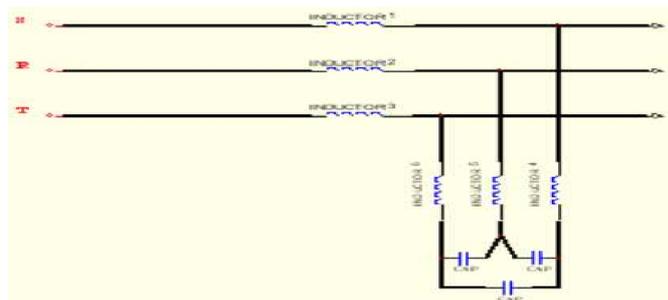
- Dégradation du facteur de puissance

- Surcharges des câbles, transformateurs et moteurs
- Augmentation du bruit dans les moteurs
- Erreur d'enregistrement dans les compteurs
- Surdimensionnement des câbles
- Perturbation des systèmes électroniques
- ⊙ **Effets à moyen et long terme**
- Réduction de la durée de vie des moteurs
- Détérioration des batteries de condensateurs
- Réduction de la durée de vie des transformateurs
- Vieillesse accélérée des isolants et des diélectriques

III-4-6. Solutions

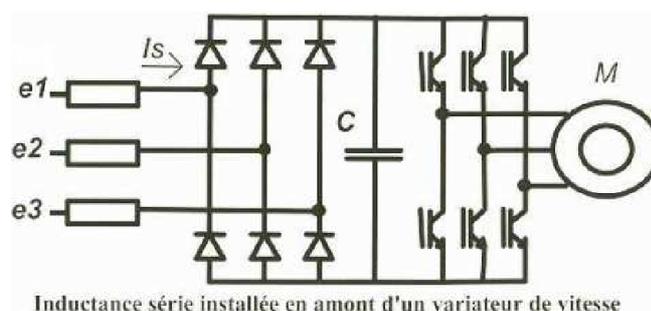
⊙ Filtres passifs

Ces filtres sont efficaces en cas de prédominance d'un rang particulier. Ils sont dimensionnés de façon à ce qu'ils soient résonnants en courant à la fréquence du rang considéré afin de l'atténuer et si possible l'annuler en amont de la ligne. Ils sont de type L-C.



⊙ Inductances série

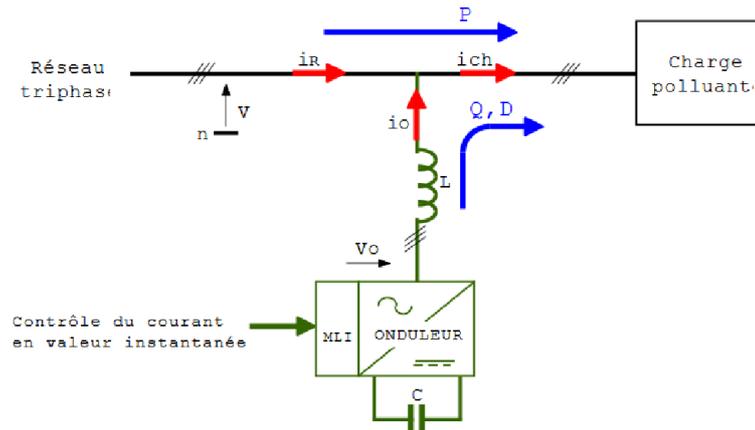
Comme son nom l'indique, elles sont placées en série en amont de la charge (entre la source et la charge) là où l'on souhaite diminuer le taux de distorsion harmonique en courant. Leur présence diminue environ de moitié le taux de distorsion harmonique en courant au niveau de la charge du fait de leur efficacité limitée. Cette solution est adoptée pour protéger les batteries de condensateurs, les redresseurs triphasés et les variateurs de vitesse.



⊙ Compensateurs actifs ou filtres actifs

Le compensateur actif analyse en permanence la forme d'onde du courant dans chacune des 3 phases. Le compensateur actif (ensemble C, OND, L) doit fournir la puissance déformante et (ou) la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance active.

Pour cela, le circuit de contrôle (boucles de régulation), en agissant sur la commande MLI, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur ($i_{O1,2,3}$) de telle sorte que le courant fourni par le réseau ($i_{R1,2,3}$) soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante ($V_{1,2,3}$).



Compensateur actif génère une tension harmonique qui garantit une tension sinusoïdale aux bornes de la charge.