



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de la

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Etude sur les harmoniques du réseau
électrique.

Dirigé par:
M. BESSOUS Nouredine.

Réalisé par:
-MED MAHFOUDH Ould Brahim

- GHENBAZI Slimane

Soutenu au Juin 2013





Remerciements

Nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné la foi et la force de mener ce travail à son terme.

*Nous remercions de tout cœur notre professeur encadreur **M. BESSOUS Noureddine** pour tout les efforts qu'il déployé afin que nous parvenons à finir ce travail pour tout l'énergie et l'ardeur qu'il a bien voulu fournir pour le temps précieux qu'il nous a consacré pour nous mettre à niveau, même remerciement à chaque professeur de notre respectable jury et à tout les professeurs du département d'électrotechnique qui nous ont aidé et éclairé durant notre parcours et Que le chef du département d'Electrotechnique Monsieur ZGUEB Boubacar trouve ici l'expression de notre gratitude et de nos remerciements les plus chaleureux pour tout le soutien qu'il nous a apporté.*

Nous remercions de même tous nos aimables collègues à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin pour finir ce projet.



Dédicace

je dédie ce modeste travail à ceux qui ont passés leur vie rêvant de voir ce jour-ci , à ceux qui mon entourés d'amour et de tendresseà :

A la fleur de ma vie... ma très chère Maman (et papa) Salka ment aheïmed en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, son sacrifié tout au long de mes études.

A mon papa l'ingénieur sidi Mohamed ould isselmou qui est l'origine de tout ce que j'ai accompli de bien.

A ma maman Meyem.

Mon honorable et très cher frère khalihenne qui a sacrifié sa vie qu'on puisse se trouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.

A ma chérie kebeti lala .

A mon papa Hamoud abdel hamid .

A mon oncle le colonel neuh ould khattar.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Med mahfoudh

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A mes frères et ma sœur.

A ma famille.

A tous mes amis.

Ghenbazi slimen.

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I: Généralités sur le réseau électrique	
I.1.Introduction.....	2
I.2. Généralités sur les réseaux électriques	3
I.3. Structure générale des réseaux électriques	4
I.3.1. La production	4
I.3.2 Le transport	4
I.3.3 La distribution	4
I.3.4 La consommation	4
I.4. Caractéristiques générales du transport	5
I.5. Fréquence normalisée	5
I.6. Systèmes triphasés	6
I.6.1 Définitions	6
I.6.2. Caractéristiques d'un système triphasé	8
I.7. Les avantages d'un système triphasé.....	8
I.8. Tensions simples et tensions composées.....	9
I.8.1. Etude des tensions simples	9
I.8.1.1. Etude des tensions simples	9
I.8.1.2. Définition.....	10
I.8.2. Etude des tensions composées.....	10
I.8.2. 1. Définition	10
I.8.2.2 Equations horaires et oscillogrammes.....	10
I.9. Relation entre U et V	11
I.10. La symétrie au système triphasé	11

I.10.1. système triphasé équilibré et déséquilibré	11
I.10.1.1. Définition	11
I.11. Les couplages du système triphasé	12
I.11.1. Couplage étoile	12
I.11.1.1. Relations entre les courants	12
I.11.1.2. Puissances	13
I.11.2. Couplage triangle	14
I.11.2.1. Relations entre les courants	14
I.11.2.2. Puissances	15

Chapitre II: Les harmoniques dans le réseau électrique

II.1. Introduction	17
II.2. Caractéristique des grandeurs électriques.....	17
II.3. Perturbations harmonique en tension et en courant	18
II.3.1- Généralités sur les harmoniques	18
II.3.1.1 Définitions	18
II.4. Origines et sources des harmoniques	24
II.5. Influence des harmoniques sur la qualité de l'énergie.....	25
II.5.1 Décomposition en série de Fourier.....	25
II.5.2. Valeur efficace (True RMS).....	26
II.5.3. Valeur efficace des harmoniques.....	27
II.5.4. Taux de distorsion harmonique THD (en %).....	27
II.5.5 Puissance apparente S (en VA) de la charge.....	28
II.5.6 Puissance active P (en watts) consommée par la charge	28
II.5.7 Puissance réactive Q (en vars) consommée par la charge.....	28
II.5.8 Facteur de puissance PF (Power Factor) de la charge	29
II.5.9 Facteur de déplacement DPF (Déplacement Power Factor).....	29

II.5.10 Puissance déformante.....	29
II.6. Effet des harmoniques	29
II.6.1 Les effets instantanés	29
II.6.2 Effets dans le long terme	30
II.7 Méthodes de filtrage des harmoniques	30
II.8 Conclusion	32
Conclusion générale	35
Bibliographie	

Introduction Générale

L'un des phénomènes les plus influents sur la qualité de l'énergie électrique distribuée au consommateur est le phénomène des harmoniques. Idéalement, l'électricité serait distribuée sous une forme de tension sinusoïdale parfaite d'amplitude et de fréquence constante. En pratique, l'opération du système électrique d'alimentation et l'utilisation de l'énergie électrique par les consommateurs provoquent différentes dérivations qui fait que le signal de courant obtenu est différent du signal sinusoïdal idéal que l'on appelle fondamental. Lorsque l'on connecte sur le réseau des convertisseurs tels que les redresseurs et les cyclone-convertisseurs qui sont considérés comme des charges non linéaires, ces dernières influent directement, sur le comportement du système, la grandeur physique sera déformer, donc il subit une perturbation qu'on appelle harmonique.

De plus ces harmoniques sont source de problèmes pour l'environnement du convertisseur : échauffement, perturbation des lignes téléphoniques etc.

Il apparaît donc nécessaire de s'intéresser à cette pollution harmonique afin de pouvoir utiliser les convertisseurs statiques dans les installations industrielles sans, pour autant, perturber les autres utilisateurs.

Les fournisseurs de l'énergie électrique ont pour but d'alimenter leurs consommateurs avec une tension sinusoïdale d'amplitude constante. En réalité, dans les réseaux électriques on trouve de plus en plus, des convertisseurs connectés aux réseaux (notamment des redresseurs). Ces convertisseurs constituent des charges non linéaires génératrices d'harmoniques. Les courants injectés par ces convertisseurs sont non sinusoïdaux et produisent sur les impédances du réseau des tensions harmoniques qui se superposent à la tension fondamentale (50 Hz).

Dans ce mémoire nous allons essayer d'étudier la pollution en harmoniques des réseaux électriques injectés dans le réseau par une charge donc polluante.

Dans le premier chapitre nous allons présenter des généralités sur les réseaux électriques et leurs structures.

Dans le deuxième chapitre nous étudierons une analyse sur le réseau électrique en présence des harmoniques et leurs influences sur la qualité de l'énergie électrique dans le réseau.

Chapitre I

Généralités sur le réseau électrique

I.1. Introduction :

L'énergie électrique est la forme d'énergie la plus largement répandue car elle est facilement transportable à un rendement élevé et un coût raisonnable. Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures dont le but est d'acheminer de l'énergie électrique à partir de centres de production vers les consommateurs d'électricité (charge).

Le premier réseau électrique a vu le jour aux Etats Unis en 1882 et a été conçu par Thomas Edison. C'était un réseau local à courant continu et servait à assurer l'éclairage de la région de Manhattan. La distribution de l'énergie était assurée par des câbles souterrains.

Avec l'invention du transformateur par **William Stanley** en 1885 et celle du moteur à courant alternatif par **Nikola Tesla** en 1888, les réseaux à courant alternatif commencèrent à prendre le pas sur les réseaux à courant continu du fait qu'il était devenu possible d'acheminer plus de puissance, sur de plus grandes distances, grâce à des niveaux de tension plus élevés.

Un autre avantage non négligeable du courant alternatif est la suppression du collecteur donc des problèmes de commutation dans les alternateurs ce qui a permis de construire des alternateurs de grande puissance à moyenne tension. Les réseaux étaient d'abord monophasés, puis triphasés (2.3 kV en 1893) et à différentes fréquences (28Hz à 133Hz).

Progressivement, la nécessité de mise en fonctionnement en parallèle et d'interconnexion des différents réseaux a conduit à la standardisation de la fréquence :

- 60 Hz aux Etats Unis et au Canada.
- 50 Hz pour la majorité des pays en Afrique, Asie et Europe.

Les niveaux de tensions ont eux aussi évolué graduellement jusqu'à atteindre aujourd'hui l'Ultra Haute tension 765 kV en service aux Etats Unis depuis 1969.

Des études ont montré qu'il était avantageux de recourir au courant continu lorsqu'il s'agissait de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures ou égales à 500 km. Les lignes à courant continu n'ayant pas de réactance, sont donc capables de faire transiter plus de puissance que des lignes à courant alternatif avec des conducteurs de même section. L'utilisation du courant continu est particulièrement avantageuse, lorsqu'il s'agit

d'interconnecter deux grands réseaux distants l'un des l'autre ou de traverser des cours d'eau ou mer (entre îles).

La liaison en courant alternatif, agit alors, comme un lien asynchrone entre deux systèmes rigides, ainsi, les problèmes d'instabilité inhérents aux interconnexions réalisées en alternatif. L'inconvénient majeur de la liaison en courant alternatif, est la production d'harmoniques qui nécessite un filtrage robuste et un système de compensation d'énergie réactive important, aux deux extrémités de la ligne.

I.2. Généralités sur les réseaux électriques :

Les réseaux électriques ont des caractéristiques, on peut les citer aux points suivants :

- 1- Actuellement, la très grande majorité de l'énergie électrique consommée dans le monde est acheminée par l'ensemble des réseaux électriques existants. En un peu plus d'un siècle, ce que représente le terme de « réseau électrique » est passé de la mutualisation de quelques unités de production à une interconnexion généralisée au niveau des continents tout entiers. Si les étendues et les ramifications qui caractérisent ces réseaux en multiplient les performances et les potentiels, il faut savoir qu'elles en font également des systèmes complexes, gérés par une multitude d'intervenants et tiraillés par des contraintes technico-économiques de plus en plus pesantes.
- 2- Sur le plan purement technologique, ces contraintes sont principalement liées au fait que l'électricité ne se stocke pratiquement pas, et que par conséquent, l'intégralité des transferts d'énergies est gérée en « temps réel » de telle manière à conserver à la fois les valeurs normalisées des tensions et de la fréquence, ainsi que des marges de puissance permettant d'assurer la sûreté du système. Parallèlement au cela, les particularités géographiques, la répartition des populations et des lieux de consommation, l'interconnexion internationale, l'aspect imprévisible des avaries, etc., sont autant de contraintes supplémentaires qui façonnent la réalité technique et stratégique des réseaux d'aujourd'hui.
- 3- Enfin, « le réseau » électrique est un acteur incontournable et extrêmement familier de notre vie quotidienne. Ses rares défaillances font réaliser à chacun à quel point nos sociétés en sont dépendantes. [1]

I.3. Structure générale des réseaux électriques :

De façon très générique, un réseau électrique est toujours dissocié en quatre grandes parties :

I.3.1. La production :

Elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produites sous la forme de systèmes triphasés par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires ».

I.3.2 Le transport :

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des lieux de consommation. Les grandes centrales étant en général groupées au tour des fleuves, des cours d'eau et des océans, le « grand transport » consiste à parcourir de longues distances en direction des extrémités des territoires nationaux. L'ordre de grandeur de ces distances impose, entre autre, le fait de véhiculer l'énergie électrique sous très haute tension .

I.3.3 La distribution :

Elle consiste en un maillage fin du territoire permettant à chaque utilisateur d'être à proximité d'une liaison au réseau.

C'est l'ultime ramification des lignes et des installations qui permet également un passage progressif des très hautes tensions du transport aux basses tensions de la consommation.

I.3.4 La consommation :

Chaque récepteur électrique connecté au réseau consomme une puissance active et une puissance réactive (on peut dire). La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est très ramifiée et se fait sous basse tension souvent monophasée (100 à 250 V).

Certains « clients » industriels (grosses usines, ferroviaire, etc.) sont directement reliés en moyenne, haute ou très haute tension.

I.4. Caractéristiques générales du transport :

Les réseaux, en très grande majorité, transportent l'énergie électrique sous la forme de systèmes triphasés. Les dispositions et grandeurs caractéristiques de ces systèmes sont :

- **Leur fréquence.**
- **Leurs niveaux de tension.**
- **Leurs différents types de couplage.**

I.5. Fréquence normalisée :

Les grands réseaux électriques sont des systèmes interconnectés qui présentent une fréquence uniforme afin de garantir le bon fonctionnement de leurs appareillages, ces derniers étant optimisés pour une valeur précise de la fréquence.

Dans le monde, on ne recense que deux valeurs distinctes de fréquence :

- « Le 50 Hz » caractérise les réseaux Européens, Asiatiques, Russes et Africains.
- « Le 60 Hz » caractérise les réseaux Américains, Canadiens et Japonais (en réalité, au Japon, les deux fréquences sont utilisées). [1]

I.6. Systèmes triphasés :

I.6.1 Définitions:

Un système triphasé est un ensemble de 3 grandeurs (tensions ou courants) sinusoïdales de même fréquence, déphasées les unes par rapport aux autres. Le système est symétrique si les valeurs efficaces des grandeurs sinusoïdales sont égales et si le déphasage entre deux grandeurs consécutives vaut : $\frac{2\pi}{3}$.

Par convention, on appelle système *direct* un système dans le diagramme des phaseurs est ordonné dans le sens trigonométrique négatif (sens horaire). Dans un système direct, les grandeurs passent par un maximum dans l'ordre de numérotation.

Dans le cas contraire, le système est dit *inverse*. On appelle *homopolaire* un système dans lequel toutes les grandeurs sont en phase.

Pour un système triphasé direct (de tension) d'ordre 1, on a :

$$\begin{aligned} V_1 &= V \\ V_2 &= V \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} \\ V_3 &= V \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}} \end{aligned} \quad (\text{I.1})$$

Le diagramme des phaseurs pour un système triphasé direct est le suivant :

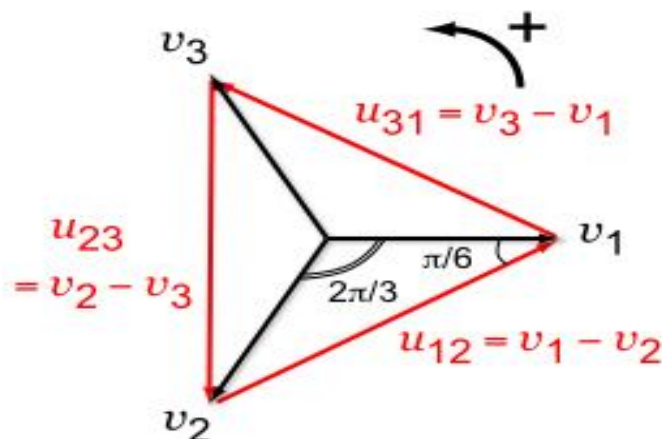


Fig I.1. Le diagramme des phaseurs.

Les formes d'ondes des tensions instantanées sont représentées ci-dessous :

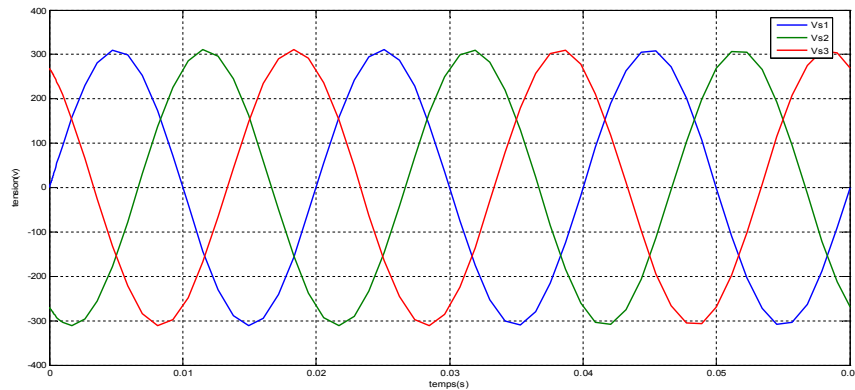
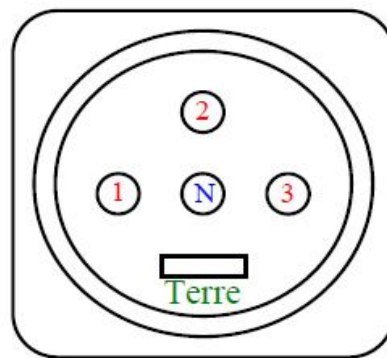


Fig I.2. Les formes d'ondes des tensions instantanées triphasées.

En tout instant, la somme des trois tensions est nulle pour un système équilibré:

$$V_1 + V_2 + V_3 = V \left(1 + e^{-\frac{j2\pi}{3}} + e^{-\frac{j4\pi}{3}} \right) = 0 \quad (I.2)$$

Un alternateur triphasé est formé de 3 générateurs délivrant trois *fem* sinusoïdales formant un système triphasé soit équilibré.



Prise 3 phases+Neutre+Terre

Fig I.3. Les bornes triphasées.

La ligne comporte 3 fils appelés *phases* (1,2 et 3, souvent notées R, S, T). Un quatrième fil est appelé *Neutre*.

I.6.2. Caractéristiques d'un système triphasé:

On peut constituer un système triphasé avec trois alternateurs monophasés qui seraient montés sur le même axe mais décalés de 120° l'un par rapport à l'autre. Ils fourniraient chacun une tension de fréquence identique mais déphasée entre elles d'un angle de 120° . Les tensions possèdent la même valeur de crête \hat{U} . Mais il est plus simple de disposer sur la même machine trois enroulements partiels, décalés géométriquement de 120° .

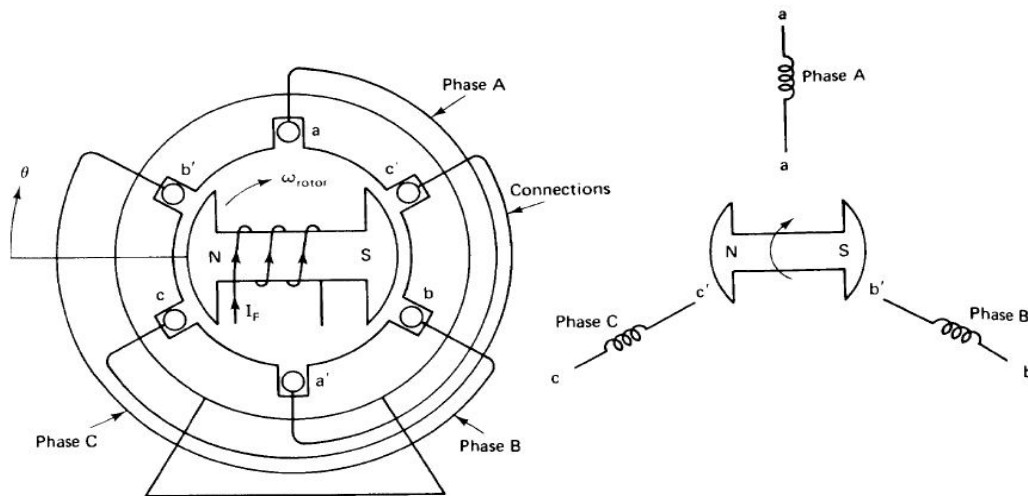


Fig I.4. Les enroulements en triphasés.

I.7. Les avantages d'un système triphasé:

Le système triphasé offre plusieurs avantages :

C'est le système triphasé qui permet le transport du maximum d'énergie électrique avec le minimum de section des conducteurs de ligne. Pour une puissance transmise, la masse du cuivre des lignes pour le triphasé (3 conducteurs) est de : **50% plus économique comparé au monophasé.**

Le système triphasé permet d'établir dans les moteurs un **champ magnétique tournant.**

Un système monophasé permet d'obtenir qu'un **champ magnétique alternatif sinusoïdal**. Dans les montages à redresseurs, le système triphasé a un taux d'ondulation nettement inférieur à celui du monophasé.

Ce système permet de coupler les 3 phases (L1, L2, L3) d'un alternateur ou d'une association de 3 récepteurs de deux façons.

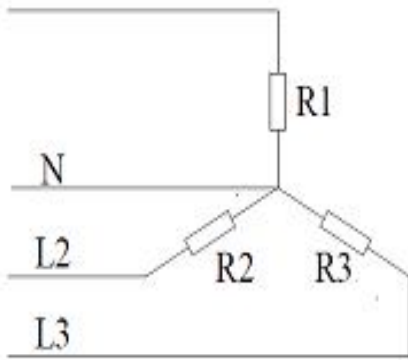


Fig I.5. Couplage étoile.

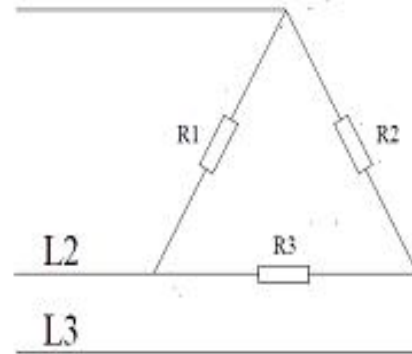


Fig I.6. Couplage triangle.

I.8. Tensions simples et tensions composées:

I.8.1 Tensions simples

I.8.1.1. Etude des tensions simples:

- Les tensions sont déphasées de $2\pi/3$ l'une par rapport à l'autre ;

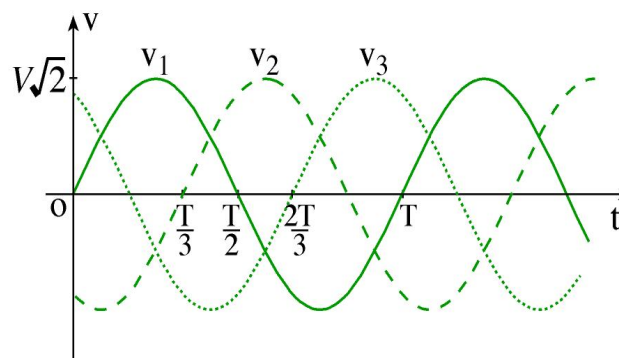


Fig.I.7. Les tensions triphasée en fonction du temps.

I.8.1.2. Définition :

Un système triphasé est équilibrée lorsque les trois tensions possèdent la même valeur efficace et qu'elles sont déphasées de $2\pi/3$ l'une par rapport à l'autre et ont la même pulsation.

$$\begin{aligned} v_1(t) &= V_1 \sin(\omega t) \\ v_2(t) &= V_2 \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ v_3(t) &= V_3 \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (\text{I.3})$$

I.8.2. Etude des tensions composées:**I.8.2.1. Définition:**

Les tensions composées ont même fréquence que les tensions simples

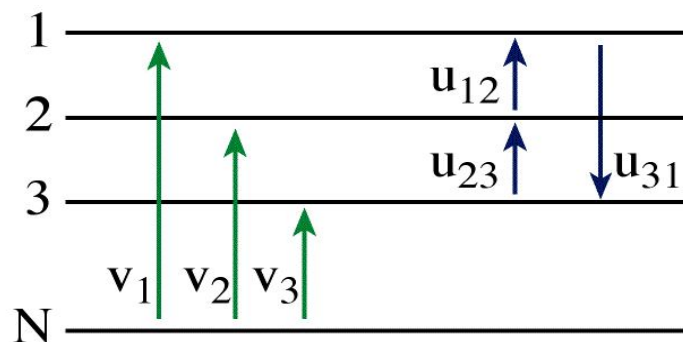


Fig I.8. Tensions composées et tensions simples.

$$\begin{aligned} u_{12} &= v_1 - v_2 \Rightarrow U_{12} = V_1 - V_2 \\ u_{23} &= v_2 - v_3 \Rightarrow U_{23} = V_2 - V_3 \\ u_{31} &= v_3 - v_1 \Rightarrow U_{31} = V_3 - V_1 \end{aligned} \quad (\text{I.4})$$

I.8.2.2. Equations horaires et oscillogrammes:

Les équations sont écrits comme suit:

$$\begin{aligned} u_{12}(t) &= U_2 \sin(\omega t + \pi/6) \\ u_{23}(t) &= U_2 \sin(\omega t - \pi/2) \\ u_{31}(t) &= U_2 \sin(\omega t - 7\pi/6) \end{aligned} \quad (\text{I.5})$$

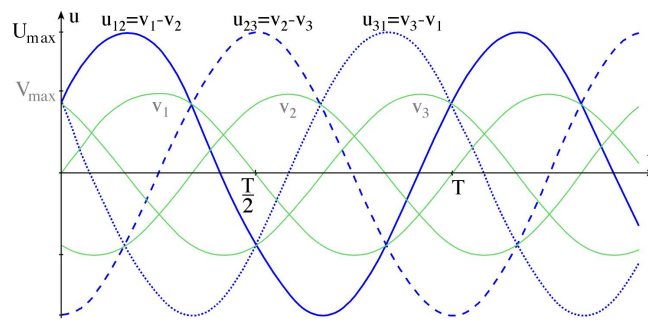


Fig I.9. Tensions composées en fonction du temps.

I.9. Relation entre U et V:

$$U = 2V \cos 30 \text{ soit } U = 2V \sqrt{3} / 2$$

$$\text{Finalement : } U = \sqrt{3} \cdot V$$

Cette relation est toujours vraie quelque soit la charge.

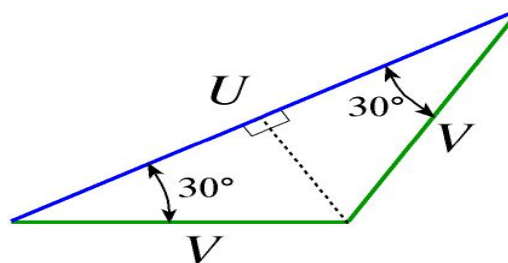


Fig I.10. Représentation vectorielle de la tension composée.

I.10. la symétrie au système triphasé:

I.10.1. système triphasé équilibré et déséquilibré :

I.10.1.1. Définition :

Un système triphasé est dit équilibré ou symétrique si les tensions et les courants triphasés ont la même amplitude et présentent un déphasage de 120 les uns par rapport aux autres et ont une même fréquence, si l'un au moins de ces conditions n'est pas remplie, le système est dit déséquilibré ou asymétrique. Dans ce paragraphe, il est admis implicitement que les ondes sont sinusoïdales et ne contiennent aucune harmonique.

L'exploitant du système s'efforce d'exploiter des tensions de système équilibré d'après le réseau de distribution et le réseau interne du client.

I.11. Les couplages du système triphasé:

I.11.1. Couplage étoile:

Même branchement représenté de deux façons différentes.

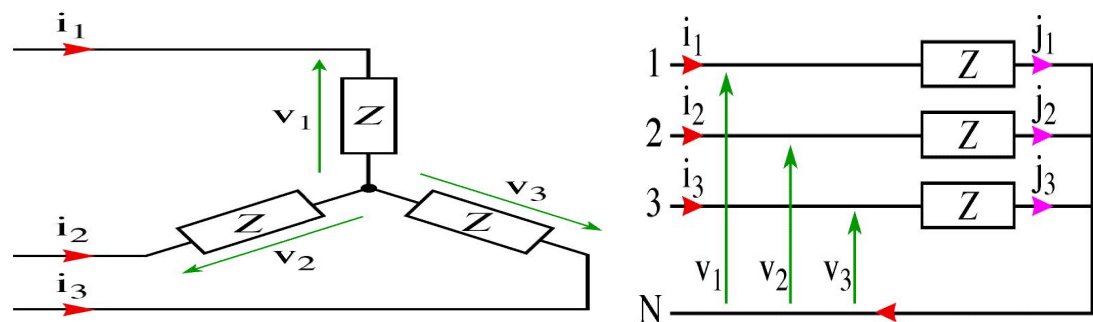


Fig I.11. Branchement du couplage étoile.

Le premier schéma explique le terme « étoile ».

Symbole :

Comme il s'agit des mêmes impédances, de ce fait $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, donc $i_n = 0$. Le courant dans le fil neutre est nul. Le fil neutre n'est donc pas nécessaire.

Pour un système triphasé équilibré, le fil neutre ne sert à rien.

I.11.1.1. Relations entre les courants:

On constate sur les schémas du paragraphe 6.1 que les courants en ligne sont égaux aux courants par phase.

$$i_1 = j_1 ; i_2 = j_2 ; i_3 = j_3$$

De plus la charge et le réseau sont équilibrés, donc : $I_1 = I_2 = I_3 = I = J$

On retiendra pour le couplage étoile : $I = J$

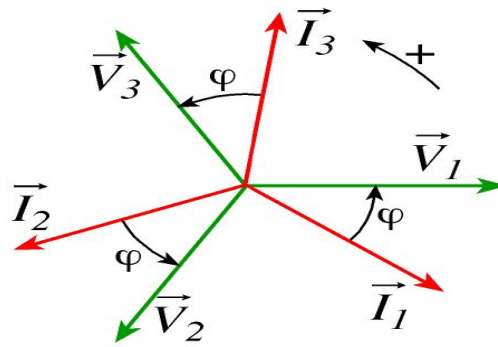


Fig. I.12. Représentation vectorielle

I.11.1.2. Puissances:

Pour une phase du récepteur : $P_1 = VI \cos\varphi$ avec $\varphi (I, V)$

Pour le récepteur complet : $P = 3.P_1 = 3VI \cos\varphi$ de plus $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$

Finalement pour le couplage étoile : $P = \sqrt{3} UI \cos\varphi$

de la même façon : $Q = \sqrt{3} UI \sin\varphi$

et : $S = \sqrt{3} UI$

Facteur de puissance : $FP = k = \cos\varphi$

I.11.2. Couplage triangle:

Même branchement représenté de trois façons différentes.

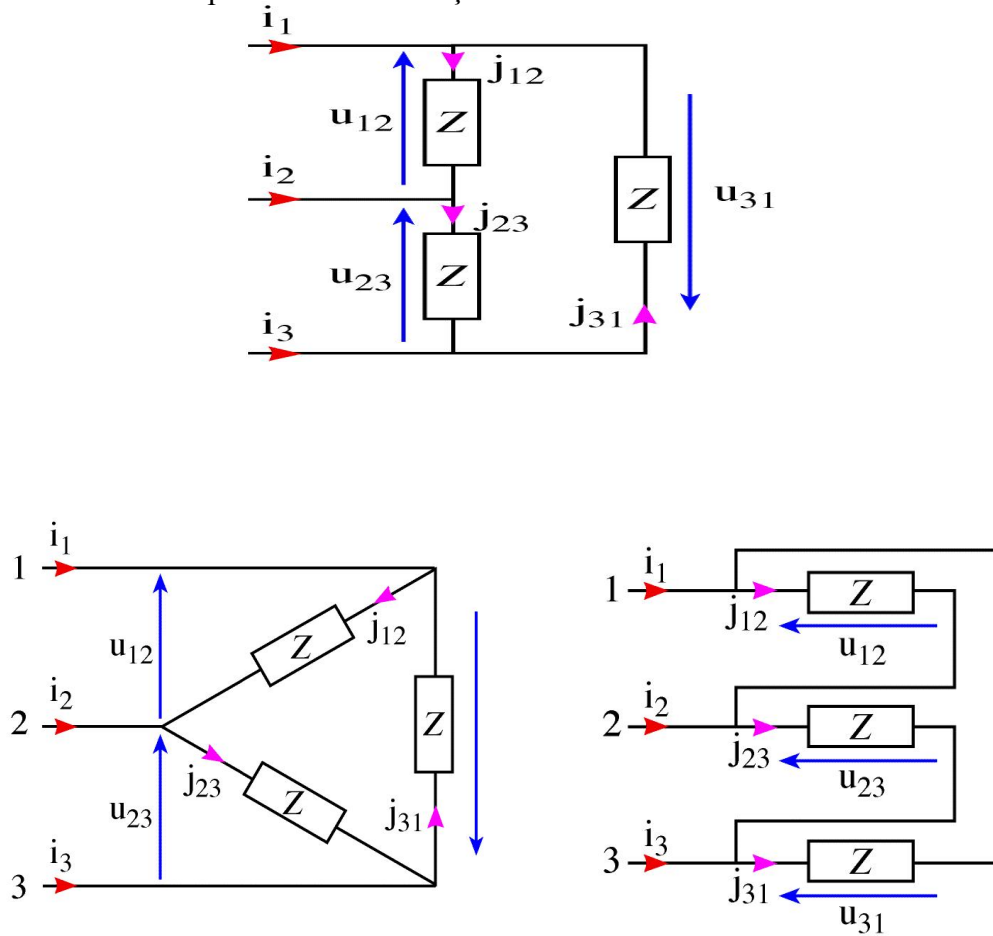


Fig I.13. Différents branchement d'un couplage triangle.

Le premier schéma explique le terme « triangle ».

Symbole : \triangle

Comme il s'agit des mêmes impédances, $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ et $j_{12} + j_{23} + j_{31} = 0$

Ici le fil de neutre n'existe pas.

I.11.2.1. Relations entre les courants:

D'après les schémas ci-dessus, on écrit:

$$i_1 = j_{12} - j_{31} \Rightarrow I_1 = J_{12} - J_{31}$$

$$i_2 = j_{23} - j_{12} \Rightarrow I_2 = J_{23} - J_{12}$$

$$i_3 = j_{31} - j_{23} \Rightarrow I_3 = J_{31} - J_{23}$$

(I.6)

Le système triphasé est équilibré : $I_1 = I_2 = I_3 = I$ et $J_{12} = J_{23} = J_{31} = J$.

Pour le couplage triangle, la relation entre I et J est la même que la relation entre V et U.

Pour le couplage triangle : $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$

Remarque :

Les déphasages pour les deux montages étoile et triangle sont les mêmes. Il s'agit du déphasage provoqué par le dipôle Z du montage

$$\varphi_{\Delta}(\vec{J}, \vec{U}) = \varphi_{\lambda}(\vec{I}, \vec{V})$$

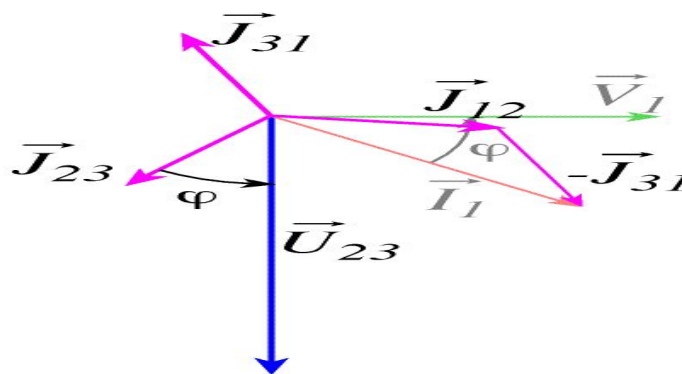


Fig I.14. Illustration des courants et tensions.

I.11.2.2. Puissances:

Pour une phase du récepteur : $P_1 = UJ \cos\varphi$; avec $\varphi (J, U)$

Pour le récepteur complet : $P = 3.P_1 = 3UJ \cos\varphi$; de plus $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$

Finalement pour le couplage étoile : $P = \sqrt{3} UI \cos\varphi$

de la même façon : $Q = \sqrt{3} UI \sin\varphi$

et : $S = \sqrt{3} UI$

Facteur de puissance : $FP = k = \cos\varphi$.

Chapitre II

les harmoniques dans le

réseau électrique

II.1. Introduction :

La modernisation des processus industriels, la sophistication des machines et appareillages électriques a entraîné, ces dernières années, un développement important de l'électronique de puissance a été mise en jeu.

Ces systèmes à base de semi-conducteurs (diodes, transistors, thyristors) destinés à réaliser : Des convertisseurs de puissance (alternatif/continu), des redresseurs et des onduleurs.

Et bien d'autres dispositifs de commande par train d'ondes ou réglage de phase, ces systèmes représentent, pour les réseaux électriques des charges « non linéaire ».

Les charges non linéaires ont un très vaste domaine d'application mais malheureusement leur inconvénient major, c'est qu'ils envois au réseau des courants non sinusoïdaux riche en "harmoniques".

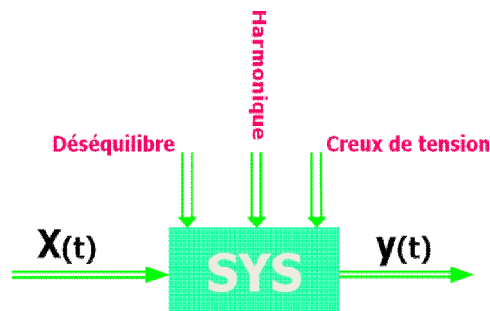


Fig.II.1. Schéma de principe de déséquilibre.

II.2. Caractéristique de grandeurs électriques :

Les grandeurs physiques qui constituent un système triphasé caractérisé par :

- La fréquence.
- L'amplitude.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïdale.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par trois conditions doit être vérifier.

II.3. Perturbations harmoniques en tension et en courant

II.3.1. Généralités sur les harmoniques :

Définitions :

Une harmonique est définie comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000Hz (entre les harmoniques de rangs $h=2$ et $h=40$). Il peut exister dans la tension des réseaux des sous harmoniques [2].

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique; dans notre cas c'est la (50 Hz ou 60 Hz). L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre.

Les premiers rangs harmoniques ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, la raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes. L'amplitude de l'harmonique de rang (h) du côté de la source est donnée par :

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (\text{II.1})$$

h : harmonique d'ordre h.

I_1 : amplitude du courant fondamentale.

I_h : amplitude de l'harmonique de rang (h).

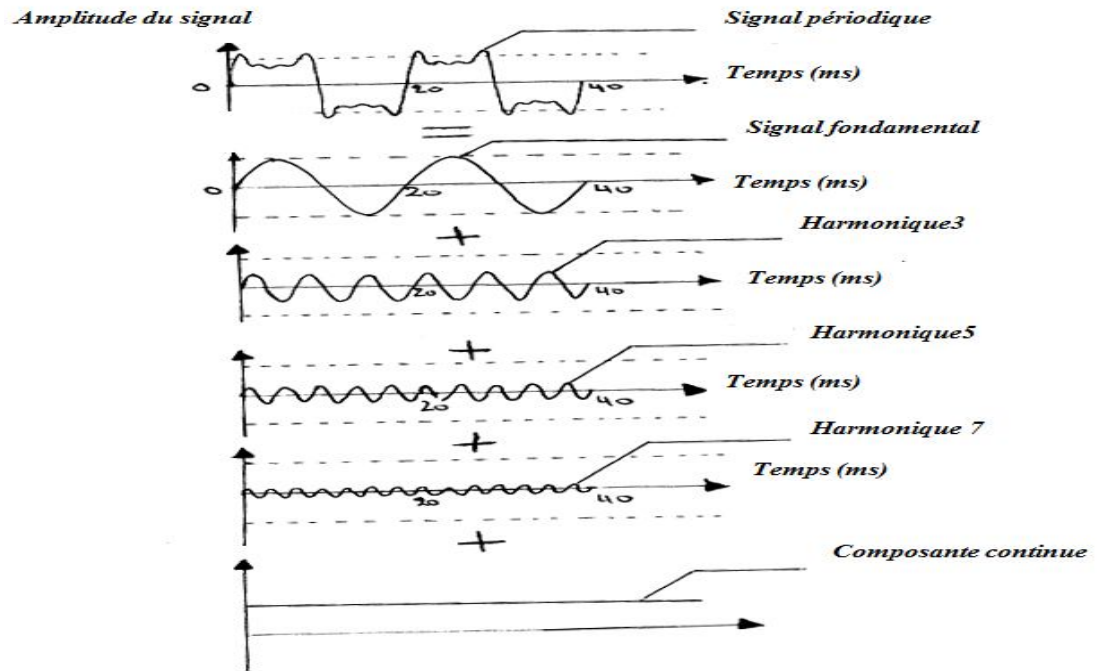


Fig.II.2. Décomposition en série de Fourier d'un périodique a 50 Hz.

Toute fonction périodique peut être représentée par une série de Fourier de la forme :

$$f(t) = + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \tag{II.2}$$

a_0 =amplitude de la composante continue, généralement nulle en régime permanent.

a_n et b_n sont les coefficients de Fourier de la fonction f .

Soit par exemple la série de Fourier suivante :

$$i(t) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) + \frac{I_1}{5} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(5 \cdot \omega t) + \frac{I_1}{7} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(7 \cdot \omega t) + \frac{I_1}{11} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(11 \cdot \omega t) + \dots \tag{II.3}$$

$$I_1 = 10A$$

$$\text{Et } I_h = \frac{I_1}{h}$$

Avec :

Cette série ne contient que des rang h impairs et non multiples de 3.

C'est très souvent le cas. La section relative aux ponts hexaphasés montre que les rangs générés par ce convertisseur sont les rangs 5, 7, 11, 13 ...

On trouve des rangs pairs, uniquement lorsque la forme de l'onde n'a pas de symétrie impaire, c'est le cas pour le gradateur. Si l'on trace cette série, on obtient :

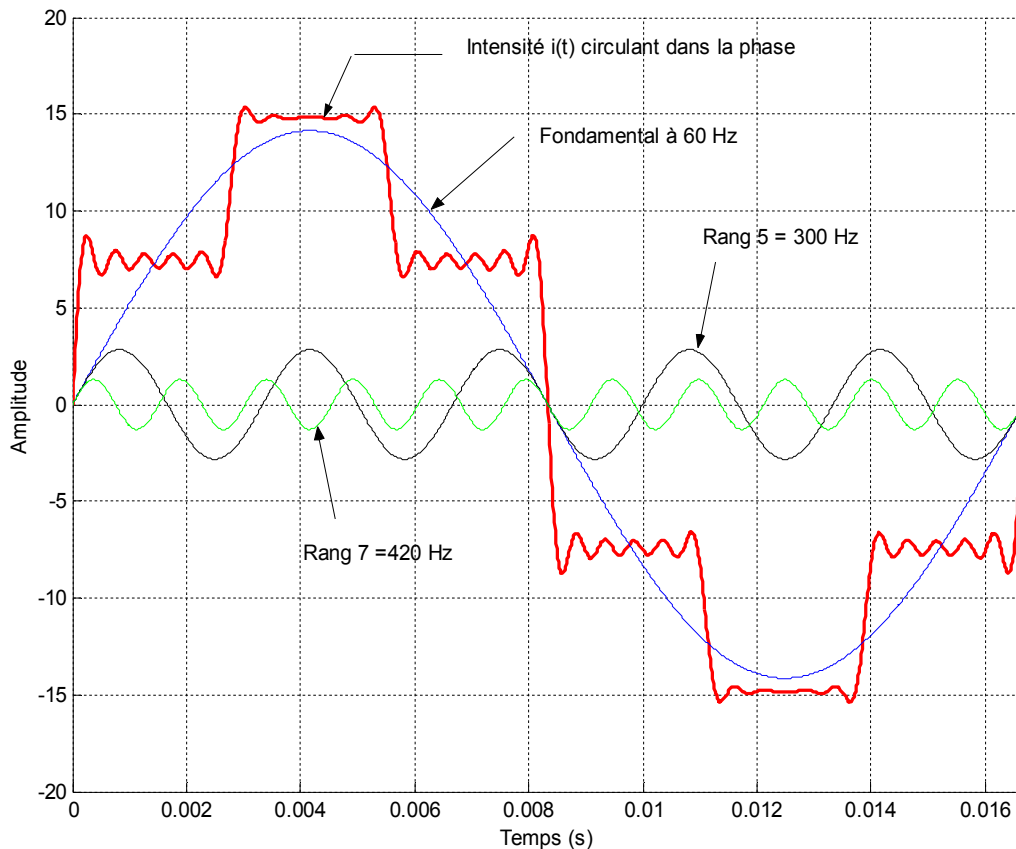


Fig.II.3 Représentation d'une décomposition d'un signal.

Le signal $i(t)$ de forme carré que l'on mesure sur la phase est la somme de plusieurs courants sinusoïdaux de fréquence croissante et d'amplitude décroissante.

Partant du signal $i(t)$, on peut effectuer une décomposition en série de Fourier qui donne, rang par rang, l'amplitude et la phase des harmoniques 'cachées' derrière le signal carré.

Une autre façon de représenter le signal $i(t)$ est d'indiquer l'importance relative de chaque rang :

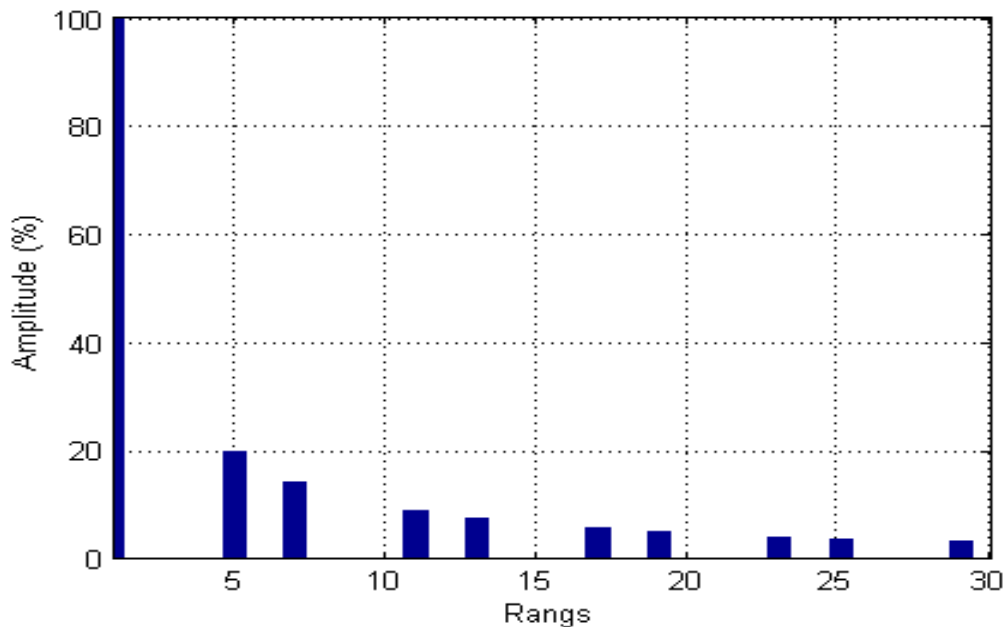


Fig.II.4 représentation spectrale.

On définit ainsi :

-Le taux Individuel de distorsion :

C'est taux est écrit comme :

$$D (\%) = \frac{Y_h}{Y_1} . 100 \dots \dots \dots (II.4)$$

L'importance de chaque rang par rapport au fondamental.

Qui est la véritable valeur efficace du courant $i(t)$ ($t_{\text{rms}} = \text{true root mean square}$).

En présence de courants distordus, les pertes Joules augmentent dans les conducteurs.

De plus, si l'on mesurait avec un ampèremètre classique le courant $i(t)$, tel qu'un indicateur de tableau électrique, il y a de forte chance (suivant la qualité de l'appareil) pour qu'il indique $I = x \text{ A}$. En effet, il est conçu pour mesurer des fréquences proches de 50-60 Hz et non au delà. Un appareil qui couvre une large bande doit porter le label 'rms'.

$$V_{trms} = \sqrt{\sum_1^{\infty} V_h^2} \dots\dots\dots (II.9)$$

On définit aussi :

Si l'on effectue alors un bilan de puissance, on a :

Pour le fondamental :

$$\begin{aligned} S &= U_1 I_1 \text{ (VA)} \\ P &= U_1 I_1 \cos \varphi_1 \text{ (W)} \dots\dots\dots (II.10) \\ Q &= U_1 I_1 \sin \varphi_1 \text{ (VAR)} \end{aligned}$$

Pour les harmoniques :

Le déphasage n'a plus de raison d'être. Afin de quantifier leur part dans le bilan de puissance, on définit la Puissance de Distorsion : dP en dVA (sans dimension physique).

$$S_{trms} = U_{trms} \cdot I_{trms} = \sqrt{(S^2 + dP^2)} = \sqrt{(P^2 + Q^2 + dP^2)} \dots (II.11)$$

Pour l'ensemble, on a alors, ce que l'on peut représenter par :

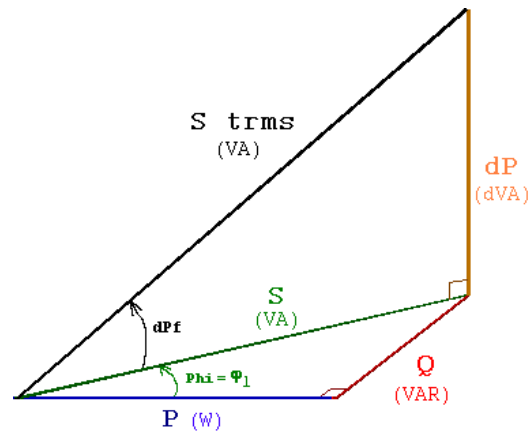


Fig.II.5.diagramme des puissances.

Dans la plupart des cas, les harmoniques de tensions ou de courants présentes sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation des charges non linéaires, tels que les convertisseurs statiques.

II.4. Origines et sources des harmoniques :

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

Certains récepteurs sur le réseau électrique absorbent des courants non sinusoïdaux, donc riches en harmoniques. On appelle ces récepteurs charges non linéaires dont on peut citer quelques types :

- ❖ Variateurs de vitesse pour les moteurs asynchrone et moteurs à courant continu.
- ❖ Redresseurs.
- ❖ Four à arc, four à induction.

- ❖ Appareils domestiques : téléviseurs, magnétoscopes, lampes à décharge.
- ❖ Gradateurs de lumière, de chauffage.
- ❖ Micro-informatique : alimentation à découpage (PC, modems, imprimantes,...)
- ❖ Inductances saturables.

En plus de ces charges non linéaires, certains composants du réseau eux-mêmes génèrent pas mal d'harmoniques tel que les alternateurs et les transformateurs qui fonctionnent naturellement dans la zone de saturation de leurs circuits magnétiques. [5][1].

II.5. Influence d'harmoniques sur la qualité de l'énergie :

II.5.1 Décomposition en série de Fourier :

Au début du 19^{ème} siècle, Joseph Fourier a montré qu'un signal périodique de fréquence f peut être décomposé avec des signaux sinusoïdaux de fréquence multiple entier de f .

Un signal périodique de fréquence f peut donc 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)
- un terme sinusoïdal de fréquence $3f$ (harmonique de rang 4) etc ...

Dans le cas d'un courant électrique de fréquence f :

$$\begin{aligned}
 i(t) = & \langle i \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(n \omega t + \Phi_n) = \langle i \rangle \text{ (valeur moyenne).} \\
 & + \sqrt{2} I_1 \cdot \sin(\omega t + \Phi_1) \text{ (fondamental ou harmonique de rang 1)} \\
 & + \sqrt{2} I_2 \cdot \sin(2 \omega t + \Phi_2) \text{ (harmonique de rang 2)} \\
 & + \sqrt{2} I_3 \cdot \sin(3 \omega t + \Phi_3) \text{ (harmonique de rang 3)} \\
 & \dots
 \end{aligned}$$

avec:

_ $\omega = 2 \pi f = 2 \pi / T$: pulsation du fondamental (en radians par seconde)

_ I_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n (en ampères)

_ Φ_n : phase à l'origine de l'harmonique de rang n (en radians)

Pour la tension électrique v de fréquence f :

$$v(t) = \langle v \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n \omega t + \Phi_{n+\varphi_n}) = \langle v \rangle \text{ (valeur moyenne).}$$

$$+ \sqrt{2} \cdot V_1 \cdot \sin(\omega t + \Phi_{1+\varphi_1}) \text{ (fondamental).}$$

$$+ \sqrt{2} \cdot V_2 \cdot \sin(2 \omega t + \Phi_{2+\varphi_2}) \text{ (harmonique de rang 2).}$$

$$+ \sqrt{2} \cdot V_3 \cdot \sin(3 \omega t + \Phi_{3+\varphi_3}) \text{ (harmonique de rang 3).}$$

+.....

avec :

_ V_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n (en volts)

_ Φ_n : phase à l'origine de l'harmonique de rang n (en radians)

_ Φ_n : déphasage entre l'harmonique de rang n de la tension et l'harmonique de rang n du courant (en radians).

II.5.2. Valeur efficace (True RMS) :

Par définition, la valeur efficace d'un courant périodique i(t) est :

$$I = \sqrt{\langle i^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T i(t)^2 dt} \quad (\text{II.12})$$

On montre que :

$$I = \sqrt{\langle i \rangle^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\langle i \rangle^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (\text{II.13})$$

avec : I_n la valeur efficace de l'harmonique de rang n (en ampères)

Par définition, la valeur efficace d'une tension périodique v(t) est :

$$V = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T v(t)^2 dt} \quad (\text{II.14})$$

On montre que :

$$V = \sqrt{\langle v \rangle^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{\langle v \rangle^2 + v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots} \quad (\text{II.15})$$

avec : V_n la valeur efficace de l'harmonique de rang n (en volts)

II.5.3. Valeur efficace des harmoniques :

Il s'agit de la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques (à partir du rang 2).

Valeur efficace des courants harmoniques :

$$I_{HM} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (\text{II.16})$$

On a :

$$I^2 = \langle i \rangle^2 + I_1^2 + I_{HM}^2 \quad (\text{II.17})$$

Valeur efficace des tensions harmoniques :

$$V_{HM} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{v_2^2 + v_3^2 + \dots} \quad (\text{II.18})$$

On a :

$$V^2 = \langle v \rangle^2 + V_1^2 + V_{HM}^2 \quad (\text{II.19})$$

II.5.4. Taux de distorsion harmonique THD (en %)

On le définit comme :

THD = valeur efficace des harmoniques / valeur efficace du fondamental.

Pour le courant :

$$\text{THD}_i = 100 \cdot \frac{I_{HM}}{I_1} \quad (\text{en } \%) \quad (\text{II.20})$$

Pour la tension :

$$\text{THD}_v = 100 \cdot \frac{V_{HM}}{V_1} \quad (\text{en } \%) \quad (\text{II.21})$$

II.5.5 Puissance apparente S (en VA) de la charge

La puissance apparente de la charge est par définition :

$$S = V \cdot I \quad (\text{II.22})$$

II.5.6 Puissance active P (en watts) consommée par la charge

Par définition, c'est la moyenne dans le temps de la puissance instantanée consommée par la charge.

C'est aussi la moyenne sur une période ($T = 1/f$) de la puissance instantanée :

$$P = \langle p \rangle = \langle v \cdot i \rangle = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T v(t) i(t) dt \quad (\text{II.23})$$

On montre que :

$$P = \langle v \rangle \langle i \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n \quad (\text{II.24})$$

$= \langle v \rangle \langle i \rangle$ (contribution des composantes continues)

$+ V_1 I_1 \cos \varphi_1$ (contribution des fondamentaux)

$+ V_2 I_2 \cos \varphi_2$ (contribution des harmoniques de rang 2)

$+ V_3 I_3 \cos \varphi_3$ (contribution des harmoniques de rang 3)

$+ \dots$

II.5.7 Puissance réactive Q (en vars) consommée par la charge

Par définition :

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \varphi_n \quad (\text{II.25})$$

Et d'une façon détaillée, s'écrit :

$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1$ (contribution des fondamentaux)

$+ V_2 I_2 \sin \varphi_2$ (contribution des harmoniques de rang 2)

$+ V_3 I_3 \sin \varphi_3$ (contribution des harmoniques de rang 3)

$+ \dots$

II.5.8 Facteur de puissance PF (Power Factor) de la charge :

Par définition :

$$PF=P/S \quad (II.26)$$

II.5.9 Facteur de déplacement DPF (Displacement Power Factor)

Par définition :

$$DPF=\cos \Phi_1 \quad (II.27)$$

Φ_1 désigne le déphasage entre le fondamental de la tension et le fondamental du courant.

II.5.10 Puissance déformante

Par définition :

$$D=\sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (II.28)$$

Ou :

$$S^2=P^2 +Q^2+D^2 \quad (II.29)$$

L'unité de la puissance déformante D est le VAD.

II.6. Effet des harmoniques :

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction de condensateurs ou de disjoncteurs sous l'effet de forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Ce phénomène est généralement observable sur des réseaux internes d'usines alimentant des convertisseurs statiques et en présence de condensateurs installés sans précautions.

Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3.

Les installations industrielles, soumises à des tensions harmoniques inférieures à 5% de la tension fondamentale ne produisent pas d'effets notables. Entre 5% et 7%, on commence à observer des effets, de 7% à 10%, ces effets sont fréquents, et pour plus de 10%. Les effets sont quasi certains. Différents types d'effets On distingue deux grands types d'effets.

II.6.1 Les effets instantanés :

Les effets instantanés concernent les appareils produisant une image électronique (écrans d'ordinateurs, télévisions), les appareils produisant un son censé être de bonne

qualité (chaîne HI-FI, téléphonique) ou la précision des appareils de mesure. En présence d'harmoniques, on peut observer une altération des caractéristiques du signal de sortie de l'appareil exposé. Il faut noter que ce phénomène apparaît essentiellement pour des forts niveaux de tension harmonique ou pour des rangs élevés.

- Perturbation de la commutation des thyristors car le passage par zéro de la tension peut être légèrement décalée dans le temps.
- Perturbation de l'éclairage : les tensions fortement distordues peuvent induire un éclairage légèrement oscillant et particulièrement pénible : c'est le 'flicker'.
- Erreur de mesure : valeur rms au lieu de trms.
- Déclenchement intempestif de disjoncteur ou de relais thermique.

II.6.2 Effets dans le long terme :

- Diminution sensible de la durée de vie des appareils : augmentation de la chaleur dissipée (La présence de hautes fréquences augmente 'l'effet de peau' en diminuant la section utile des conducteurs).
- Vibrations : le couple des machines tournantes devient oscillant ce qui augmente les vibrations et accélère la fatigue mécanique.
- Interférences : les courants forts, de fréquence élevée, perturbent d'autant plus facilement les courants faibles.

II.7 Méthodes de filtrage des harmoniques :

Les harmoniques peuvent être réduits soit par modification de la structure du système d'entraînement, soit par filtrage, et le filtrage est une méthode de réduction des missions harmoniques au sein d'un site industriel, où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site, donc Le filtre est un absorbeur de courants harmoniques. [10]

On distingue les techniques suivantes:

- a) les filtres passifs.
- b) les filtres actifs.
- c) les filtres hybrides.

a) Les filtres passifs :

Ce sont les plus connus et les plus anciens, leur principe consiste à mettre, en parallèle sur le réseau, des circuits résonants composés de condensateur et d'inductances de façon à obtenir l'accord sur un harmonique de fréquence donnée.

b) les filtres actifs :

Les systèmes précédents (filtres passifs) ne font que modifier des impédances ou font s'opposer certains courants harmoniques. Aujourd'hui la dépollution harmonique peut être traitée par l'utilisation de convertisseurs statiques.

Un filtre actif est un convertisseur statique qui permet d'injecter dans le réseau des harmoniques en opposition de phase et d'amplitude, telle que l'onde résultante soit sinusoïdale, pour cela, il génère un courant qui est composé des seuls harmoniques (même amplitude et en opposition de phase) du courant dans la charge. [10]

c) les Filtres hybrides :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, Le filtrage mixte ou hybride qui résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif peut être une solution. Dans ce cas, 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. [2], [4].

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les harmoniques et l'influence de la pollution en harmonique sur la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique qui se manifeste sous forme de pertes supplémentaire d'échauffement des câbles ou carrément la destruction des appareils de protection et de commande du réseau électrique. De plus, les harmoniques ont aussi des effets nocifs sur les consommateurs tels que les machines électriques et les appareils électroniques qui se manifestent sous forme d'échauffement et des bruits dans les machines tournantes.

Conclusion Générale

Notre travail sur la pollution en harmonique des réseaux électriques nous a permis d'acquérir une connaissance importante sur les réseaux électriques, la définition des harmoniques, les sources et les moyens d'atténuation du taux de distorsion harmonique THD pour l'amélioration de la qualité de l'énergie et de minimiser les pertes et les dégâts que peut causer sur le réseau ou sur les équipements reliés au réseau.

En effet, dans le premier chapitre nous avons présenté les notions fondamentales sur les réseaux électriques, les couplages du système triphasé.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les principales sources d'harmonique et leurs effets sur le réseau, et sur les clients en indiquant des grandeurs théoriques approximatives des harmoniques émis par chacune des sources. Ces grandeurs théoriques nous ont permis d'identifier les charges les plus gênantes pour le réseau à savoir les convertisseurs d'électronique de puissance ou plus précisément les redresseurs.

Bibliographie

- [1] Luc Lasne «Électrotechnique » DUNOD 2008 .
- [2] M.A.E. Allali,S.Saadate, M. Machmoum, N. Bruyant, « Stratégies de dépollution active des réseaux électriques, partie II: Compensateur actif série d'harmoniques, de déséquilibre et creux de tension des réseaux électriques », revue internationale de génie électrique, vol :4, N 3-4, PP : 317-332,2001.
- [3] zebiri Malek et rahali Antar, «Compensation des harmoniques par filtre hybride» mémoire ingénieur université de Mohamed Boudiaf de m'sila (2006).
- [4] benkechida noureddine, « Identification d'un courant harmonique généré par une charge non linéaire » mémoire ingénieur université de Mohamed Boudiaf de m'sila (2005).
- [5] Fabrice Sincère <http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/>
- [6] Thomas renaut , « Etude Harmonique du Queen Mary2» Mémoire d'ingénieur ,Ecole supérieur de l'électricité .
- [07] <http://www.abb.com/cmotors&drives>
- [08] Institut Schneider formation / MDG9A152I/05-99 Lycée edouard Belin 70000 BTS Electrotechnique .
- [09] M.A.E. Allali «Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension» Thèse de docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg Génie électrique 2002.
- [10] A.berthon, s.saadate «Contribution a l'étude du filtrage d'harmoniques des réseaux de distribution a l'aide de l'association de filtre actif et passif parallèle» Mémoire d'ingénieur,encadré par M.J.Bonal, l'Institut national polytechnique de lorraine 1995.