République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Université de Batna

MÉMOIRE Préparé au

Département d'Electrotechnique

Présenté par

MIMOUNI Kamel

Pour obtenir le titre de

MAGISTER

Option : Réseaux Electriques

Caractéristiques de la Qualité d'Energie Électrique dans un Nœud à Tension non Sinusoïdale Contenant un Compensateur Statique.

Soutenu le 09/11/2010

Devant le Jury composé de :

Khaled CHIKHI	**Maître de Conférences A**	**Univ. Batna**
Malek BOUHARKAT	**Maître de Conférences A**	**Univ. Batna**
Cherif FETHA	**Maître de Conférences A**	**Univ. Batna**
Tahar BAHI	**Maître de Conférences A**	**Univ. Annaba**

SOMMAIRE

Introduction Générale

L’énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme de courant alternatif par des réseaux en haute –moyenne et basse tension .l’énergie consommée est composée d’une partie active transformée en chaleur au mouvement ,et d’une partie réactive transformée par les actionneurs électrique pour créer leurs propres champs électromagnétique .l’utilisateur ne bénéficie que de l’apport énergétique de partie active ;la partie réactive ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés.

L’énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite les économies d’énergie réalisées se chiffrent par dizaines de pour cent de la consommation globale, situant les procédés de compensation d’énergie réactive.

Les industries des temps modernes se caractérisent par une consommation de l’énergie électrique souvent croissante ; ceci impose la nécessité d’un développement des systèmes électro-énergétiques [1-8].

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits de puissance soient inférieurs aux capacités de transport du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont le niveau de tension et qu’il doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée et le système électroénergitique s’accompagne inévitablement par des pertes des puissances actives et réactives dans les lignes et les transformateurs. Les pertes réactives peuvent être considérables et leur compensation exige l’augmentation de la puissance des installations.

En conséquence les indices techniques et économiques de fonctionnement des réseaux et des récepteurs d’énergie électrique, changent d’une manière négative. Ces conséquences peuvent être réduites par le moyen de la compensation de l’énergie réactive en agissant sur les paramètres du compensateur dans le nœud du réseau électrique.

Bien que le domaine de la compensation de l’énergie réactive soit connu d’une manière générale, mais, il reste que les industries sont investies de charges puissantes à caractères non linéaires tel que les fours électriques ; ce qui nous permet d'apprécier l'importance du problème et ses imbrications multiples dans le domaine de l'économie. Pour ce genre de charge, la compensation de l'énergie électrique rencontre des difficultés lors de l'élaboration des réseaux électriques et des moyens de compensation quoi sont souvent liées à des questions principales. Parmi ces questions ; l'équilibre et l'évaluation de la balance de la puissance réactive dans les nœuds à tension non sinusoïdale et le choix des installations de compensation dans les nœuds du réseau à caractère non sinusoïdal [7-15].

De cette problématique nous avons jugé qu'il est important de connaitre le comportement des grandeurs du réseau électrique dans un nœud de charge non linéaire, en faisant miroiter les indices qui évaluent les caractéristiques énergétiques d'un réseau électrique et d'établir sa relation avec les autres caractéristiques du processus énergétique et d'évaluer quantitativement et qualitativement le .processus lui-même.

CHAPITRE I

Définitions Physiques Et Interprétation

Des Différentes Puissances du Réseau Electrique

Introduction

Pour décrire les processus énergétiques des systèmes électriques et estimer quantitativement leurs caractéristiques, on introduit la notion définition de la puissance réactive pour différents régimes de puissance électrique.

I.1 Définition la puissance en régime sinusoïdale

Cette dernière est déterminée par des valeurs instantanées de la tension et du courant considérés, selon le caractère de ces deux paramètres et leur déphasage relatif, la puissance instantanée égale au produit de leurs valeurs instantanées.

$$\mathrm{s} = \mathrm{u.\,i} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad \text{(I.1)}$$

La quelle par définition, mesure la vitesse de transformation de l'énergie à un instant donné :

$$s = \frac{dw}{dt}$$

La puissance s peut avoir un caractère, faisant nécessairement intervenir pour l'analyse des circuits électriques des composantes de différents aspects (puissance active, puissance réactive, puissance apparente, puissance déformante).

Dans le cas particulier idéal lorsque la tension et le courant sont sinusoïdaux,

$$U = U_m \, Sin \, (wt + \emptyset u)$$

$$i = lm \, Sin \, (wt + \emptyset i)$$

La puissance instantanée peut être déterminée comme suit :

$$s = U.i = Um \, .Im \, sin \, (wt + \emptyset u). \sin \, (wt + \emptyset i)$$

$$= U.I \, cos \, \Phi - UI \, cos \, (2wt + 2\emptyset u - \Phi) \ldots\ldots (\mathrm{I.\,2}) \qquad \text{(I.2)}$$

Où

$\Phi = \emptyset u - \emptyset i$ - déphasage entre la tension et le courant

La forme sous la quelle est donnée l'expression (l .2) peut suggérer l'idée de la représenter comme suit :

$$s \;=\; U.I\; cos\,\Phi \;\; - \;\; UI\; cos\,(2wt \; + 2\emptyset u - \Phi\,) = \; sa \; + \; sr \ldots\ldots\ldots\ldots.(\mathrm{I}.3)$$

Où

$sa \;=\; UI\cos\Phi$: Composante constante

$sr \;=\; -UI\; cos\,(2wt \; + 2\emptyset u - \;\Phi\,)$: Composante alternative.

L’expression (I.3) permet d'une façon tout à fait formelle de présenter la courbe de la puissance instantanée par la somme d'une composante constante continue et d'une composante variable oscillant autour de l'axe des abscisses à une fréquence double de celle de la tension appliquée.

Cette dernière explique le changement de la direction de l'énergie dans le circuit.

En utilisant la formule (I.1) on peut déterminer le travail effectué pendant une période de variation du courant pour établir ce dernier dans le circuit. Le travail est égal à :

$$W = \int_0^T s(t)\,.\,dt = \int_0^T U.i\; dt$$

ou bien, en tenant compte de (I.3)

$$W \,= \int_0^{2\pi/w} U\,.\,I\cos\emptyset\; dt - \int_0^{2\pi/w} U.I\cos(2wt + 2\emptyset u - \emptyset)dt = \frac{2\pi}{w} sa \;\ldots\ldots..(\mathrm{I}.4)$$

Ainsi donc l'énergie utile mise en jeu dans le circuit est numériquement égale à la somme algébrique de la surface délimitée par la courbe $s(t)$ et l'axe des abscisses, c'est à dire de la somme des surfaces "positives" diminuées de celles "négatives" ou alors de manière équivalente à la surface du rectangle ayant pour longueur $2\pi/w$ et pour largeur $sa = UI\cos\emptyset$.

Cette dernière grandeur est dite "puissance active". La puissance active est donc déterminée par:

$$W = \int_0^{2\pi/w} U\,.I \cos\emptyset \, dt - \int_0^{2\pi/w} U.I \cos(2wt + 2\emptyset u - \emptyset) dt = \frac{2\pi}{w} sa \quad (I.4)$$

et caractérise la vitesse de transformation de l'énergie électrique en une autre forme de l'énergie.

$$P = \frac{w}{2\pi} w = \frac{1}{T} \int_0^{T} s(t)\,.dt = \frac{1}{T} - \int_0^{T} U.I \;\; dt \ldots \ldots . \ldots \ldots \qquad ..(I.5)$$

Ici, il faut préciser que l’énergie électrique$w$, mesure en moyenne le travail utile effectué à la sortie du système électrique mais ne donne en aucune façon des informations sur l'aspect conservatif du processus électromagnétiques ayant lieu dans le système, c'est-à-dire sur les échanges énergétiques entre la source et le récepteur.

L’expression $(\mathrm{I}.2)$ peut encore être décomposée et mise sous forme :

$$S = \; U.I \; cos\emptyset - UI[cos(2wt + 2\emptyset u).cos\emptyset + sin(2wt + 2\emptyset u).sin\emptyset]$$

$$= \; U.I \; cos\emptyset - UIcos\emptyset \,.\cos(2wt + 2\emptyset u) - UI \; sin\emptyset \,.sin(2wt + 2\emptyset u)$$

$$= \; P - P\cos(2wt + 2\emptyset u) - Q\sin(2wt + 2\emptyset u)$$

ou bien

$$s = p + q \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \qquad \ldots \ldots \ldots \ldots \qquad \ldots.(\mathrm{I}.6)$$

Avec : $P = \; UI \; cos\emptyset$

$$p = p - p \; cos \; (2wt \; + \; 2\emptyset u)$$

$$Q = UI \; sin\emptyset$$

$$Q = Q \; sin \; (2wt \; + 2\emptyset u)$$

Dans ce cas, l'énergie transformée décrite par la valeur moyenne *p* est uniquement égale.

à la surface délimitée par la courbe de la puissance active instantanée.

On peut remarquer que cette puissance est positive et oscille avec une fréquence double de celle de la tension appliquée, autour d'une moyenne égale à p, tandis qu'avec la même fréquence, la puissance instantanée q oscille autour d'une valeur moyenne nulle.

L'amplitude des oscillations de cette puissance est dite puissance réactive, elle est égale à $Q = U.I \sin \emptyset$.

Du point de vue compensation, la représentation de la figure(I.l) offre un intérêt précis. En effet, par compensation on entend habituellement, la réduction de la composante réactive du courant dans le circuit, déterminée par rapport à la tension.

Pour installer ce régime, on doit insérer dans le circuit concerné un élément de même nature (ayant la propriété d'accumulation) que ce lui dont on veut réduire l'effet, mais de comportement, à chaque instant du temps strictement opposé de telle façon que l'interaction ne laissera dans le circuit que la composante active P

Or la représentation considérée, permet une description plus plausible du processus d'échange entre la source et la charge, puisque celui-ci est alors représenté par une composante déterminée qui pourrait nous renseigner sur l'élément de compensation. Ceci n'aurait pas pu être immédiatement obtenu à partir de la représentation fig. (I.1a). Cependant la courbe, donnant les valeurs instantanées de la puissance, répondra toujours au processus réel dans le circuit électrique [6-13].

En se référant à la courbe Fig. (I. 1a), représentant $s\,(t)$, on peut facilement constater que l'énergie électrique échangée par le récepteur vers la source pendant la période $T = 2\pi/W$ est égale à la surface délimitée par les ordonnées négatives de $s(t)$ et l'axe des abscisses.

$$W\_ = -F\_ = -2 \int U\,i\,dt = 2 \int pd\,\emptyset - \int UI\ \cos\,(2\,wt - \emptyset)\,d\emptyset$$

$$W\_ = 2(\,Q - P\emptyset\,).$$

La même valeur d'échange est renvoyée par la source vers le récepteur, pendant les intervalles de temps intermédiaires, (symboliquement W_+ sur la fig. I. 1a).

$$W_+ \ = \ W_-$$

La somme de ces deux grandeurs donne :

$$W_+ + \ W_- = 4(Q - P\emptyset) \dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad ..(\mathrm{I}.7)$$

En divisant cette expression par 2π , on obtient la puissance moyenne correspondante, dite puissance d'accumulation Pac. [11-17]

$$Pac \ = \frac{4(Q - P\emptyset)}{2\pi} = \frac{2}{\pi} - \frac{2\emptyset}{\pi} \ P \dots\dots\dots\dots\dots\dots (I.8)$$

On peut facilement vérifier que la puissance d'accumulation Pac est égale à :

$$Pac \ = \frac{1}{T}\int_0^T |s(t)|\, dt - \frac{1}{T}\int_0^T s(t)\, dt = M - P \dots\dots\dots\dots\dots . (\mathrm{I}.9)$$

Où M, est appelée puissance modulaire [11]

D'après l'expression $(I.8)$, Q peut être exprimée par :

$$Q = \frac{\pi}{2} Pac \ + \emptyset\, P \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad (\mathrm{I}.10)$$

ou bien en tenant compte de $(I.9)$, comme :

$$Q = \frac{\pi}{2}\left[M - \ P\left(1 - \frac{2\emptyset}{\pi}\right)\right] \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad (\mathrm{I}.11)$$

Ainsi l'expression (11) établie dans le travail [11] permet de calculer la puissance réactive (dans un système sinusoïdal), connaissant les valeurs M, P et $\emptyset$.

Les notions de puissances modulaires et l'accumulation introduite dans le travail [11-15] permettent d'évaluer les caractéristiques du système par des valeurs moyennes d'un processus résultant.

Mais $Q \ = \ U.I\ sin\emptyset$ ne donne pas d'indications sur les aspects différents du processus s'ils sont pris séparément.

En effet en examinent les courbes fig. (I.1) on peut voir que l'énergie résultante $W(-)$ fig.$(I.l)$, est le résultat de l'interaction pendant l'intervalle $\emptyset/w$ entre les Procéssus de Transformation décrit par la courbe $p(t)$ et le Processus d'accumulation et d'échange décrit par $q(t)$.

Dans ce cas la puissance réactive est égale à l'amplitude des oscillations de $q(t)$ et peut être exprimée par la surface délimitée par $q(t)$ et l'axe des abscisses.

Si l'on désigne par F, la surface délimitée par une alternance de $q(t)$, on peut alors écrire.

$$W = F = \int_0^{\pi/W} Q\sin(2wt)\,.\,dt = \frac{Q}{W} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.(\mathrm{I}.12)$$

où W : quantité d'énergie accumulée et échangée entre la source le récepteur et la source.

La puissance d'accumulation dans ce cas sera:

$$P'ac = \frac{W}{\frac{T}{4}} = \frac{Q}{W}\,.\frac{4}{T} = \frac{2}{\pi}\,.\,Q \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots(\mathrm{I}.13)$$

Les expressions (I.11) et (I.14) donnent exactement le même résultat puisque

$P'ac = M - P\left(1 - \frac{2\emptyset}{\pi}\right)$, Seulement les représentations sont différentes Vu que :

$$P'ac \neq Pac = \frac{2}{\pi}.Q - \frac{2\emptyset}{\pi}p$$

Dans les systèmes sinusoïdaux, malgré certaines différences dans les représentations, les résultats des problèmes liés à la puissance réactive sont identiques. La position est tout autre en ce qui concerne les systèmes caractérisés par la non-sinusoïdalité et l'asymétrie [19, 23].

I. 2 Définition en régime non sinusoïdal

I. 2. 1 Les puissances dans les circuits linéaires en régime permanant périodique non sinusoïdal

La puissance instantanée chargée aux bornes d'un dipôle active où passive avec $s = u\,(t)\,.\,i\,(t)$

Le dipôle étant linéaire en régime permanant périodique non sinusoïdal, la tension aux bornes u(t) et le courant i (t), peuvent s'écrire sous la forme de série de Fourier. [6]

$$u = U_0 + \sqrt{2} \sum U_k \sin(Kwt + \beta\, Uk)$$

$$i = I_0 + \sqrt{2} \sum I_k \; sin\,(Kwt + \beta\, Ik) \dots\dots\dots\dots\dots \qquad (1.15\,)$$

En introduisant les expressions *(I.15)* dans la relation de la puissance il résulte :

$$S = U_0\, I_0 + \sqrt{2}\, U_0 \sum Ik \; sin\,(Kwt + \beta\, Ik) + \sqrt{2}\, I_0 \sum U_k\,(\,sin(Kwt + \beta_u k\,)$$
$$+ \; 2 \sum_{p=1}^{\infty}\sum_{q=1}^{\infty} Up\; Ip\; sin\,(Pwt + \beta_u p) sin\,(qwt + \beta_u q) \dots\dots\dots\dots..(\mathrm{I.}\,16)$$

I. 2. 2 Puissance active

A la base de la définition de la puissance active carme la moyenne sur une période de la puissance instantanée.

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T U\,(t).\,I(t)\; dt$$

On obtient

$$P = \frac{1}{T} U_0 I_0 \int_0^T dt + \frac{\sqrt{2}U_0}{T}\sum I\,K \int_0^T sin\,(Kwt + \beta ik)dt$$
$$+ \frac{\sqrt{2}U_0}{T}\sum U\,K \int_0^T sin\,(Kwt + \beta uk)dt$$
$$+ \frac{2}{T}\sum\sum Up\; Ip \int_0^T sin\,(Pwt + \beta up).\,sin\,(qwt + \beta_{ik})dt \dots\dots..(\mathrm{I.}\,17)$$

où on Peut poser,

$$\int_0^T sin\,(Pwt + \beta up).\,sin\,\left(qwt + \beta_{iq}\right)dt = \frac{T}{2}\cos(\beta_{up} - \beta_{Iq})$$

ainsi, l'expression (I.17) devient :

$$p = U_0 I_0 + \sum Uk \ .Ik \ .cos \ (\beta_{uk} - \beta_{ik}) \dots \dots \dots \dots \qquad \dots . \qquad (I.18)$$

Où $\left(\beta_{uk} - \beta_{ik} \right) = \emptyset_k$

Donc :

$$p = U_0 I_0 + \sum Uk \ .Ik \ .cos(\emptyset_k) \ ; (\emptyset_0 = 0) \dots \dots \dots \dots \dots \qquad \dots . (I.19)$$

Alors en régime permanant périodique non sinusoïdal la puissance active est égale à la somme des puissances actives des harmoniques. Cette puissance active définie ci-dessus avec la relation (I.19), peut être mesurée par exemple à l'aide d'un Wattmètre électrodynamique.

I. 2. 3 Puissance réactive

La définition de la puissance réactive en régime sinusoïdal ne présente aucune difficulté, il n'est nécessaire de la rappeler. La définition de cette grandeur en régime déformant est plus difficile, et même aujourd'hui après soixante ans de discussions l'accord n’est pas réalisé.

Deux conceptions ont été à la base des définitions données pour la puissance réactive en régime déformant la première de ces conceptions est liée à la notion d'énergie moyenne des champs magnétiques et électriques, la puissance étant définie par l'expression.

$$Q = 2U \left(W_m - W_e \right) \qquad (I.20)$$

Dans laquelle$W_m = 1/2. \ LI^2$ est l'energie des champs magnétiques et $W_e = 1/2. \ C \ U^2$ est l'énergie des champs électriques.

Cette conception qui est juste en régime sinusoïdal, a été adoptée par plusieurs auteurs pour des raisons théoriques, mais aussi pour une raison d'opportunité, la possibilité de mesure la puissance réactive en régime déformant.

A. ILIOVICI à proposé d'adopté, pour préciser la notion de puissance réactive en régime déformant l'expression :

$$Q = - \frac{W}{T} \int_0^T \emptyset \ i \ dt \ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \qquad \dots (I.21)$$

Dans la quelle w et T sont réspectivement la pulsation et la période de l'onde fondamentale du courant alternatif, $\emptyset$: le flux alternatif définie par la relation $e = -d\emptyset/dt$,et e : différence de potentielle aux bornes du circuit dont on définie la puissance réactive et i courant qui traverse le circuit. En utilisant le développement en série de Fourier on trouve que cette définition conduit à l'expression :

$$Q = \sum_{1}^{n} \frac{1}{n} U_n I_n \sin \emptyset_n = \sum_{1}^{n} \frac{1}{n} Q_n \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (\text{I}.22)$$

Dans laquelle, :

$Q_n = U_n \, I_n \, sin \, \emptyset_n$

avec

$(n = 1,2,3 \ldots \ \ldots)$ sont les puissances réactives correspondante à la sinusoïde d'ordre *n*. On obtient ainsi le même résultat qu'avec la relation proposé par A. LIENARD à savoir :

$$Q = -\frac{W}{T} \int_{0}^{T} u.q \ dt \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (\text{I}.23)$$

Dans laquelle u est la valeur instantanée de la tension alternative non sinusoïdale aux bornes du récepteur dont la puissance réactive est définie. q : la quantité de l'électricité transmise par le même conducteur et par conséquent un courant alternatif d'une forme sinusoïdal quelconque de sorte que à : $dq/dt = i$.

La puissance réactive suivant la définition (I.22) pourrait être mesurée à l'aide d'un varmètre électrodynamique dans lequel le circuit volumétrique aurait une résistance négligeable par rapport à sa réactance.

A.ILIOVICI à proposé aussi une autre définition de la puissance réactive par la relation suivante, [6].

$$Q = -\frac{1}{WT} \int_{0}^{T} ide \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (\text{I}.24)$$

On utilisant le développement en série de Fourier des deux ondes - du courant et de la tension - on obtient l'expression de la puissance réactive sous la forme.

$$Q = \sum_{1}^{n} n\, U_n\, I_n \sin\emptyset_n = \sum_{1}^{n} nQ_n \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad \ldots(\mathrm{I}.25)$$

La puissance définie par cette expression peut-être mesurée avec un varmètre d'induction dont la bobine de tension à une résistance négligeable par rapport à sa réactance, comme dans le cas précédent.

Les expressions (I.22) et (I.25) de la définition de la puissance réactive en régime déformant nécessites un support physique admissible. En effet ces expressions ne sont pas symétriques par rapport à l'expression de puissance active dans un tel régime

$$P = \sum_{1}^{n} U_n\, I_n\; cos\, \emptyset_n \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots. \qquad (\mathrm{I}.26)$$

De plus, ces expressions n’ont pas de corrélation avec l’expression de la puissance apparente.

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Enfin, les définitions sous la forme (I. 22) et (I. 25) conduisent à des conclusions inadmissibles. Ainsi, soit un régime déformant composé de l’onde fondamentale et de l’harmonique 3 *;* si, par un moyen de résonnance (filtre), on supprime la fondamentale, ce qui est toujours possible, la puissance réactive dans le circuit devient,

$$Q_1 = \frac{1}{3} U_3\, I_3\, sin\, \emptyset_3 \qquad \text{Ou} \qquad Q_2 = 3U_3 I_3 sin\, \emptyset_3$$

Ce qui est en complète contradiction avec la relation

$$Q = U_3\, I_3\, sin\; \emptyset_3 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (\mathrm{I}.27)$$

De la puissance réactive en régime sinusoïdal ; le régime déformant considéré étant aussi après filtrage, un régime sinusoïdal.

Le fait même qu’il puisse exister pour exprimer la même grandeur dans le même régime, deux expressions tout à fait différentes prouve le caractère conventionnel et arbitraire de, ces définitions.

Remarquons que toutes les relations indiquées, plus haut sont rigoureusement valables pour $n = 1$. C'est à dire en régime sinusoïdal.

La deuxième conception de "C.BUDEANU" elle est fondée sur le principe de la séparation de la puissance apparente en trois termes orthogonaux sous la forme :

$$s^2 = p^2 + Q^2 + D^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad \ldots \qquad (I.28)$$

On obtient cette relation en partant l'expression de la puissance apparente en régime déformant.

$$s = U.I \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots. \qquad (I.29)$$

U et l étant des valeurs efficaces des ondes non sinusoïdales de tension et de courant, à savoir :

$$U = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} {U_k}^2}$$

et

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} {I_k}^2}$$

en écrivant sous la forme suivante,

$$I^2 = \sum_{k=1}^{n} I^2k \left(cos^2\emptyset_k + sin^2\emptyset_k\right) = \sum_{k=1}^{n} I^2k\, cos^2\emptyset_k + \sum_{k=1}^{n} I^2k\, sin^2\emptyset_k$$

Où :

$$\emptyset_j = \beta_{uj} - \beta_{ij}, \qquad \emptyset_k = \beta_{uk} - \beta_{ik}$$

I. 2. 4 Le facteur de puissance

Le facteur de puissance est égal par définition à :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{puissance\_active\_((kW)}{puissance\_apparente\_(kVA)} \qquad (I.30)$$

Si les courants et tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux, le facteur de puissance est égal à cosϕ. On utilise également la variable tgϕ. Dans les mêmes conditions, nous avons la relation :

$$tg\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{puissance\_réactive\_((kvar)}{puissance\_active\_(kW)} \qquad (I.31)$$

L'objectif de la compensation d'énergie réactive est de réduire le courant appelé sur le réseau. L'énergie réactive est fournie par des condensateurs, au plus près des charges inductives. Sur une période de temps donnée, nous avons également :

$$tg\varphi = \frac{Wr}{Wa} = \frac{énergie\_réactive\_consommée\_((k\,var\,h)}{énergie\_active\_consommée\_(kWh)} \qquad (I.32)$$

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes. En effet, pour une même puissance active P, la figure suivante montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente, et donc de courant, que la puissance réactive est importante

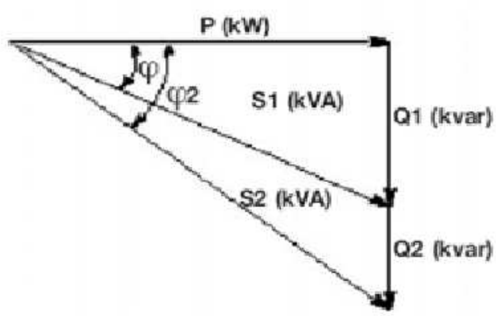

Figure I. 1 Représentation des puissances

Ainsi, du fait d'un courant appelé plus important, la circulation de l'énergie réactive sur les réseaux de distribution entraîne des surcharges au niveau des transformateurs, l'échauffement des câbles d'alimentation, des pertes supplémentaires, des chutes de tension importantes.

En régime permanant périodique non sinusoïdal le facteur de puissance se calcul de la même façon comme dans le régime permanant périodique sinusoïdal avec la relation.

$$Cos\emptyset = \frac{p}{s} = \frac{UI\cos\emptyset}{UI} \qquad (\mathrm{I}.33)$$

Conclusion

Dans ce chapitre il a était mentionner les différentes approches mathématique des différentes caractéristiques du réseau électrique (la puissance apparente, puissance active, puissance réactive et le facteur de puissance). Nous avons étalés l'ensemble des formules décrivant les différentes puissances dans les circuits linéaires en régime permanant périodique non sinusoïdal

CHAPITRE II

Méthode de calcul et détermination de la puissance réactive dans les régimes non sinusoïdaux

Introduction

Les méthodes de calcul de la puissance réactive examinées nous permettent de constater que les différents travaux effectués et notamment l'approche donnant lieu à une analyse détaillée [9-11] des différents méthodes de calcul existantes et différentes interprétations physiques

II. 1. Contradiction et difficultés dans la détermination de la puissance réactive

La détermination de la puissance réactive dans les circuits non-sinusoïdaux a montrées clairement que toutes les théories élaborées conduisent à trois formules à caractère général.

$$Q = \sum_{1}^{n} Q_n \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad \dots \quad \dots (II.1)$$

$$Q = \sum_{1}^{n} n \,.\, Q_n \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad \dots\dots (II.2)$$

$$Q = \sum_{1}^{n} \frac{1}{n} \,.\, Q_n \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad \dots (II.3)$$

où $Q_n = U_n I_n n \sin \emptyset_n$: Puissance réactive de l'harmonique de rang n.

U_n , I_n: Tension et courant efficaces de l’harmonique de rang n

$\emptyset_n$: Angle de déphasage entre U_n et I_n.

n : Le numéro de l'harmonique

Le sens physique est basé sur deux propriétés physiques non contradictoires mais aussi non équivalentes à savoir :

- La vitesse de l'échange énergétique entre les différents organes de transformation.
- La vitesse de variation de la résistance instantanée du circuit.

On peut voir que les formules $(\mathrm{II}.1 - \mathrm{II}.3)$ ne sont équivalentes que pour les circuits sinusoïdaux($n = 1$), par contre pour $n \neq 1$ elles donnent des résultats tout à fait contradictoires.

L'expression $(\mathrm{II}.1)$ définie la puissance réactive par analogie à la puissance active, cette expression est très connue et largement publiée dans la théorie d'électrotechnique.

L'expression $(\mathrm{II}.2)$ découle de la caractéristique intégrale de la puissance réactive.

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int u \, di$$

Où u, i : tension et courant instantanés.

Elle est utilisée en pratique pour évaluer les indices énergétiques des convertisseurs.

L'expression $(\mathrm{II}.3)$ définit la puissance réactive comme une valeur intégrale de la différence entre les énergies électromagnétique (i) et électrostatique (u).

Dans les régimes sinusoïdaux, la puissance réactive est définie comme l'amplitude de la valeur instantanée de la puissance de fluctuation, qui caractérise, 1 'échange de l'énergie entre la source et la charge ou bien comme valeur moyenne d'une puissance instantanée primaire, définie analogie à la puissance instantanée active [8-14].

Malgré le caractère conventionnel et la différence dans l'approche pour la définition de la puissance réactive, les résultats obtenus pour les régimes sinusoïdaux sont équivalents et correspondent. Les expressions$(\mathrm{II}.1)$, $(\mathrm{II}.2)$ et $(\mathrm{II}.3)$, destinées pour le calcul des régimes sinusoïdaux quand $n = 1$.

Pour l'évaluation de la puissance réactive en tenant compte des harmoniques supérieurs, les expressions en question donnent des résultats différents $(n > 1)$.

Une question évidente peut être déjà posée (pour quelle valeur de la puissance réactives s'établit la balance au niveau d'un nœud de charge en présence des harmoniques supérieurs?).

Du point de vue énergétique, on a comparé les formules obtenues et on a montré que l'expression $(\mathrm{II}.2)$ de calcul donne une représentation plus complète quant au déroulement des processus énergétiques dans le circuit électrique et en présence d'harmoniques supérieurs.

II. 2. Description mathématique du modèle retenu

D'une manière générale pour résoudre les problèmes de compensation dans les réseaux électriques, on utilise des installations rotatives ou statiques. La première correspond au compensateur synchrone qui est en effet une machine synchrone dépourvue de son couple résistant. Le principe de fonctionnement, les avantages. et les inconvénients de' ce type de compensateur ne constituent pas l'objet de notre travail et sont largement exposés dans beaucoup de travaux [14].

Les modes de compensation statique sont multiples, et de même, leur principe de fonctionnement selon leur réglage sont expliqués dans plusieurs travaux [9-12]. Mais, du fait qu'ils constituent l'objet de notre travail on reprendra ici que leur schéma de principe et les diagrammes correspondants, (fig. II 1 à II.4).

Les courbes représentées sur les diagrammes aussi établies sont de période $T = 2\pi/w$; elles peuvent être sous la forme :

$$f\ (t\ ) = a_0 + \sum a_n \cos nwt + \sum b_n \, sin\, nwt \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots. (\text{II}.4)$$

Où : a_0: composante constante de $f\ (t)$.

a_n , b_n - respectivement les amplitudes cosinusoïdales et sinusoïdales de l'harmonique de rang 'n'.

Les grandeurs a_0, a_n et b_n sont en fait, les coefficients de la décomposition en série de Fourier.

Ils peuvent être calculés carme suit :

$$a_0 = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} f(wt)\, dt \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots. (II.5)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} f(wt) \,.\cos n\ wt\ dt \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.. (II.6)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} f(wt) \,.\, sin\, n\ wt\ dt \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.. (II.7)$$

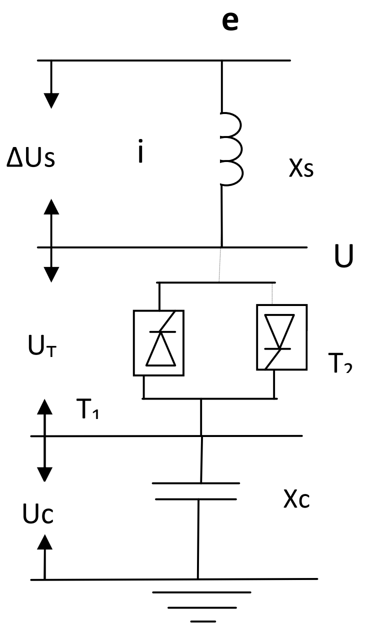

Figure II. 1 Schéma de principe de compensation

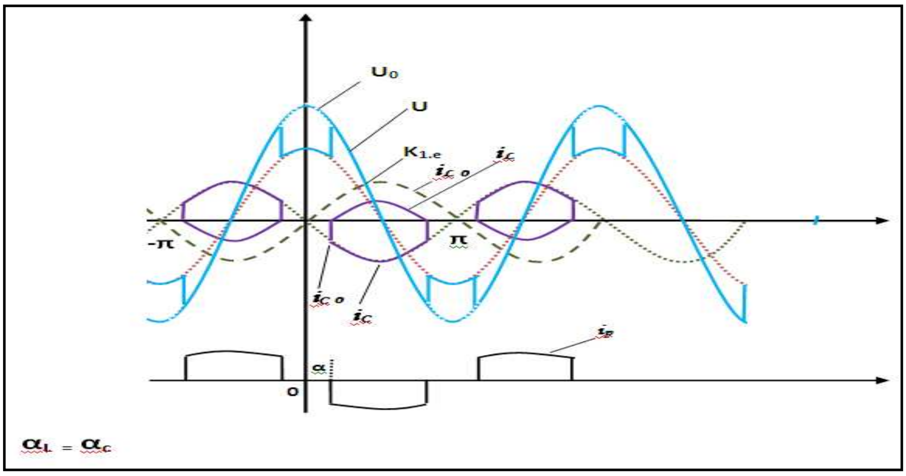

Figure II. 2 Formes d’ondes des courants et tensions quand $\alpha_L = \alpha_C$

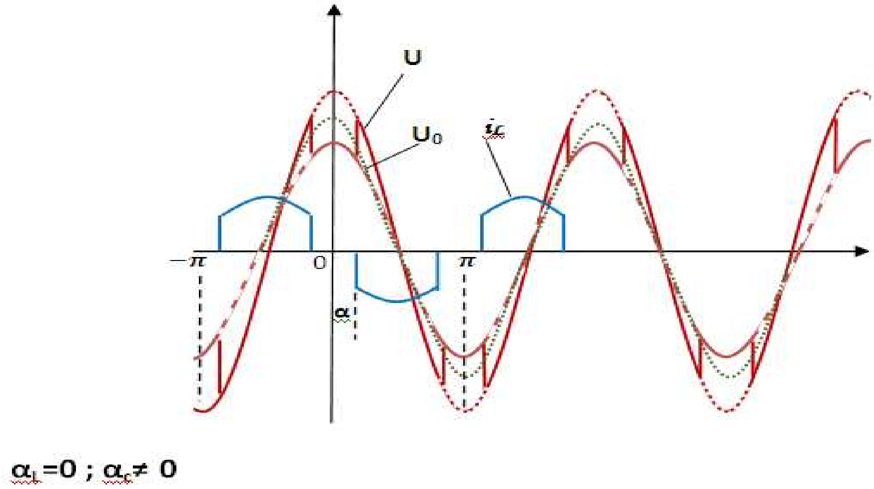

Figure II. 3 Formes d’ondes des courants et tensions quand α_L=0, $\alpha_C \neq 0$

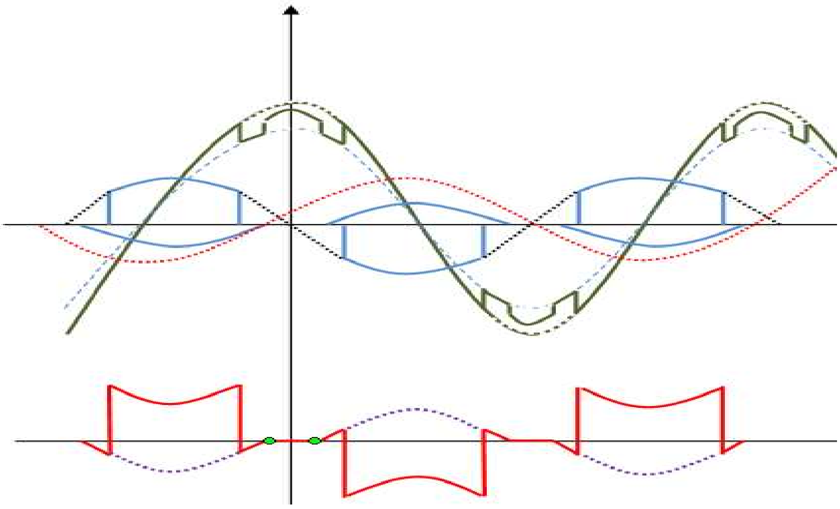

Figure II. 4 Formes d’ondes des courants et tensions quand $\alpha_L \neq \alpha_C$

En supposant que la tension du réseau varie selon une loi sinusoïdale $u = U_a cos\, wt$, on peut dire que la courbe instantanée discontinue de la tension aux bornes de l’inductance est symétrique par rapport à l'axe des ordonnées, par conséquent on peut poser dans l’expression (II. 4)

$$a_0 = 0 \qquad et \quad b_n = 0$$

Il s'ensuit que le contenu harmonique de cette tension ne comporte plus que les composantes cosinusoïdales, dont les amplitudes peuvent être calculées carme suit :

$$a_n = \frac{2}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi-\alpha} U_m \,.\, cos\, wt \,.\, cos\, n\, wt .\, dw\, t$$

Après transformation trigonométrique et en effectuant l'intégrale sur l'intervalle aux bornes définis α et $\pi - \alpha$ et en faisant quelques transformations on obtient :

$$a_n = \frac{U_m}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi-\alpha} [cos\,(1+n)\,wt + cos\,(1-n)wt]\,dwt.$$

- Pour $n = 1$, le deuxième terme du deuxième montre de l'expression de a_n, qui a priori est une grandeur indéterminée, sera déterminée par la limite de la forme $sin\, x/x$ quand $x \rightarrow 0$

Ainsi on peut obtenir, pour $n = 1$

$$a_n = a_1 = U_m(1 - 2\alpha\pi - 1/\pi\ .\sin 2\alpha)$$

Ce qui permet d'exprimer, la tension fondamentale aux bornes de X_L ,

$$U_{L\,1} = U_m\, a_{L1} \cos wt$$

où

$$a_{L1} = \frac{a_1}{U_m} = (1 - 2\alpha\pi - 1/\pi\ .\sin 2\alpha)$$

Pour $n > 1$ les coefficients an peuvent être trouvés par l'expression,

$$a_n = \frac{U_m}{\pi}\left[\frac{1}{\frac{(1+n)}{2}} sin(1+n)\alpha + \frac{1}{\frac{(1-n)}{2}}\ sin(1-n)\alpha\right]$$

$$= \frac{2U_m}{\pi}\left[\frac{sin(1+n)\alpha}{(1+n)} + \frac{sin(1-n)\alpha}{(1-n)}\right] = U_m .\, a_{Ln}$$

Où :

$$aI_n = \frac{2}{\pi}\left[\frac{sin(1+n)\alpha}{(1+n)} + \frac{sin(1-n)\alpha}{(1-n)}\right] \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots . \text{(II .8)}$$

La tension aux bornes de l'inductance étant par hypothèse paire, finalement on peut écrire pour le $n^{ième}$ harmonique de la tension.

$$U_{Ln} = U_m . a_{Ln} \cos n \ wt \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (II.9)$$

En faisant le même raisonnement on trouve le contenu harmonique dans la courbe du courant instantané (fig. I. 2) en mettant dans la formule$(\mathrm{II}.4)$.

$$a_0 = 0 \quad \text{et} \quad a_n = 0$$

de cette façon on peut écrire :

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} I_m \ (sinwt - sin\alpha) \ sin\, n\, wt\, dwt$$

ou bien après transformation trigonométriques,

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} I_m sinwt \ \sin wt_{dwt} - \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} I_m \sin\alpha \sin nwt \,.\, dwt$$

$$= \frac{2I_m}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} \frac{1}{2} [-\cos(1+n)\, wt + \cos(1-n)wt] \ \mathrm{dwt} - \frac{2I_m}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} sinn\, wt \,.\, dwt$$

$$= \frac{I_m}{\pi} \left[\frac{-sin(1+n)}{(1+n)} \Bigg|_{\alpha}^{\pi-\alpha} + \frac{sin(1-n)}{(1-n)} \Bigg|_{\alpha}^{\pi-\alpha} \right] - \frac{2I_m}{\pi} sin\,\alpha \left[- \frac{cos\, n\, wt}{n} \right]_{\alpha}^{\pi-\alpha}$$

$$= \frac{-I_m}{(1+n)\pi} [sin(1+n)\,(\pi-\alpha) - \sin(1+n)\alpha\,] - \frac{I_m}{(1-n)\pi} [sin(1-n)(\pi-\alpha) - sin(1-n)\alpha]$$

$$+ \frac{2}{n\pi} . I_m sin\,\alpha [cos\, n(\pi-\alpha) - \cos n\,\alpha]$$

Pour $n = 1$, et en tenant compte de l'approximation $sin\, x = x$, quand $x \to 0$, on obtient :

$$b_n = \frac{-I_m}{n\pi}\left[sin[2(\pi-\alpha) - \ sin2\alpha] + \frac{I_m}{(1-n)\pi}[(1-n)(\pi-\alpha)-(1-n)\alpha]\right]$$

$$= \frac{-I_m}{n\pi}\left[sin[2(\pi-\alpha) - \ sin2\alpha] + \frac{I_m}{(1-n)\pi}[(1-n)(\pi-\alpha)-(1-n)\alpha]\right]$$

$$+ \frac{2}{\pi} I_m \, sin\,\alpha\,[\cos(\pi-\alpha) \ - cos\alpha]$$

$$= \frac{-I_m}{n\pi}\ [sin\,2(\pi-\alpha) - \ sin2\alpha] + I_m\left[\frac{\pi-\alpha}{\pi} - \frac{\alpha}{\pi}\right] + [(1-n)(\pi-\alpha)-(1-n)\alpha]$$

Après transformation cette expression ce réduit à :

$$b_1 = \ I_m\left[\frac{\sin 2\alpha}{\pi} + 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{2}{\pi}\sin 2\alpha\right]$$

Ou bien :

$$b_1 = \ I_m\left[1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \sin 2\alpha \,.\frac{2}{\pi}\right] = I_m a_{L1} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.. (II.10)$$

Le courant fondamental dans l'inductance est :

$$i_{L1} \ = \ I_m\,.\,a_{L1}\,.\,sin\,wt \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots. (II.11)$$

pour $n > 1$,

$$b_n = \ \frac{I_m\,2\alpha}{n\,\pi}\left[\frac{\sin(1+n)\alpha}{(1+n)} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{(1-n)}\right]$$

$$= \ I_m\,.\,a_{L1}.\frac{1}{n}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.\ldots\ldots\ldots.. (II.12)$$

Ce qui permet d'écrire,

$$i_{Ln} = I_m\,.\,a_{Ln}.\frac{1}{n}\sin n \ wt \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (II.13)$$

Pour la branche capacitive, on peut procéder de la même manière. En se référant au diagramme linéaire fig. *(I.* 5) on peut déduire les expressions des tensions et des courants de la capacité au régime déformant. Si l'on tient compte, comme c'est le cas justement dans ce travail, de la réactance du système X_s ; la tension du système $e(t)$ est équilibrée par les tensions aux bornes des éléments X_s , thyristor et X_c ; tel que

$$e = D_{Us} + U_t + U_c$$

$$= -E_m \cos wt \ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (II.14)$$

où

D_{Us} - chutte de tension sur **X_s**

U_t - Tension aux bornes des thyristors

U_c - Tension au bornes de **X_c**.

avec

$$U1 = UT + Uc \ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots. (II.15)$$

où

U - tension du réseau ou tension du nœud considéré

Pour $= 0$, ces grandeurs prennent les valeurs :

$$U = U_C = U_0 = -U_0 m \cos wt$$

$$DU_s = DU_s O(U_{0m} - E_m) \cos wt$$

$$U_T = 0$$

$$i_c = i_{co} = I_{com} \sin wt$$

Pour $a \neq 0$ toutes ces grandeurs peuvent être représentées sous forme de série; ainsi pour U, U_c; et i on peut écrire :

$$U = U_1 + \sum_1^{\infty} U_n$$

$$U_c = U_{c1} + \sum_1^{\infty} U_{cn}$$

$$i = i_1 + \sum_1^{\infty} i_n$$

Les grandeurs fondamentales des courants et des tensions instantanées s'expriment ;

Tension aux bornes de la capacité *;*

$$U_{c1} = -U_{om}\left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi}.sin2\alpha\right)\cos wt = -\sqrt{2}U_{c1(\alpha)}coswt \dots\dots\dots\dots (II.16)$$

où

$$U_{c1(\alpha)} = U_0 \ . \ a_{c1}$$

Tension aux bornes du thyristor,

$$U_{T1} = \left[(U_{om} - E_m)\left(\frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi}.sin2\alpha\right) - U_{mo}\left(\frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi}.sin2\alpha\right)\right]coswt$$

$$= \pm\sqrt{2}U_{T1(\alpha)}coswt$$

Tension du nœud,

$$U_1 = U_{r1} + U_{c1} = -\sqrt{2}\,U_{1(\alpha)}\,coswt \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (II.17)$$

Le courant fondamental dans le circuit s’exprime,

$$I_{c1} = I_{mc}\left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi}.sin2\alpha\right)sinwt = \sqrt{2}\,I_{c1}(\alpha)sinwt \dots\dots\dots\dots\dots (II.18)$$

Avec

$$I_{c1} = I_{co}.a_{c1} = I_{co}\left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi}.sin2\alpha\right)$$

De la même manière que précédemment, les valeurs instantanées des harmoniques d'ordre n de la tension aux bornes de la capacité et du courant qui l'a traverse s’exprime grâce aux coefficients de Fourier ; ainsi,

$$U_{cn} = \frac{2\,U_{om}}{\pi_n}\left[\frac{sin(1+n)\alpha}{1+n} - \frac{sin(1-n)\alpha}{1-n}\right]cos\,n\,wt$$

$$= \sqrt{2}U_o\,\frac{a_{cn}}{n}\cos n\,wt \dots\dots\dots \qquad (II.19)$$

$$I_{cn} = \frac{2\,I_m}{\pi}\left[\frac{sin(1+n)\alpha}{1+n} - \frac{sin(1-n)\alpha}{1-n}\right]sin\,n\,wt$$

$$= \sqrt{2}I_o\,a_{cn}\,sin\,n\,wt \dots\dots\dots (I.19)$$

Avec :

$$a_{cn} = \frac{2}{\pi}\left[\frac{sin(1+n)\alpha}{1+n} - \frac{sin(1-n)\alpha}{1-n}\right] \dots\dots\dots\dots\dots\dots..(II.20)$$

Pour les schémas considérés, on peut déjà faire remarquer que les formules de calcul de la puissance réactif qui convergent, dans le cas des régimes sinusoïdaux, donnent des résultats différents dans ceux non sinusoïdaux [9].

II. 3. Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive

En effet, la puissance réactive peut être, éventuellement calculée comme suit :

1. $Q_{L(\alpha)} = U.I_{L\,1}$

Le produit de la tension efficace du nœud fondamental et du courant

2. $Q_{L(\alpha)} = U_1\, I_1$

Le produit de la tension efficace du nœud et, du courant efficace fondamentaux.

3. $Q_{L(\alpha)} = U_{L,C}.I_L$

Le produit de la tension efficace aux bornes de l'inductance et du courant correspondant,

4. $Q_{L(\alpha)} = U_{L,C}^2 \,/\, X_{L,C}$

Le rapport de la tension efficace (au carré) aux bornes de l'inductance et de la réactance.

5. $Q_{L(\alpha)} = I_{L,C}^2 \,/\, X_{L,C}$

Le produit du courant efficace (au carré) et de la réactance.

Conclusion

L'analyse de ces différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans les régimes non sinusoïdaux renseigne sur les ambigüités dans ces interprétations physiques de la puissance réactive et pendant sa détermination [9]. La tâche fixée dans ce travail ne consiste pas à prendre cette analyse, mais à retenir ce qui a semblé plausible dans les conclusions correspondantes, pour étudier un nœud chargé du réseau, mettant en évidence cet aspect du processus électro énergétique, et en déduire ses caractéristiques conformément a un critère ou a une condition donnée. L'indice définissant cette dernière est la tension nodale ; autrement dit, on doit établir, dans ce nœud une balance de puissance réactive pour une tension donnée quand le régime du nœud est non sinusoïdal ou non linéaire.

Cette balance, a la différence des cas classiques, doit être établie sans installation de filtres ; ce qui permettra d'évaluer l'apport des harmoniques supérieurs dans ce nœud. De ce fait apparait une deuxième condition, ayant trait a la qualité de l'énergie électrique dans ce nœud ; et liée à l'écart admissible du Coefficient de non sinusoïdalité.

Dans ce qui précède, on a présenté les schémas de principe des branches du nœud séparément pour lesquels, il a était déterminé les paramètres du régime. Ces derniers permettront dans ce qui suit, d'exprimer les grandeurs caractéristiques du nœud.

Chapitre III.

Analyse de la non-sinusoïdalité du régime pour un modèle statique à thyristors

Introduction

Le modèle, étudié est constitué d'un système de puissance finie, ayant une réactance Xs = 0, débitant dans un nœud auquel est branchée une charge linéaire représentée par l'impédance $Z_H = R_H + jX_H$; cette charge porte un caractère inductif et sa puissance, d'une manière générale est variable. Le compensateur statique est branché au même nœud. Ce dernier est constitué d'une manière générale, par deux branches capacitive et inductive, toutes les deux réglables (fig.III.1). L'ensemble du compensateur et de la charge constitue un élément non linéaire.

III. l Système, Réseau – charge – compensateur

Pour avoir une analyse complète sur la non-sinusoïdalité, nous avons procédé à l'étude de différents régimes - correspondants à des cas de réglage différent des branches du compensateur, ceci peut être obtenu par la variation des angles de conduction des Thyristors branchés en tête bêche (figure III.1).

On détermine les coefficients de non-sinusoïdalité du courant de la charge. Pour une puissance installée du compensateur constituant 5%, 10% et 20% de celle du système $(K_2 = X_s / X_p = 0{,}05\ ;\ 0{,}1\ ;\ 0{,}2)$.

Pour ces rapports de puissance, on considère une variation de la puissance de la charge allant de 1 jusqu’à 0,5 (diminue de 2 fois), c-à-d :

$$X_H^* = \frac{X_H^*}{X_{HO}} = 1 \div 2$$

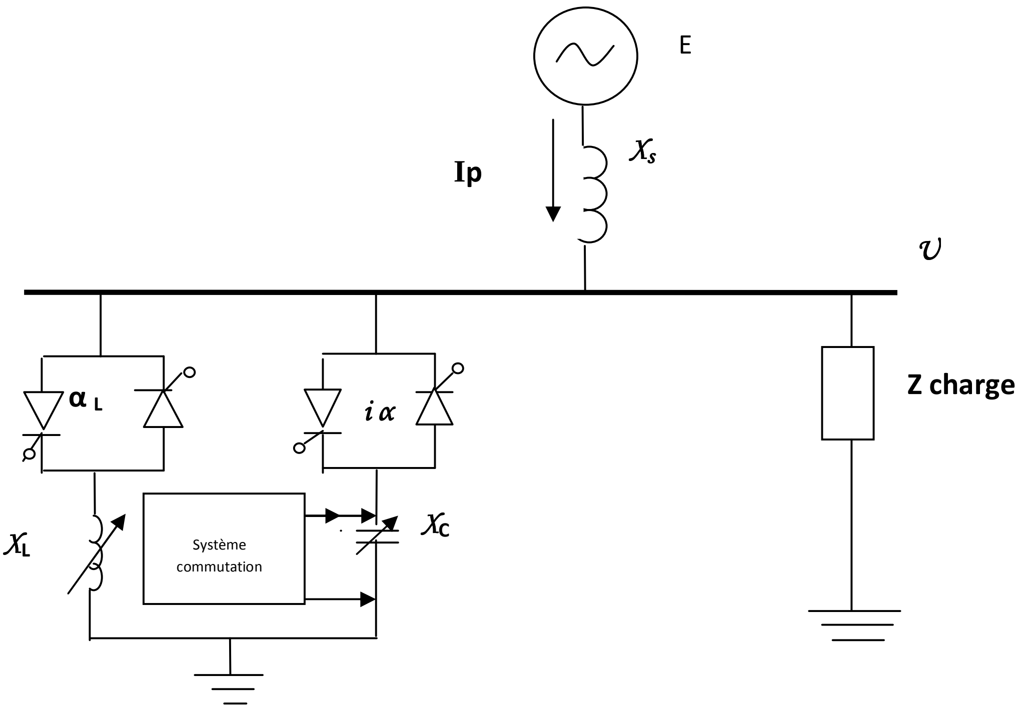

Figure. III.1. Schéma du modèle étudié

où $X_{HO} = X_p$: Réactance de la charge corréspondante à la Puissance installée de cette dernière et égale à celle du compensateur quand $\alpha = 0$ (régime initial).

Si on pose $K_3 = X_S / H_H$, on peut obtenir :

$$\frac{K_2}{K_3} = \frac{\frac{X_S}{X_P}}{\frac{X_S}{X_H}} = \frac{X_H}{X_P} = \frac{X_H}{X_{H\,O}} = X_H^*$$

Ou bien

$$K_3 = \frac{K_2}{X_H^*}$$

Pour l'impédance Z_P, on peut écrire :

$$\frac{1}{Z_P} = \frac{1}{-jX_C} + \frac{1}{jX_L} = \frac{j(X_L - X_C)}{X_L\ .X_C}$$

D'où :

$$Z_P = -jX_P = -j\frac{X_L\ .X_C}{X_L - X_C}$$

Alors :

$$X_P = j\frac{X_L\ .X_C}{X_L - X_C} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.. \qquad (III.1)$$

Si le compensateur doit fournir de la puissance réactive, alors Xp serait capacitif ; s'il doit en consommer, cette dernière serait inductive.

En partant de $K_2\ =\ X_S/X_P$, et compte de $(III.1)$ on peut trouver :

$$K_2 = \frac{X_L - X_C}{X_L\ .X_C}.X_S = \left[\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right]X_S = K_{2C} - K_{2L} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.(III.2)$$

Avec :

$$K_{2C} = \frac{X_S}{X_C} \qquad\qquad K_{2L} = \frac{X_S}{X_L}$$

D'autre part, le rapport entre les puissances (réactances) des branches du compensateur peut être défini comme.

$$\frac{K_{2C}}{K_{2L}} = \frac{X_L}{X_C} = K_{C,L}$$

Ce rapport est par hypothèse, réglable, c-à-d variable ; il est fonction du régime optimal recherché.

En posant $K_{2C} = K_{2L}.K_{2L}$dans l'expression (III. 2) on trouve :

$$K_2\ =\ K_{C,L}\ .K_{2L} - K_{2L} = K_{2L}(K_{C,L} - 1)$$

Ou bien

$$K_{2L} = \frac{K_2}{K_{C,L} - 1} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots.(III.3)$$

De la même manière, en posant K2L = $K_{2C}/K_{C,L}$, on peut trouver :

$$K_{2C} = \frac{K_2}{K_{C,L}-1} \,.K_{C,L} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (III.4)$$

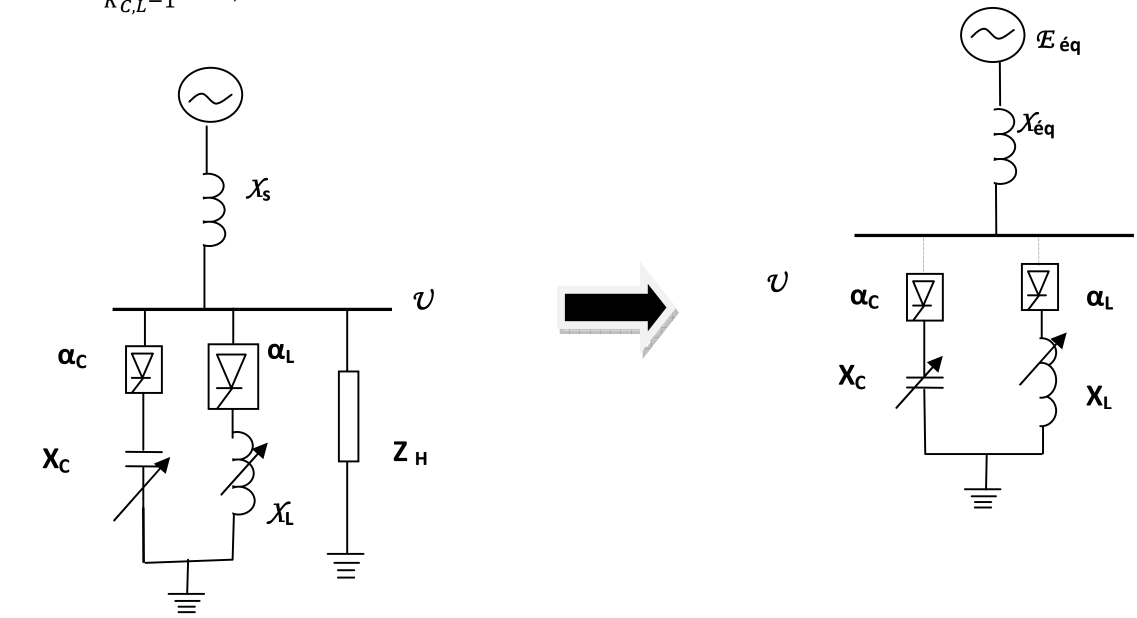

Figure II.2. a Schéma de principe du compensateur branché au nœud quand $\alpha_L=\alpha_C$

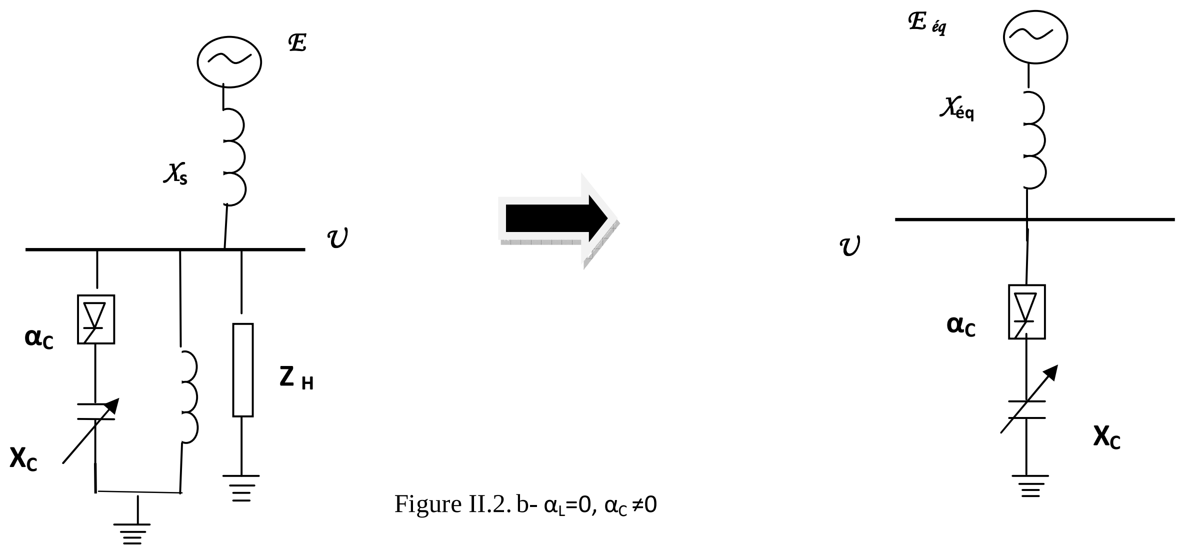

Figure II.2. b- $\alpha_L=0$, $\alpha_C \neq 0$

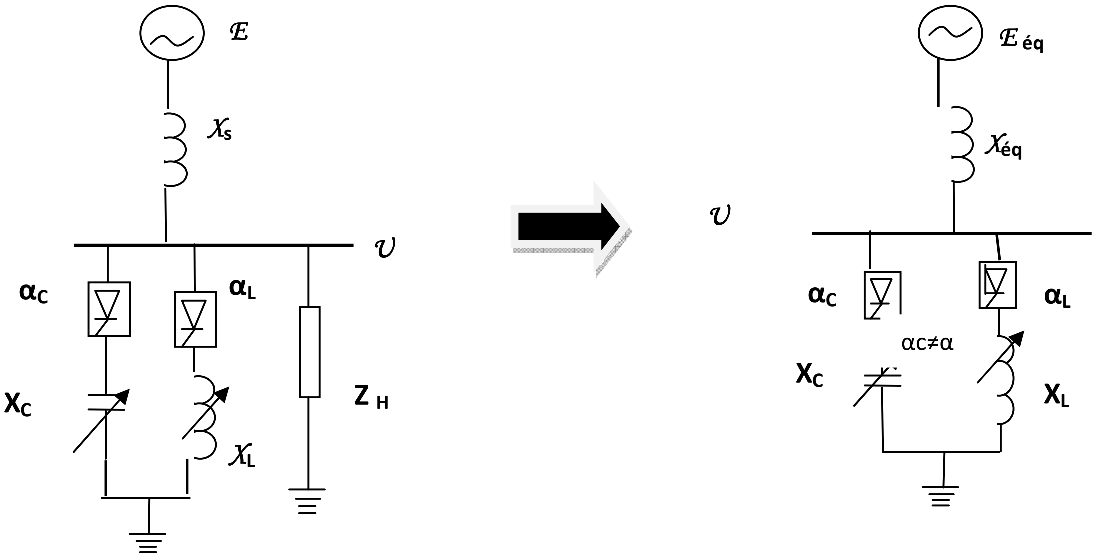

Figure II.2. c Schéma de principe du compensateur branché au nœud quand $\alpha_L \neq \alpha_C$

Ainsi, en donnant une valeur à l'une des réactances du compensateur, on peut trouver l'autre par l'expression (III .3) ou (III. 4) conformément au rapport$K_{C,L}$. Ce rapport est choisi variable dans les limites $K_{C,L} = 1{,}5 \div 2{,}5$ pour montrer concrètement l'effet des différentes possibilités de réglages mais d'une manière générale, il peut aller au delà de 2,5. Il peut être également inférieur à 1 mais dans ce cas, la branche résultante du compensateur aura un caractère inductif, or, dans ce travail on considère une charge inductive, et dans ces conditions le compensateur doit être nécessairement à caractère capacitif. Enfin, il est pris, par sa limite inférieur, différent de 1, pour éviter l'apparition de la résonnance pendant le régime éventuel quand $\alpha = 0$.

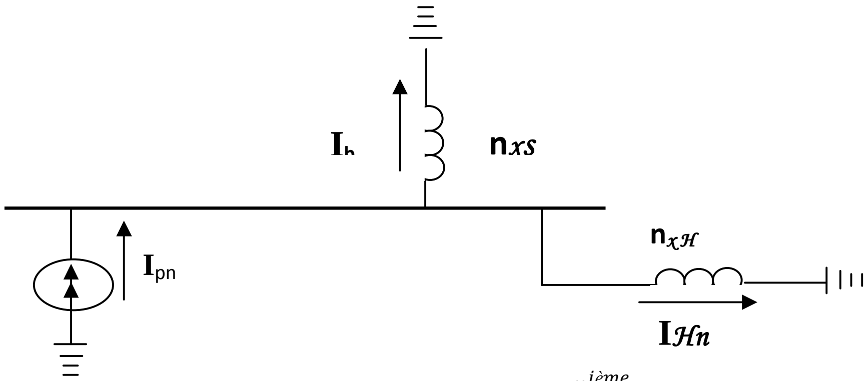

Figure III. 3. a- Schéma équivalent pour le régime $n^{ième}$ harmonique pour α c=αl

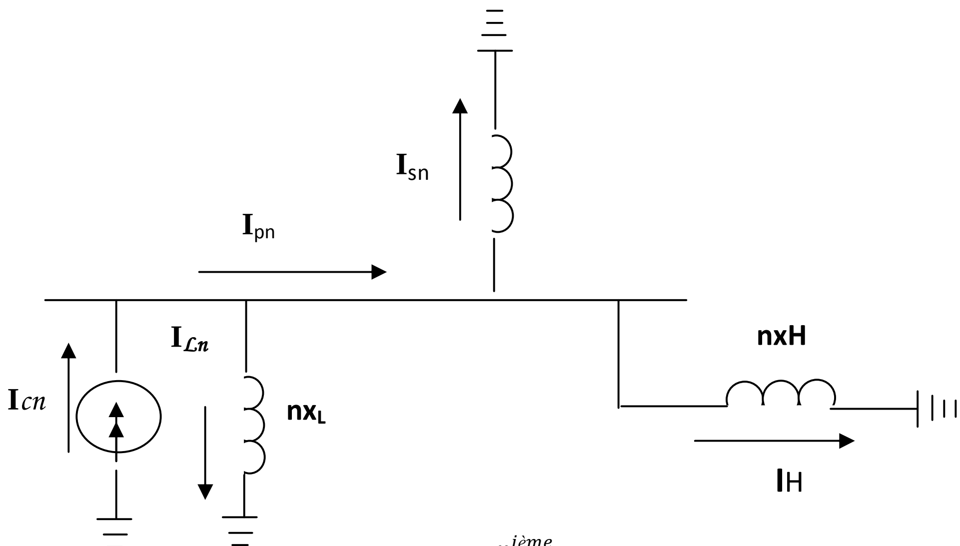

Figure III. 3. b- Schéma équivalent pour le régime $n^{ième}$ harmonique pour αl=0 et αc≠ 0

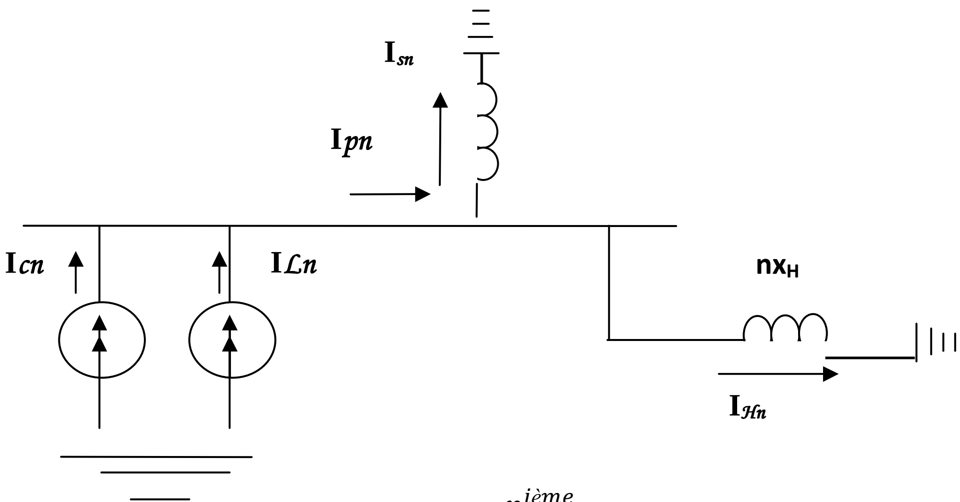

Figure III. 3. c- Schéma équivalent pour le régime $n^{ième}$ harmonique pour αl≠0 et αc≠ 0

Les rapports entre les puissances étant établis, on peut considérer les coefficients de non-sinusoïdalité du courant de charge pour différents régimes de fonctionnement du compensateur. Dans ce qui suit, on fera une analyse pour différents modes de réglage des courants dans les branches du compensateur. Plus précisément, le régime quand les deux branches sont réglables et que $\alpha_L = \alpha_C$; le régime quand une seule branche est réglable, $\alpha_L = 0$; $\alpha_C \neq 0$ et le régime quand les deux branches sont réglables mais avec un décalage de phase entre les angles $\alpha_L \neq \alpha_L \neq 0$; α_C étant en avance.

III.2 Analyse de la non-sinusoïdalité pour le régime $\boldsymbol{\alpha_L = \alpha_C}$:

Les expressions principales déterminantes le coefficient de non-sinusoïdalité du courant de charge, peuvent être déterminées, en se basant sur le diagramme linéaire, sur les expressions des courants et sur les schémas de principal et équivalent (fig III.2).

Par définition, on peut poser :

$$K_{NS\,(H)}^{i} = \frac{\sqrt{\sum_{3}^{11} I_{Hn}^{2}}}{I_{H1}} \qquad (III.4)$$

En ce référent aux schémas équivalents correspondants aux différents régimes (fig. III. 2,3 et 4) on peut écrire, pour le régime considéré,

Pour les grandeurs fondamentales,

$$I_{P1} = I_{C1} + I_{L1} = I_{CO} \,.\, a_{CI} + I_{LO} \,.\, a_{L1} \; \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots . (III.5)$$

où les courantsI_{C1}, et I_{L1} sont déterminée par les expressions $(II.13)$ et $(I.18)$. En remplaçant dans l'expression $(III.5)$

$$I_{CO} = j\frac{K_1 . K_{2C}}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2L})} . \frac{E}{X_S}$$

$$I_{LO} = -j\frac{K_1 . K_{2L}}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2L})} . \frac{E}{X_S}$$

On obtient

$$I_{P1} = j\frac{K_1(K_{2C} \ .a_{C1} - K_{2L} \ .a_{L1})}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2L})}\frac{E}{X_S} \ldots \ldots \ldots \ldots .(III.6)$$

La tension fondamentale du nœud aura donc peur expression,

$$U_1 = Eeq - jI_{P1} \ .Xeq = K_1 \ (E - jI_{P1} \ .X_S \ )$$

Et en tenant compte de $(III.6)$, on peut écrire :

$$U_1 = K_1 \left[\frac{K_1 \ (K_{2C} \ .a_{C1} - K_{2L} \ .a_{L1})}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2L})}\right].\mathrm{E} \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots (\mathrm{IIII}.7)$$

Ainsi on peut écrire pour le courant fondamental de la charge

$$I_{H1} = \frac{U_1}{jX_H} = -jK_1K_3\left[1 + \frac{K_1(K_{2C}.a_{C1} - K_{2L} \ .a_{L1}}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2L})}\right]\frac{E}{X_S} \ldots \ldots \ldots ..(\mathrm{III}.8)$$

De la même manière on peut procéder pour la détermination des grandeurs au niveau des harmoniques supérieurs. Ainsi, en se référent aux schémas équivalents correspondants aux harmoniques supérieurs, on peut trouver les paramètres.dui, régime considéré (fig II.5.a).

Le courant .du compensateur sur le $n^{ième}$ harmoniques, s'exprime :

$$\dot{I}_{Pn} = \dot{I}_{cn} + \dot{I}_{Ln} = \dot{I}_{co} \ .a_{cn} + I_{Lo} \ .a_{Ln}/n \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots ..(III.9)$$

ou bien en remplaçant Ico et I_{Lc}. par leurvaleurs,

$$I_{Pn} = j\frac{K_1\left(K_{2C}.a_{Cn} - K_{2L} \ .\frac{a_{L1}}{n}\right)}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2L})}\frac{E}{X_S}$$

D'autre part en partant de l'égalité,

$$I_{Hn}.Z_{Hn} = I_{Pn} \ .Z_{eqn}$$

Avec

$$Z_{eqn} = jn \ K_1 \ .X_S$$

$$Z_{Hn} = j \ n \ X_H$$

On peut trouver,

$$I_{Hn} = j\frac{K_1^2 \,.K_3}{1-K_1(K_{2C}-K_{2L})}\left[K_{2C}.\,a_{Cn}-K_{2L}\,.\frac{a_{L1}}{n}\right]\frac{E}{X_S}\ldots\ldots\ldots\ldots.(III.10)$$

Les expressions (III. 8) et (III. 10) permettent d'écrire :

$$K^i_{NS(H)} = \frac{\sqrt{\sum_3^{11}\left[\frac{K_{2C}}{K_{2L}}a_{Cn}-\frac{a_{Ln}}{n}\right]^2}}{\frac{1-K_1.K_2}{K_1\,.K_{2L}}+\left[\frac{K_{2C}}{K_{2L}}\;a_{c1}-a_{L1}\right]}\quad\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(\text{III}.11)$$

Ayant l'expression de $K^i_{(NS(H)}$, les rapports de puipsances définies par les coefficients $K^i_{N\,S\,(H)}$, l'intervalle de variation retenue de la puissance de charge ont peut remplir les tableaux de calcul

Tableaux (III.1à6) .Pour une puissance installée du compensateur constituant respectivement 5,10 et 20% de celle du système.

Conformément aux calculs réalisés on peut tracer les caractéristiques statiques de la non-sinusoïdalité du nœud .Ces dernières sont représentées, pour le régime considéré par les figures. III. 4, 5 et 6.

L'allure des courbes ainsi que les apparitions des extremums s'expliquent d'une manière simple. En se référant au travail [9], on peut dire que l'effet inductif croit dans le sens de $\pi/2$ vers 0, il atteint son maximum au voisinage de $\pi/6$, inversement l'effet capacitif croit dans le sens de 0 vers $\pi/2$ et atteint son maximum au voisinage de $5\pi/12$.

L'interaction de ces deux effets donne lieu aux courbes obtenues pour différents cas. Dans les cas considérés, l'effet inductif au niveau des harmoniques supérieures est plus grand que celui capacitif et diminue avec l'augmentation relative de la puissance installée de la branche capacitive.

k_2	0,5					0,05					0,05				
$x_H^* = \frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1	1,2	1,4	1,6	2	1	1,2	1,4	1,6	2	1	1,2	1,4	1,6	2
k_3	0,05	0,041	0,035	0,031	0,025	0,05	0,041	0,035	0,031	0,025	0,05	0,041	0,035	0,031	0,025
k_1	0,952	0,960	0,965	0,969	0,975	0,952	0,960	0,965	0,969	0,975	0,952	0,960	0,965	0,969	0,975
$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1.5					2					2.5				
k_{2L}	0.1					0.05					0.0333				
k_{2c}	0.15					0.1					0.0833				

Tableau III.1 Rapport des puissances des éléments du nœud $k_2 = 0.05$

k_2	0.10					0.1					0.1				
$x_{k_3}^{k_2} = \frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1	1.2	1.4	1.6	2	1	1.2	1.4	1.6	2	1	1.2	1.4	1.6	2
k_3	0.1	0.083	0.071	0.062	0.05	0.1	0.083	0.071	0.062	0.05	0.1	0.083	0.071	0.062	0.05
k_1	0.909	0.923	0.923	0.941	0.952	0.909	0.923	0.923	0.941	0.952	0.909	0.923	0.923	0.941	0.952
$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1.5					2					2.5				
k_{2L}	0.2					0.1					0.066				
k_{2c}	0.3					0.2					0.166				

Tableau III.2 Rapport des puissances des éléments du nœud $k_2 = 0.1$

k_2	0.2					0.2					0.2				
$x_H^* = \frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1	1.2	1.4	1.6	2	1	1.2	1.4	1.6	2	1	1.2	1.4	1.6	2
k_3	0.2	0.16	0.14	0.12	0.1	0.2	0.16	0.14	0.12	0.1	0.2	0.16	0.14	0.12	0.1
k_1	0.83	0.86	0.87	0.89	0.90	0.83	0.86	0.87	0.89	0.90	0.83	0.86	0.87	0.89	0.90
$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1.5					2					2.5				
k_{2L}	0.4					0.2					0.1333				
k_{2c}	0.6					0.4					0.3333				

Tableau III.3 Rapport des puissances des éléments du nœud $k_2 = 0.2$

$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	XH*	α	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1.5	1	k_{N5}	0	0.0120	0.0147	0.0116	0.064	0.00638	0
	2		0	0.0124	0.0156	0.0114	0.0056	0.0065	0
2	1		0	0.0058	0.0072	0.0055	0.0274	0.0031	0
	2		0	0.0059	0.0074	0.0056	0.0028	0.0032	0
2.5	1		0	0.0038	0.0047	0.0036	0.0018	0.00212	0
	2		0	0.0039	0.0049	0.0037	0.0018	0.0021	0

Tableau III. 4. Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge k2= 0.05 et αl=αc

$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	XH*	α	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1.5	1	k_{N5}	0	0.026	0.0307	0.0227	0.0107	0.0127	0
	2		0	0.0276	0.0325	0.0239	0.0116	0.0134	0
2	1		0	0.120	0.0147	0.011	0.0055	0.0063	0
	2		0	0.127	0.0155	0.0117	0.0057	0.0067	0
2.5	1		0	0.0077	0.0096	0.0073	0.0036	0.0042	0
	2		0	0.0082	0.0101	0.0077	0.0038	0.0044	0

Tableau III.5. Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge k2= 0.1 et αl=αc

$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	XH*	α	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1.5	1	k_{N5}	0	0.0615	0.071	0.0472	0.022	0.025	0
	2		0	0.0704	0.0754	0.0524	0.0247	0.0282	0
2	1		0	0.026	0.030	0.027	0.011	0.0127	0
	2		0	0.0340	0.340	0.0280	0.0121	0.0140	0
2.5	1		0	0.016	0.0199	0.0149	0.0073	0.0085	0
	2		0	0.0182	0.0219	0.0164	0.0080	0.0093	0

Tableau III.6. Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge k2= 0.2 et αl=αc

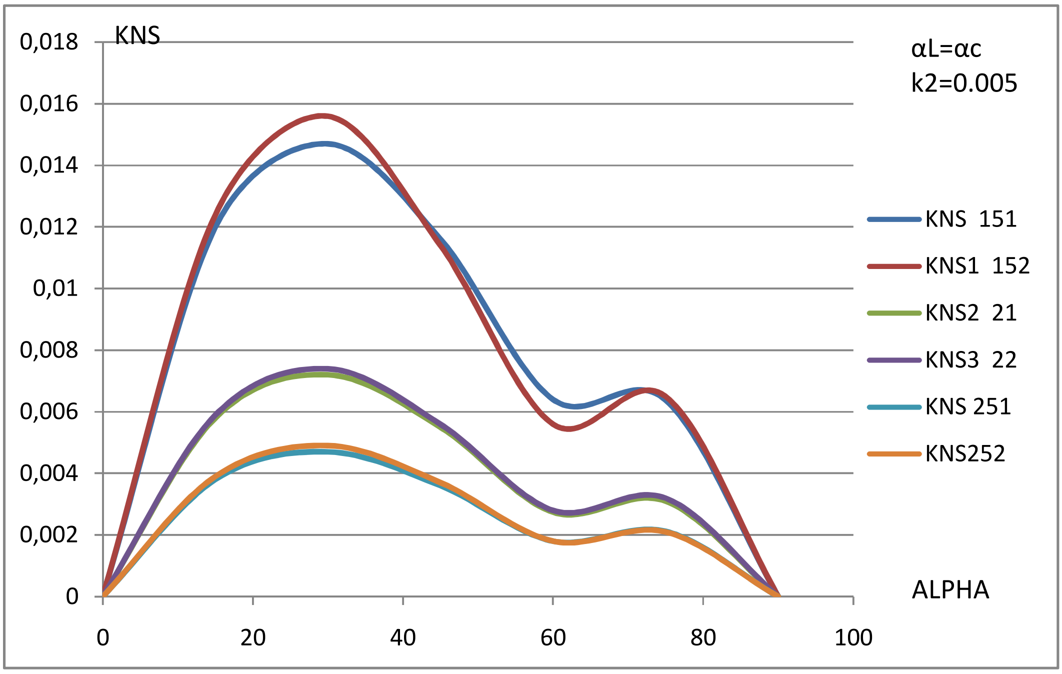

Figure III.4. Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge k2= 0.05 et αl=αc

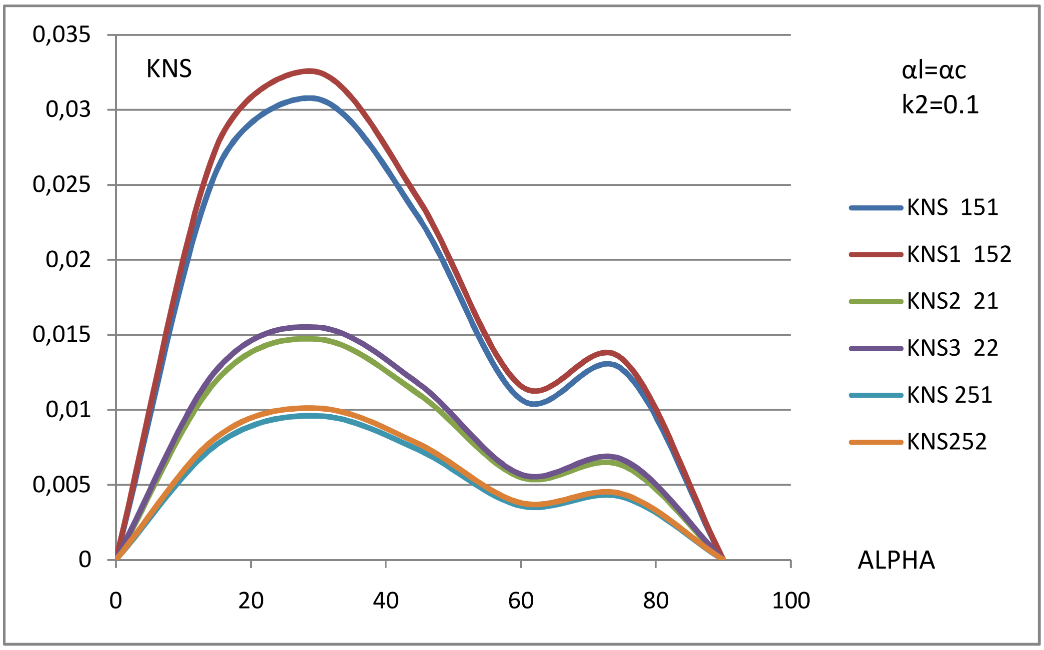

Figure III.5. Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge k2= 0.1 et αl=αc

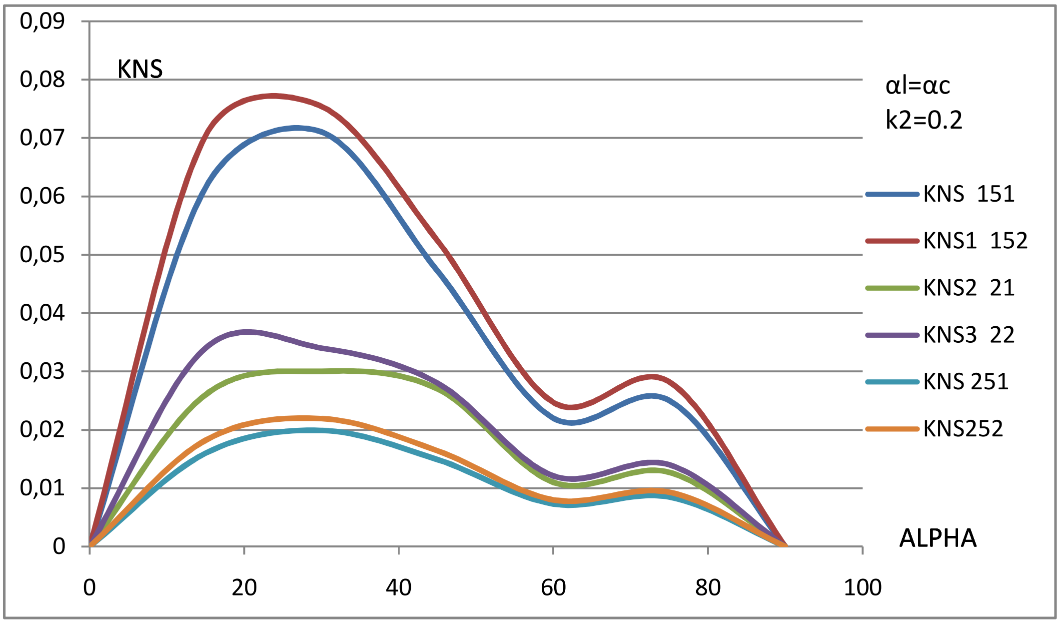

Figure III.6. Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge k2= 0.2 et αl=αc

L'allure des courbes ainsi que les apparitions des extremums s'expliquent d'une manière simple, on peut dire que l'effet inductif croit dans le sens de $\pi/2$

Aussi l'observation des courbes montre que le régime de réglage quand αl=αc des branches du compensateur (réglage synchronisé) peut obtenir un effet compensatoire important de la non-sinusoïdalité du courant, contrairement au régime dans le cas où l'une des branches est absente.

Cette analyse permet de fixer immédiatement et d'une manière préliminaire pour le régime considéré $\alpha_L = \alpha_C$, la zone dans laquelle le K_{NS} s est plus faible possible. Ce dernier est obtenu quand :

$\alpha = \frac{13\,\pi}{48} \div \frac{5\,\pi}{12}$; et pour $\frac{K_{2C}}{K_{2L}}$ variant dans le sens de l'augmentation

III.3 Analyse de la non sinsoidalité quand $\boldsymbol{\alpha_L = 0\ et\ \alpha_C \neq 0}$

Nous avons par définition :

$$K^{i}_{NS\,(H)} = \frac{\sqrt{\sum_{3}^{11} I^{2}_{Hn}}}{I_{H1}}$$

Toujours en se basant sur le diagramme linéaire et sur les schémas de principe et équivalents (figure.III.2.b), on peut écrire que dans l'intervalle $(0 \div \alpha_c)$ le courant dans la branche capacitif du compensateur est nul$I_c = 0$, mais$I_L \neq 0$. La tension du nœud correspondrait alors a la valeur :

$$u = \sqrt{2}\, U_0 \, cos\, wt$$

Du schéma équivalent correspondant, il découle que,

$$U_{(1)} = E_{eq} - j\, I_{C1}\, .X_{eq} = K_{(1)}\, (E - JI_{C1}\, .X_S) \dots\dots\dots\dots\dots (III.12)$$

Avec :

$$K_{(1)} = \frac{K_1}{1 + K_1.\; K_{2L}}$$

$U_{(1)}$: Valeur efficace de la tension fondamentale du nœud dans le régime considéré.

$$U_{(1)} \neq U_1$$

Sachant que le courant fondamental dans la réactance X_c est :

$$I_{C1} = +jI_{C0}\, a_{C1} = I_{C0} a_{C1}$$

On peu écrire,

$$U_{(1)} = K_{(1)}(E - \; jI_{C0} + a_{C1})$$

Ce qui donnera après transformation,

$$U_{(1)} = K_{(1)} \left[1 + \frac{k_1\, K_{2C}\, a_{C1}}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2CL}}\right] E \dots\dots\dots\dots\dots (III.13)$$

Cette tension appliquée à la branche de la charge engendrera un courant égal,

$$I_{H1} = \frac{U_{(1)}}{jX_H} = -jK_{(1)}K_3 \left[1 + \frac{k_1\, K_{2C}\, a_{C1}}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2CL}}\right] \frac{E}{X_H} \dots\dots\dots\dots (III.14)$$

Du schéma équivalent (fig. II. 5.b), il découle que le courant résultant du nième harmonique dans la charge peut être exprimé comme suit :

$$I_{Hn} = I_{Cn}\frac{Z_{eqn}}{Z_{Hn}} = \frac{j_n K_{(1)} X_S}{j_n \, . \, X_H} \, . I_{Cn} = K_{(1)} . \; K_3 . \; I_{Cn}$$

Ou bien tenant compte que $I_{Cn} = I_{CO} \, . a_{Cn}$,

$$I_{Hn} = j\frac{K_1 . K_{(1)} . \;\; K_{2C} \, . K_3}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2CL})} \; . \;\; a_{Cn} \;\; . \;\; \frac{E}{X_S} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots .. (III.15)$$

En valeur relative.

$$I_{Hn}^{*} = j\frac{K_1 . K_{(1)} . \;\; K_{2C} \, . K_3}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2CL})} \; . \;\; a_{Cn} \;\; \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots .. (III.16)$$

Où Z_{eqn} se détermine comme suit :

$$\frac{1}{Z_{eqn}} = \frac{1}{j_{nxH}} + \frac{1}{j_{nxs}} + \frac{1}{j_{nxl}}$$

Et $Z_{eqn} = j_n \, . \; K_{(1)} . X_S \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (III.17)$

Ainsi on peut exprimer après quelques transformations trigonométriquesK_{NS}.

$$K_{NS(H)}^{i} = \frac{\sqrt{\sum_{3}^{11}\left[\frac{K_{2C}}{K_{2L}} a_{Cn}\right]^2}}{\left[\frac{1}{K_1 . K_{2L}} - \frac{K_{2C}}{K_{2L}} + \frac{K_{2C}}{K_{2L}} \, . a_{c1}\right]} \qquad (III.18)$$

k_2	0,05					0,05					0,05				
XH*=k2/k3	1	1,2	1,4	1,6	2	1	1,2	1,4	1,6	2	1	1,2	1,4	1,6	2
k_3	0,05	0,041	0,035	0,031	0,025	0,05	0,041	0,035	0,031	0,025	0,05	0,041	0,035	0,031	0,025
k_1	0,95		0,96		0,97	0,95		0,96		0,97	0,95		0,96		0,97
$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1.5					2					2.5				
k_{2L}	0.1					0.05					0.0333				

k_{2c}	0.15	0.1	0.0833

Tableau III.7 Rapport des puissances du nœud pendant le processus de réglage, αl≠ 0 et αc= 0

k_2	0.2					0.2					0.2				
XH*=k2/k3	1	1.2	1.4	1.6	2	1	1.2	1.4	1.6	2	1	1.2	1.4	1.6	2
k_3	0.2	0.16	0.14	0.12	0.1	0.2	0.16	0.14	0.12	0.1	0.2	0.16	0.14	0.12	0.1
k_1	0.83		0.87		0.90	0.83		0.87		0.90	0.83		0.87		0.90
$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1.5					2					2.5				
k_{2L}	0.4					0.2					0.1333				
k_{2c}	0.6					0.4					0.3333				

Tableau III.8 Rapport des puissances du nœud pendant le processus de réglage, αl≠ 0 et αc≠ 0

$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	XH*	α	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1.5	1	k_{N5}	0	0.045	0.0305	0.0318	0.066	0.062	0
2	1		0	0.0308	0.0205	0.0211	0.044	0.0413	0
2.5	1		0	0.0257	0.0171	0.0178	0.0368	0.035	0

Tableau III.9 Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge, αl= 0 et αc≠ 0 et k2=0.05

$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	XH*	α	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1.5	1	k_{N5}	0	0.161	0.107	0.111	0.231	0.218	0
2	1		0	0.112	0.074	0.076	0.161	0.150	0
2.5	1		0	0.096	0.064	0.067	0.138	0.133	0

Tableau II.10 Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge, αl= 0 et αc≠ 0 et k2=0.2

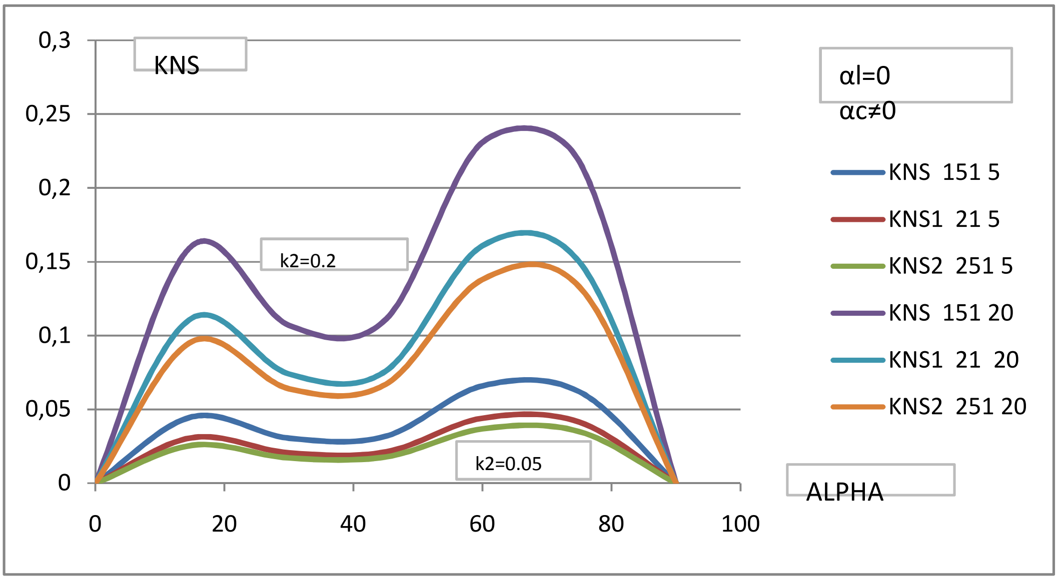

Figure. III.9. Caractéristiques statiques du coefficient de non sinusoidalité du courant, αl= 0 et αc≠ 0

Les valeurs pour $K_{ns(H)}$ pour les différents rapports donnés sont reportés dans les tableaux de calcul, tableaux (III. 9, III. 10***)***, leur graphique en fonction de α sont représentés par la figure III.9.

On a considéré le régime quand seule la branche capacitive est réglable $(\alpha_L = 0)$, on peut voir que les courbes du coefficient K_{NS} ont une allure différente de celles des courbes obtenues précédemment.

Ici, on peut immédiatement remarquer sur le graphique (figure. III.9) pour les mêmes cas de variation relative des puissances installées du nœud, l'effet déterminant de la capacité sur le K_{NS} du courant de la charge.

En effet dans la zone à influence capacitive le K_{NS} dépasse largement 20 % tandis que dans la zone à influence inductive, il atteint au maximum environ 16 %. Dans l'intervalle$\alpha =$

$\frac{\pi}{6} \div \frac{\pi}{4}$ séparant ces deux zones, le K_{NS} est minimum possible, il est pratiquement constant.

On peut dire, en remarque, que en l'absence du réglage d'une branche ; le K_{NS} augmente considérablement d' où la confirmation du fait carpensateur dans le régime précédent.

Les remarques faites précédemment pour le régime $\alpha_L = \alpha_C$ restent en vigueur pour le régime qu'on considère, sauf que pour ce dernier, les valeurs de $K_{NS\,(\alpha)}$ sont relativement plus grandes par rapport au précédent.

Cependant dans la zone $\alpha = \frac{\pi}{6} \div \frac{\pi}{4}$ les valeurs de K_{NS} restent admissibles.

III. 4 Analyse de la non-sinusoïdalité quand $\alpha_L \neq \alpha_C \neq 0$:

Pour ce régime on utilise les mêmes expressions correspondantes au régime quand $\alpha_L = \alpha_C$, mais avec la condition que les valeurs a_{cn} d'un côté et les valeurs $a_{L\,n}$ de l'autre, doivent être prises pour des angles différents et correspondants au régime donné, dans ce cas at. étant inférieur à α_C ($\alpha_L < \alpha_C$).

Par exemple on peut considérer le régime suivant :

N°	1	2	3	4	5	6	7
α_L	0	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{12}$	$\frac{\pi}{2}$
α_C	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{12}$	$\frac{\pi}{2}$	0

Pour la colonne N°2 correspondante au régime $\alpha_L = 0$ et $\alpha_C = \frac{\pi}{12}$, on peut prendre les points déterminés dans le cas du régime $\alpha_L = 0$, $\alpha_C \neq 0$ (quand $\alpha_C = \frac{\pi}{12}$).

k_2	0,05					0,05					0,05				
XH*=k2/3	1	1,2	1,4	1,6	2	1	1,2	1,4	1,6	2	1	1,2	1,4	1,6	2
k_3	0,05		0,035		0,025	0,05		0,035	0,031	0,025	0,05		0,035		0,025
k_1	0,95		0,96		0,97	0,95		0,96		0,97	0,95		0,96		0,97
$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1.5					2					2.5				
k_{2L}	0.1					0.05					0.0333				
k_{2c}	0.15					0.1					0.0833				

Tableau III.11 Rapport des puissances du nœud pendant le processus de réglage, αl≠0 et αc≠ 0et k2=0.05

k_2	0.2					0.2					0.2				
XH*=k2/3	1	1.2	1.4	1.6	2	1	1.2	1.4	1.6	2	1	1.2	1.4	1.6	2
k_3	0.2	0.16	0.14	0.12	0.1	0.2	0.16	0.14	0.12	0.1	0.2	0.16	0.14	0.12	0.1
k_1	0.83	0.86	0.87	0.86	0.90	0.83	0.86	0.87	0.86	0.90	0.83	0.86	0.87	0.89	0.909
$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	1.5					2					2.5				
k_{2L}	0.4					0.2					0.1333				
k_{2c}	0.6					0.4					0.3333				

Tableau III.12 Rapport des puissances du nœud pendant le processus de réglage, αl≠0 et αc≠ 0 et k2=0.2

—	XH*	α	—					0
1.5	1			0.0615	0.067	0.0472	0.022	0.025	
2	1			0.112	0.026	0.0307	0.0227	0.0110	
2.5	1			0.0164	0.019	0.0149	0.0073	0.0085	

Tableau III.13. Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge, αl≠0 et αc≠ et k2=0.2

—	XH*	α							0
1.5	1			0.0115	0.014	0.0106	0.0052	0.0061	
2	1			0.0058	0.0072	0.055	0.027	0.032	
2.5	1			0.025	0.0171	0.0178	0.0368	0.0355	

Tableau III.14. Caractéristiques de non-sinusoidalité du courant de charge, αl≠0 et αc≠ et k2=0.05

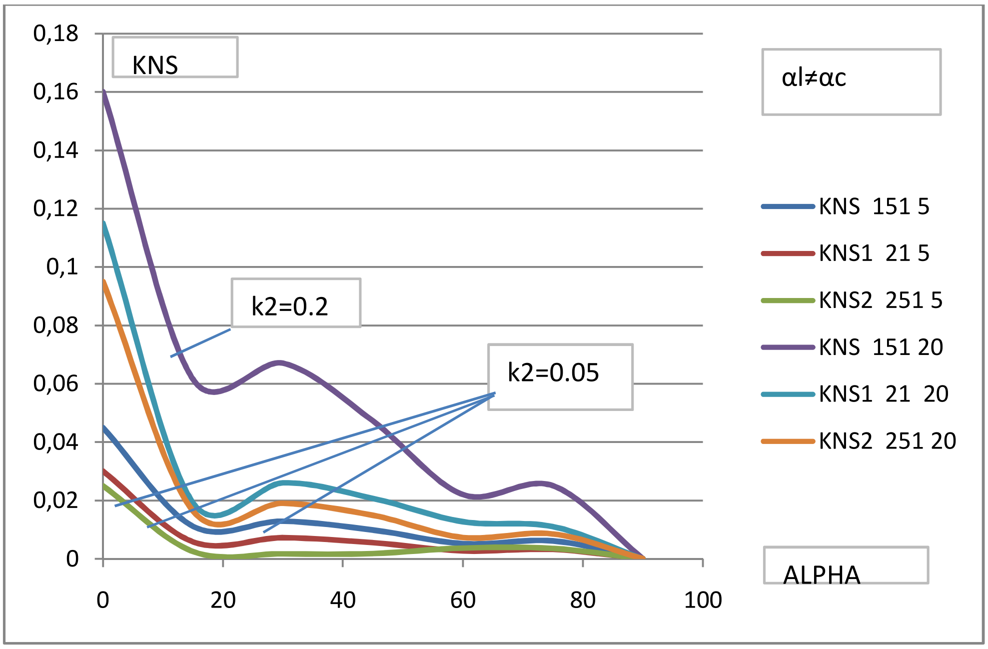

Figure. III.10. Caractéristiques statiques du coefficient de non sinusoidalité du courant, αl ≠ et αc≠ 0

Les courbes obtenues dans ce cas, quand $\alpha_L \neq 0$; $\alpha_C \neq 0$, ont une allure intéressante , dans l'ensemble les courbes se rapprochent de celles obtenues pour le régime $\alpha_L = \alpha_C$, mais les valeurs de K_{NS} sont plus inférieures à celles correspondantes à ce dernier régime.

Cette diminution est dûe au fait que , quand le thyristor ouvre la branche capacitive, le courant dans cette dernière variant par saut à cet instant, est amorti par le courant qui circule déjà dans la branche capacitive($\alpha_L < \alpha_C$,). L'effet contraire est obtenu pour la tension, quand le circuit de l'inductance se ferme la tension dans le nœud varie brusquement et comme à cet instant le circuit de la capacité est ouvert, l'effet compensatoire est alors absent, ce qui a pour effet d'augmenter le K_{NS} de la tension.

D'autre part pour réaliser le régime de réglage désynchronisé, il est nécessaire d'avoir deux blocs de commande.

De ces considérations, il découle que le régime le plus convenable serait celui quand $\alpha_L = \alpha_C$ qui, dans tous les cas de réglage et quand ($0 \div \frac{\pi}{2}$), donne un K_{NS} du courant de la charge admissible.

Ainsi pour les analyses qui vont suivre, on retiendra le régime correspondant à $\alpha_L = \alpha_C$.

Habituellement quand on représente la branche non linéaire comme source de courant, pendant les analyses on ne cherche qu'à évaluer la non-sinusoïdalité du courant dans les branches.

En effet les courants générés par ces sources vont circuler dans les différentes branches du système en provoquant des pertes actives et en déformant les courbes instantanées des paramètres du régime. Il est donc nécessaire d'évaluer le taux de non-sinusoïdalité correspondant. Pour cette raison, dans ce paragraphe, on s'est particulièrement intéressé à l'analyse du courant. Cependant on peut faire également des remarques de la non-sinusoïdalité de la tension.

Il est nécessaire de préciser que les calculs et par conséquent les courbes d'évaluation restent très approximatifs puisque pour évaluer d'une manière juste le K_{NS} de la tension, on doit déterminer le contenu harmonique de la courbe instantanée non linéaire de la tension dans ce nœud (figure.lII 2.a).

Ainsi dans le cas considéré, on détermine le $n^{ième}$ harmonique de la tension dans ce nœud, canne le produit du courant du $n^{ième}$ harmonique d'une branche parallèle par la réactance correspondante par exemple si le courant du nième harmonique dans la branche de la charge est connu, on peut écrire :

$$U_{\ n} = \ jI_{Hn} \, . X_{Hn} \ = \ j_n \, . I_{Hn} \, . X_H$$

Ou bien d'une autre manière :

$$U_{\ n} = \ jI_{pn} \, . X_{eqn} \ = \ j_n \, . I_{pn} \, . X_{eq}$$

Avec :

$$I_{pn} \ = I_{Cn} \ + \ I_{Ln} \ = \ J \ \frac{K_1}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2L})} \left(K_{2C} \ a_{Cn} - \ K_{2L} \ \frac{a_{Ln}}{n} \right) \frac{E}{X_S}$$

Alors :

$$U_n \ = - \ \frac{K_1^2}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2L})} \left(K_{2C} \ a_{Cn} - \ K_{2L} \ \frac{a_{Ln}}{n} \right) \frac{E}{X_S}$$

Sachant que :

$$U_1 \ = K_1 \left[1 + \ \frac{K_1(K_{2C} \ a_{C1} - \ K_{2L} a_{L1})}{1 - K_1(K_{2C} - K_{2L})} \right] . E$$

Par conséquent le coefficient K_{NS} de la tension s'exprime :

$$K_{NS}(U) = \frac{\sqrt{\sum_3^{11} U_{\ n}^{\ 2}}}{U_1} = \frac{\sqrt{\sum_3^{11} U^{\ 2} \left[\frac{K_{2C}}{K_{2L}} a_{cn} - \frac{a_{Ln}}{n} \right]}}{\frac{1 - K_1 . K_2}{K_1 \, . K_{2L}} + \left[\frac{K_{2C}}{K_{2L}} a_{C1} - a_{L1} \right]} \dots \dots . . (III.19)$$

Ayant l'éxpressior1 de$K_{NS(U)}$, les rapports de Puissance définis par les coefficients ${K_{NS(H)}}^{(u)}$, l'intervalle de variation retenu de la Puissance de la charge, on peut remplir les tableaux de calcul tableaux (III. 15, III. 16), pour une Puissance installée du compensateur constituant respectivement 10 et 20% de celle du système.

Les courbes donnant le coefficient de non-sinusoïdalité sont représentées par les figure. III. 11, III. 12 conformément à la dernière équation, on a considéré les cas où K_2 = 10 et 20%, pour une variation du rapport K_{2C}/K_{2L} allant de 1, 5 à 4.

On peut constater, à partir des courbes, que ${K_{NS}}^{(U)}$ est relativement très élevé, et il est autant plus élevé que K_2 augmente K_{2C}/K_{2L} diminue.

Le ${K_{NS}}^{(U)}$ atteint ses valeurs maximales dans la bande $a = \pi/6 \div \pi/4$ et quand la puissance installée du compensateur constitue 10% de celle du réseau, avec $K_{2C}/K_{2L} > 3 \div 4$.

On peut dire que le diapason le plus convenable pour le réglage est délimité par : $a = 7\pi/48 \div \pi/4$

$\frac{k_{2c}}{k_{2L}}$	XH*	α	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1.5	1	k_{N5}	0	0.4815	0.3274	0.3599	0.4917	0.636	0
	2		0	0.5031	0.3416	0.3754	0.5136	0.6665	0
2	1		0	0.3210	0.2196	0.2484	0.3402	0.4293	0
	2		0	0.3358	0.229	0.2598	0.3562	0.4505	0
2.5	1		0	0.26320	0.1798	0.2068	0.2831	0.3543	0
	2		0	0.2753	0.1881	0.2163	0.2973	0.3718	0
3	1		0	0.237	0.162	0.188	0.258	0.321	0
	2		0	0.248	0.169	0.197	0.271	0.337	0
4	1		0	0.189	0.128	0.151	0.208	0.256	0
	2		0	0.205	0.139	0.164	0.226	0.279	0

Tableau. III. 15. Caractéristiques de la non sinusoidalité de la tension, quand k2=0.1

——	XH*	α	0						0
1.5	1		0	0.8446	0.5600	0.6136	0.8594	1.171	0
	2		0	0.9076	0.5992	0.6561	0.9229	1.2692	0
2	1		0	0.5731	0.3873	0.439	0.6148	0.806	0
	2		0	0.6192	0.4177	0.4793	0.666	0.8807	0
2.5	1		0	0.4115	0.3240	0.3741	0.5244	0.6779	0
	2		0	0. 5156	0.3493	0.4037	0.5680	0.7391	0
3	1		0	0.429	0.291	0.340	0.477	0.612	0
	2		0	0.464	0.314	0.368	0.518	0.660	0
4	1		0	0.376	0.255	0.302	0.425	0.539	0
	2		0	0.407	0.276	0.328	0.462	0.590	0

Tableau. III. 16. Caractéristiques de la non sinusoidalité de la tension, quand k2=0.2

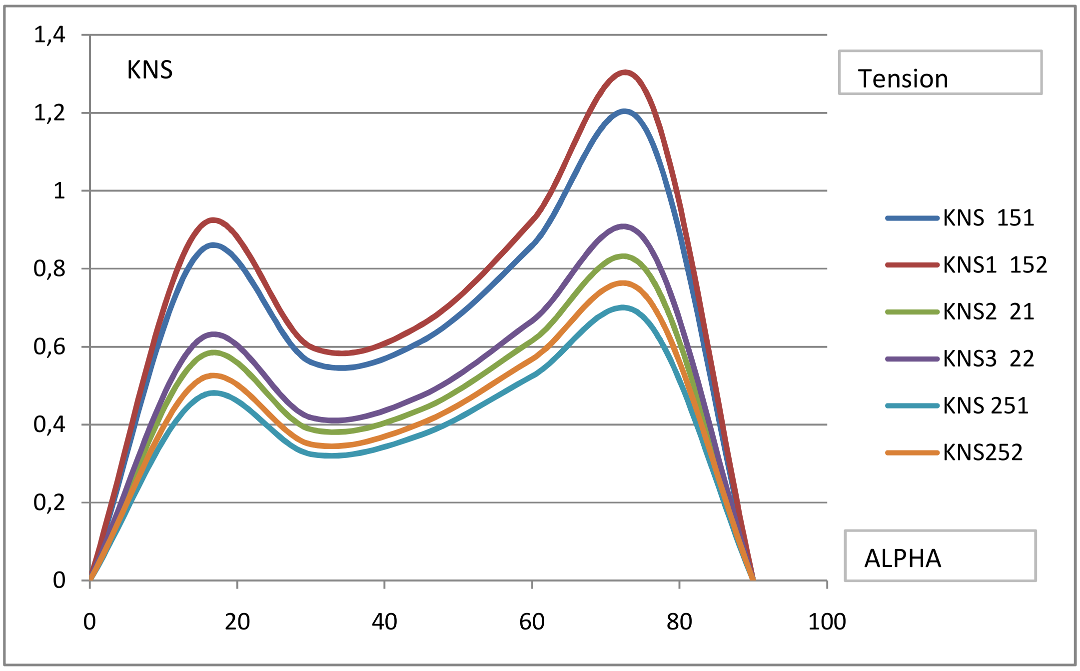

Figure III. 11.a- Caractéristiques de la non sinusoidalité de la tension en fonction de α: αl=αc et k2=0.1

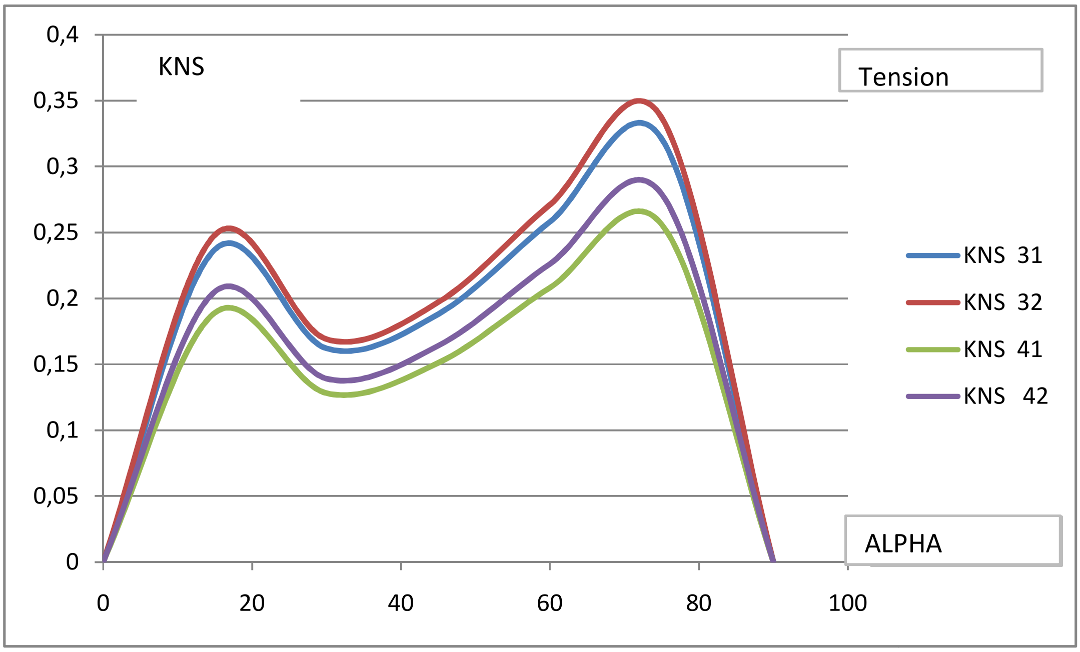

Figure III. 11.b- Caractéristiques de la non sinusoidalité de la tension en fonction de α: αl=αc et k2=0.1

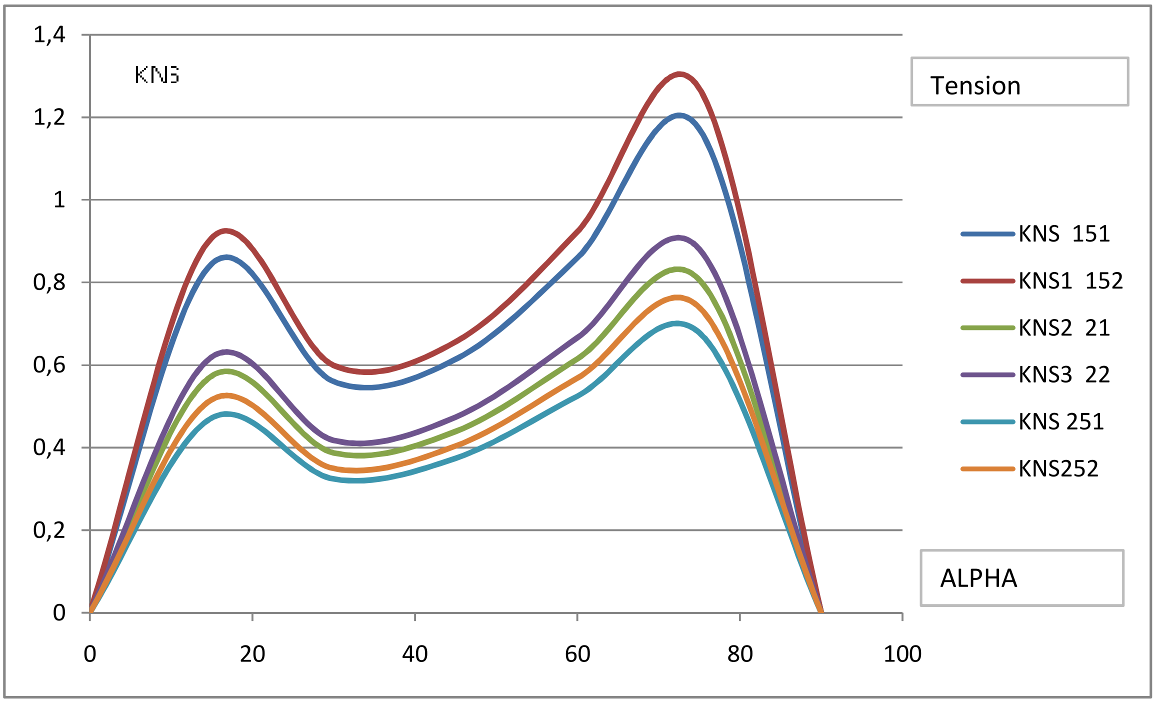

Figure III. 12.a- Caractéristiques de la non sinusoidalité

de la tension en fonction de α: αl=αc et k2=0.2

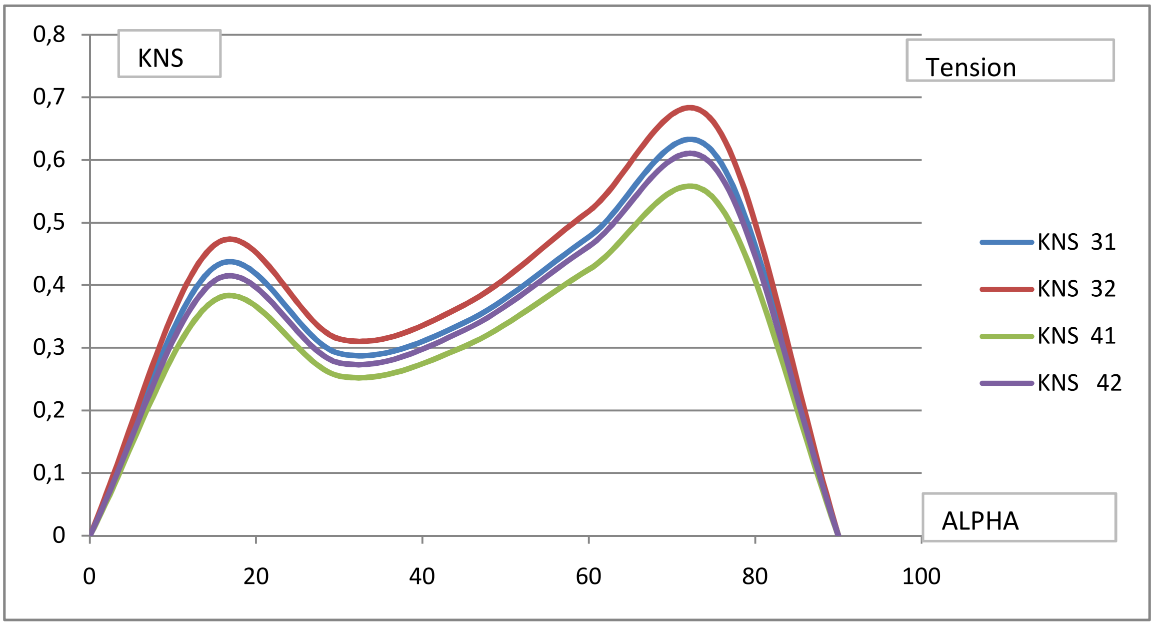

Figure III. 12.b- Caractéristiques de la non sinusoidalité

de la tension en fonction de α: αl=αc et k2=0.2

Conclusion

On peut donc déduire, si l'on prend en considération l'aspect très approximatif de ${K_{NS}}^{(U)}$, que 10 intervalle de réglage du compensateur est dans une première étape, limité par le contenu harmonique de la tension ; puisque pour le courant le réglage peut s'effectuer théoriquement sur tout l'intervalle $\alpha = 0 \div \pi/2$.

Chapitre IV

Détermination de la balance de la puissance réactive dans le nœud

Introduction

Dans les nœuds des réseaux électriques alimentant des consommateurs de grande puissance, on est souvent appelé à installer des sources de puissance réactive pour assurer un équilibre de cette dernière correspondant à une tension donnée ; on désigne ça par balance de la puissance réactive. Les éléments branchés peuvent être à caractère linéaire où non linéaire ; et présentent des fois une non-sinusoïdalité inadmissible. Dans ce dernier cas, en règle générale, pendant les analyses des caractéristiques du nœud la tension de calcul est considérée par supposition sinusoïdale de valeur efficace égale à celle de la tension réelle non-sinusoïdale.

IV. 1 Caractéristiques nodales du modèle étudié.

Dans ce chapitre on s'intéresse au cas dans lequel on doit, au contraire, tenir compte du fait que la tension est non-sinusoïdale, et rechercher le rôle joué par les harmoniques supérieurs dans la balance de la puissance réactive. Pour ce faire, on -a choisi le modèle d'un système, comportant une charge linéaire Zn=R+ j XH; et une SPR (source de puissance réactive) statique à thyristors à réglage continu (figure.III.1) .Les schémas équivalents de ce modèle et les régimes de réglage retenus pour l'analyse ont été choisis et exposés dans le chapitre précedent. La recherche est orientée particulièrement vers la détermination et l'analyse des caractéristiques de la balance de la puissance réactive, en présence des harmoniques, autrement dit en l'absence des filtres ; ceci pour faire apparaître au clair, l'apport des harmoniques supérieurs dans la balance.

IV - 2. Balance de la puissance réactive sur le fondamentale (sans harmoniques).

IV -2.1 Paramètres équivalents

En se référent au schéma du modèle et aux expressions obtenu dans le deuxième chapitre, on peut déterminer les paramètres du système et du régime considéré (Fig. III.2.a).

Ainsi l'impédance équivalente s'obtient comme suit :

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_S} + \frac{1}{Z_H} = \frac{1}{jX_S} + \frac{1}{r_H + jX_H}$$

Ou bien :

$$Z_{eq} = \frac{-X_S X_H + j r_H X_S}{r_H + j(X_H + X_S)}$$

$$= \frac{r_H {X_S}^2 + j[{r_H}^2 + X_H(X_H + X_S)]X_S}{{r_H}^2 + (X_H + X_S)^2} = r_{eq} + jX_{eq} \dots\dots\dots\dots.. (\mathrm{IV}.1)$$

Où

$$r_{eq} = \frac{r_H {X_S}^2}{{r_H}^2 + (X_H + X_S)^2} \dots\dots\dots\dots\dots \qquad (\mathrm{IV}.2)$$

$$X_{eq} = \frac{{r_H}^2 + X_H(X_H + X_S)X_S}{{r_H}^2 + \ (X_H + X_S)^2} \dots\dots\dots \qquad (\mathrm{IV}.3)$$

L'impédance équivalente peut, être mise sous une autre forme ; en effet en multipliant et en divisant l'expression $(\mathrm{IV}.1)$ par ${X_S}^2$; on obtient,

$$Z_{eq} = \frac{\frac{r_H}{X_S} + j\left[\frac{{r_H}^2}{{X_S}^2} + \frac{X_H}{{X_S}^2}(X_H + X_S)\right]}{\frac{{r_H}^2}{{X_S}^2} + \left(\frac{X_H + X_S}{X_S}\right)^2} X_S$$

$$= \left(K_1{}' + jK_1{}''\right)XS \dots\dots \qquad (\mathrm{IV}.4)$$

où , $K_1 \ = \ K_1{}' \ + \ jK_1{}''$ - coefficient sans dimension.

De ce fait, il vient que :

$$r_{eq} = K_1{}' \ \ X_S$$

$$X_{eq} = K_1'' \ X_S$$

Pour montrer les effets dus a la puissance réactive il est suffisant de considérer uniquement le processus d'échange ; c à- d supposer que dans le nœud, il n'y a qu'un échange de l'énergie réactive uniquement. Cette état peut être obtenu si l'on supposé que la résistance de la charge est nulle, $r_H = 0$. Ceci permettra en plus de faciliter les calculs et de rendre plus apparents les effets de réglage. Dans ces conditions il vient que :

$K_1 \ = \ K_1' + \ jK_1'' = j\ K_1$ avec $K_1{}' = 0$

D'où :

$$r_{eq} = 0 \qquad ; \qquad X_{eq} = K_1 X_S$$

Dans ces mêmes conditions la force électromotrice équivalente du système serait :

$$E_{eq} = \frac{\frac{E}{jX_S}}{\frac{1}{jK_1 X_S}} = \frac{E . jK_1 X_S}{jX_S} = K_1 E \dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad .(\mathrm{IV}.5)$$

IV.2. 2 Détermination des paramètres du régime du compensateur :

En se référent au schéma (fig. III. 1), au diagramme linéaire (figure. II. 2. C), les tensions fondamentales aux bornes des éléments réglés, et les courants correspondants se déterminent comme suit,

Pour l'inductance :

$$U_{L1} = U_0 . a_{L1}$$

$$I_{L1} = I_{L0} . a_{L1}.$$

Avec

$$I_{L0} = -j \frac{K_1 . K_{2L}}{1 - K_1 (K_{2C} - K_{2L})} . \frac{E}{XS}$$

Alors

$$U_{L1} = \frac{K_1 . a_{L1}}{1 - K_1 (K_{2C} - K_{2L})} E \dots\dots\dots\dots\dots\dots.. \qquad (\mathrm{IV}.6)$$

Et

$$I_{L1} = -j \frac{K_1 . K_{2L} . a_{L1}}{1 - K_1 (K_{2C} - K_{2L})} . \frac{E}{X_S} \dots\dots\dots\dots\dots\dots.. \qquad (\mathrm{IV}.7)$$

Pour la batterie de condensateurs :

$$U_{c1} = U_0 . a_{C1}$$

$$I_{c1} = I_{c\,0} . a_{C1}$$

Avec

$$I_{c\,0} = \frac{K_1\,.K_{2L}}{1 - K_1\,(K_{2C} - K_{2L})}.\frac{E}{X_S}$$

Alors

$$U_{C1} = U_C\,.a_{C1} = \frac{K_1\,.\quad a_{C1}}{1 - K_1\,(K_{2C} - K_{2L})}\,E \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad ..(\mathrm{IV}.8)$$

Et

$$I_{c1} = -j\frac{K_1\,.K_{2c}\,.a_{c1}}{1 - K_1\,(K_{2C} - K_{2L})}.\frac{E}{X_S}\dots\dots\dots\dots\dots\dots.. \qquad (\mathrm{IV}.9)$$

Où

$$U_0 = \frac{K_1}{1 - K_1\,(K_{2C} - K_{2L})}.E$$

U_0- tension du nœud quand $\alpha = 0$

Les paramètres du régime fondamental de la charge s'expriment comme suit :

Par définition :

$$I_{H1} = \frac{U_H}{j\quad X_H}$$

Alors :

$$U_1 = K_1\left[1 + \frac{K_1\,(\,K_{2c}\,.a_{c1} - K_{2L}\,.a_{L1})}{1 - K_1\,(K_{2C} - K_{2L})}\right].\dots\dots\dots\dots\dots\dots. \qquad (\mathrm{IV}.10)$$

Alors

$$I_{H1} = -jK_1K_3\left[1 + \frac{K_1\,(\,K_{2c}\,.a_{c1} - K_{2c}\,.a_{L1})}{1 - K_1\,.(K_{2C} - K_{2L})}\right].\dots\dots\dots\dots\dots\dots..(\mathrm{IV}.11)$$

U_1 ; I_{H1} : Respectivement la tension fondamentale de la charge et le courant correspondant.

IV 2. 3. Calcul des puissances réactives des branches du nœud :

Au niveau de l'inductance :

$$Q_{L1} = U_{L1} . I_{L1} = -\frac{K_1\, a_{L1}}{1 - K_1\, K_2} . E . j \frac{K_1\, K_{2L} . a_{L1}}{1 - K_1\, K_2} . \frac{E}{XS}$$

En valeur relative :

$$Q^*{}_{L1} = -j \frac{{K_1}^2\, K_{2L}}{(1 - K_1\, K_2)^2} {a_{L1}}^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots. \qquad (\text{IV}.12)$$

Au niveau de la capacité :

$$Q_{c1} = U_{c1} . I_{c1} = \frac{K_1\, a_{c1}}{1 - K_1\, K_2} . E . j \frac{K_1\, K_{2c} . a_{c1}}{1 - K_1\, K_2} . \frac{E}{XS}$$

En valeur relative

$$Q^*{}_{c1} = j \frac{{K_1}^2\, K_{2c}}{(1 - K_1\, K_2)^2} {a_{c1}}^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (\text{IV}.13)$$

Puissance réactive fournie par le compensateur sur le fondamental

$$Q^*{}_{p1} = Q^*{}_{c1} + Q^*{}_{L1} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots. \qquad (\text{IV}.14)$$

Ou bien, tenant compte de (IV. 12) et (IV. 13)

$$Q^*{}_{p1} = j \frac{{K_1}^2\, K_{2c}}{(1 - K_1\, K_2)^2} {a_{c1}}^2 - j \frac{{K_1}^2\, K_{2L}}{(1 - K_1\, K_2)^2} {a_{L1}}^2$$

$$= \frac{{K_1}^2\, K_{2L}}{\left(1 - K_1 (K_{2c} - K_{2L})\right)^2} \left[\frac{K_{2c}}{K_{2L}} {a_{c1}}^2 - {a_{L1}}^2\right] \ldots\ldots\ldots (\text{IV}.15)$$

Au niveau de la charge, en valeur relative :

$$Q^*{}_{H1} = -j\, {K_1}^2\, K_3 \left[1 + \frac{K_1 (K_{2c} a_{c1} - K_{2L} a_{L1})}{1 - K_1 (K_{2c} - K_{2L})}\right]^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.. (\text{IV}.16)$$

Les valeurs relatives sont définies par rapport aux valeurs de base :

$$I_{base} = \frac{E}{XS}, U_{base} = E, \qquad S_{base} = \frac{E^2}{XS}, \frac{{U_{base}}^2}{E} . I_{base} = U_{base} . I_{base}$$

Les expressions précédentes obtenues permettent de définir les caractéristiques statiques du nœud considéré. Pour mieux faire apparaître l'effet introduit par les harmoniques supérieurs, et pour déterminer éventuellement les différentes limites de réglage, il est nécessaire de faire varier les rapports de puissance des éléments en interaction dans le nœud ; ainsi, le rapport de puissance entre le compensateur et le réseau est varié. Pour chaque rapport donné, la puissance de la charge varie de 1 à 0,5 c'est-à-dire$X_H^* = 1 \div 2$, Les régimes de réglage établis, ainsi que les caractéristiques correspondantes sont décrite par rapports au réglage initial pour le quel, quand$\alpha_c = \alpha_L = 0$, le rapport de puissance entre la charge et le compensateur serait tel que $X_p = X_H$ et la tension du nœud $U = U_1$. Si la puissance de la charge varie, celle du compensateur doit être, variée pour rechercher le nouvel état d'équilibre (Balance).

X_H^*	$Q^*_1(a)$ $U^*_1(a)$	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1	U_1	0,99958	1,01433	1,0228	1,021	1,0063	0,982	0,952
	Q_{1H}	0,04973	0,05114	0,051971	0,05181	0,05038	0,0480	0,0453
	Q_{1k}	0,04995	0,0755	0,0806	0,0652	0,03508	0,01022	0,0000
1,2	U_1	1,00840	1,02340	1,03212	1,03047	1,0153	0,9906	0,96
	Q_{1H}	0,04210	0,0433	0,04440	0,0438	0,0426	0,0407	0,0383
	Q_{1k}	0,05084	0,07684	0,08211	0,0663	0,0364	0,0104	0,0000
1,4	U_1	1,0144	0,02965	1,0384	1,0368	1,021	0,9965	0,9655
	Q_{1H}	0,03656	0,0376	0,0382	0,03812	0,03705	0,0353	0,0332
	Q_{1k}	0,0514	0,0777	0,0831	0,0671	0,0368	0,0105	0,0000
1,6	U_1	1,01833	1,0336	1,0425	1,0408	1,0253	1,0002	0,969
	Q_{1H}	0,03220	0,03313	0,0336	0,03357	0,03263	0,03112	0,0292
	Q_{1k}	0,0518	0,0783	0,0837	0,0677	0,0371	0,0106	0,0000
2	U_1	1,0256	1,04114	1,0501	1,0484	1,0327	1,0072	0,975
	Q_{1H}	0,0261	0,0269	0,02737	0,0272	0,0265	0,0252	0,0237
	Q_{1k}	0,0525	0,0794	0,0849	0,0686	0,0376	0,1076	0,0000

Tableau IV. 1 Caractéristiques statiques du nœud pour le fondamental, k2=0.05 et k2c/k2l=2

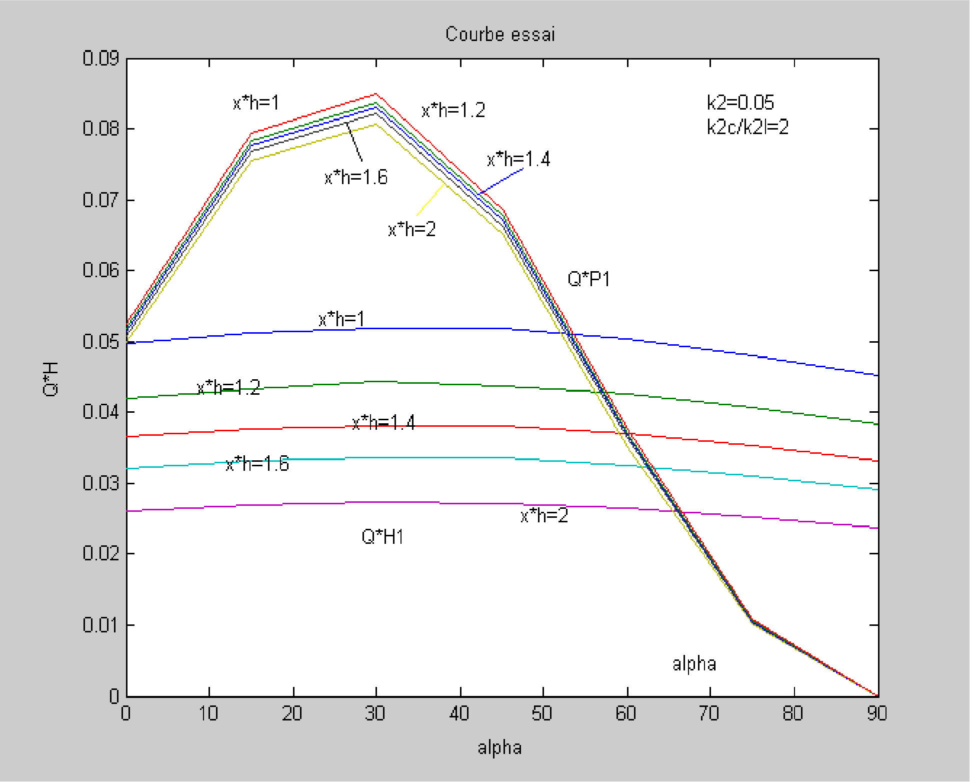

Figure IV. 1.a Caractéristiques des puissances statiques du nœud pour le fondamental, k2=0.05 et k2c/k2l=2

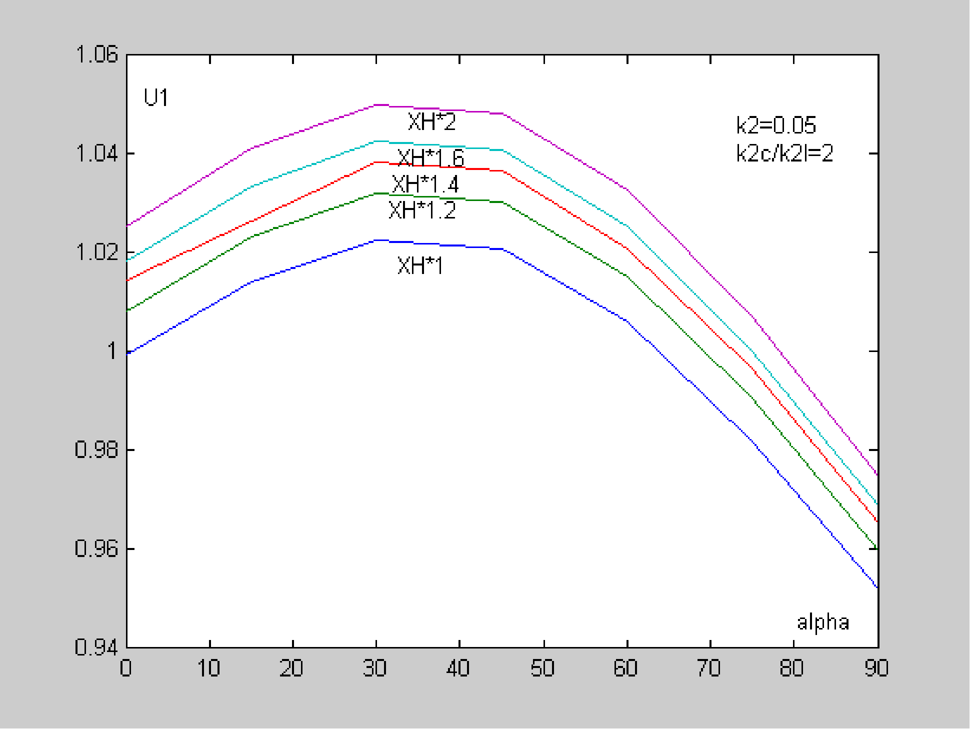

Figure IV. 1. b Caractéristiques des tensions statiques du nœud pour le fondamental, k2=0.05 et k2c/k2l=2

X_H^*	$Q^*_1(a)$ $U^*_1(a)$	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1	U_1	0,9998	1,0095	1,0144	1,0114	0,9979	0,9772	0,952
	Q_{1H}	0,04973	0,05065	0,05112	0,05112	0,04955	0,0476	0,04531
	Q_{1k}	0,0995	0,0666	0,0684	0,0684	0,0298	0,0085	0,0000
1,4	U_1	1,0147	1,0247	1,0298	1,0266	1,0128	0,9915	0,9655
	Q_{1H}	0,03656	0,0372	0,0376	0,0373	0,03644	0,0499	0,0332
	Q_{1k}	0,0514	0,0686	0,07053	0,0562	0,03075	0,0087	0,0000
2	U_1	1,02588	1,0361	1,0412	1,03810	1,02395	1,0021	0,9756
	Q_{1H}	0,02617	0,02666	0,02692	0,02676	0,02607	0,02503	0,0237
	Q_{1k}	0,0525	0,0701	0,0720	0,0574	0,0314	0,00897	0,0000

Tableau IV. 2 Caractéristiques statiques du nœud pour le fondamental, k2=0.05 et k2c/k2l=2.5

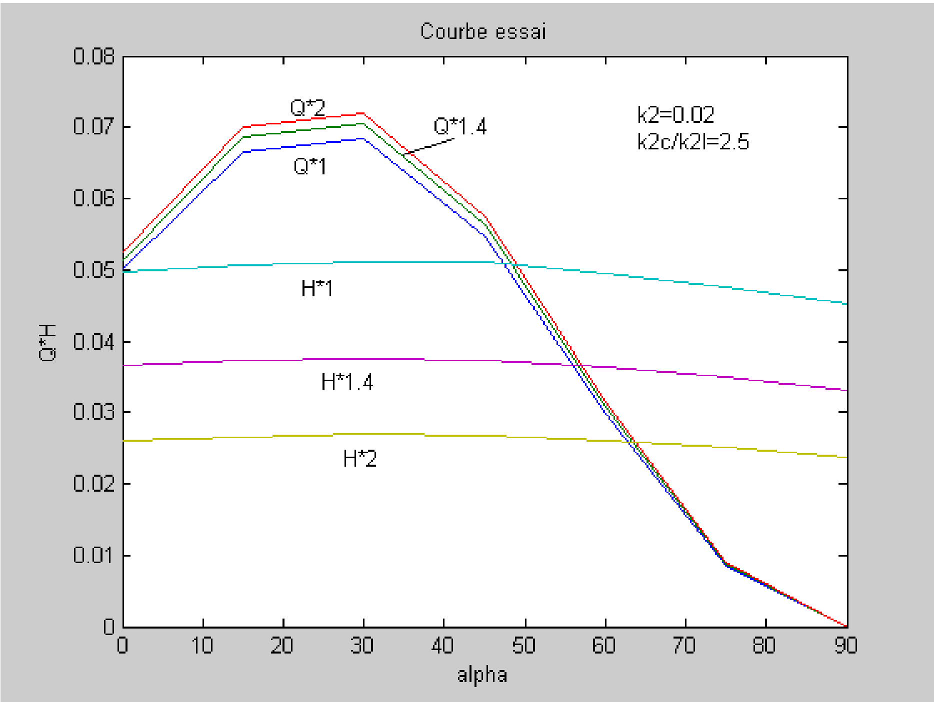

Figure IV.2.a Caractéristiques des puissances statiques du nœud pour le fondamental, k2=0.05 et k2c/k2l=2.5

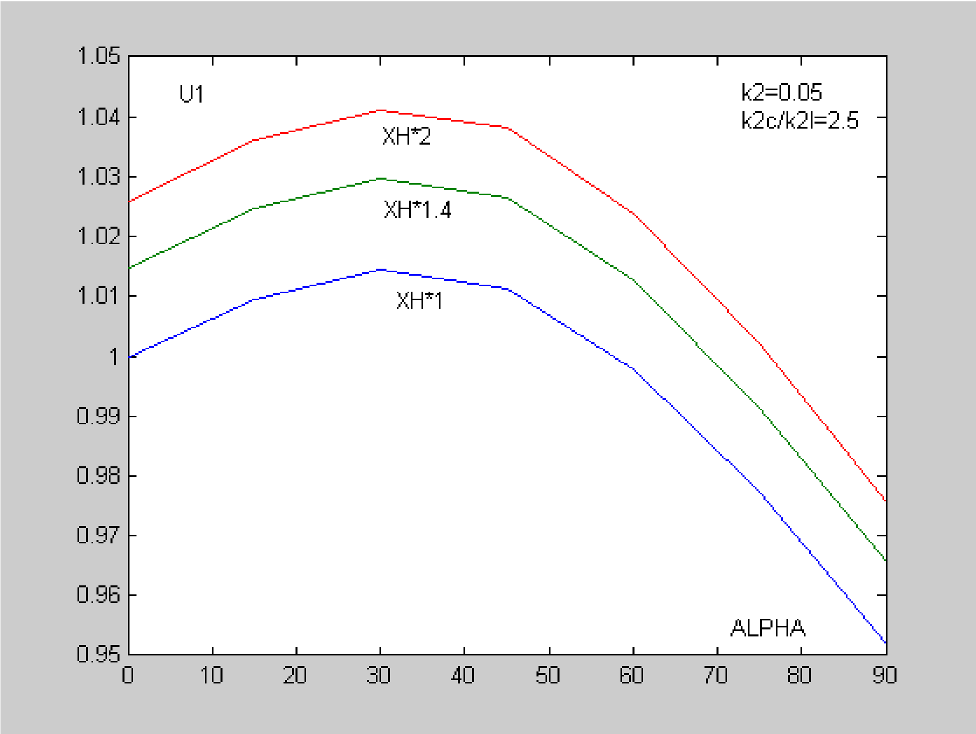

Figure IV. 2. b Caractéristiques des tensions statiques du nœud pour le fondamental, k2=0.05 et k2c/k2l=2.5

X_H^*	$Q^*{}_1(a)$ / $U^*{}_1(a)$	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1	U_1	0,9998	1,0280	1,0444	1,0413	1,0128	0,966	0,909
	Q_{1H}	0,0983	0,1034	0,1065	0,1059	0,10069	0,0924	0,0826
	Q_{1k}	0,0999	0,151	0,161	0,1305	0,0716	0,0204	0,0000
1,4	U_1	1,0290	1,0587	1,07605	1,0727	1,0427	0,993	0,933
	Q_{1H}	0,07387	0,0778	0,0801	0,0797	0,07568	0,0693	0,0618
	Q_{1k}	0,1058	0,16002	0,1710	0,1382	0,0758	0,02168	0,0000
2	U_1	1,0521	1,0832	1,1012	1,0978	1,06649	1,015	0,952
	Q_{1H}	0,0543	0,05732	0,05908	0,0587	0,0557	0,0509	0,0453
	Q_{1k}	0,1107	0,167	0,178	0,1445	0,0793	0,0226	0,0000

Tableau IV. 3 Caractéristiques statiques du nœud pour le fondamental, k2=0.1 et k2c/k2l=2

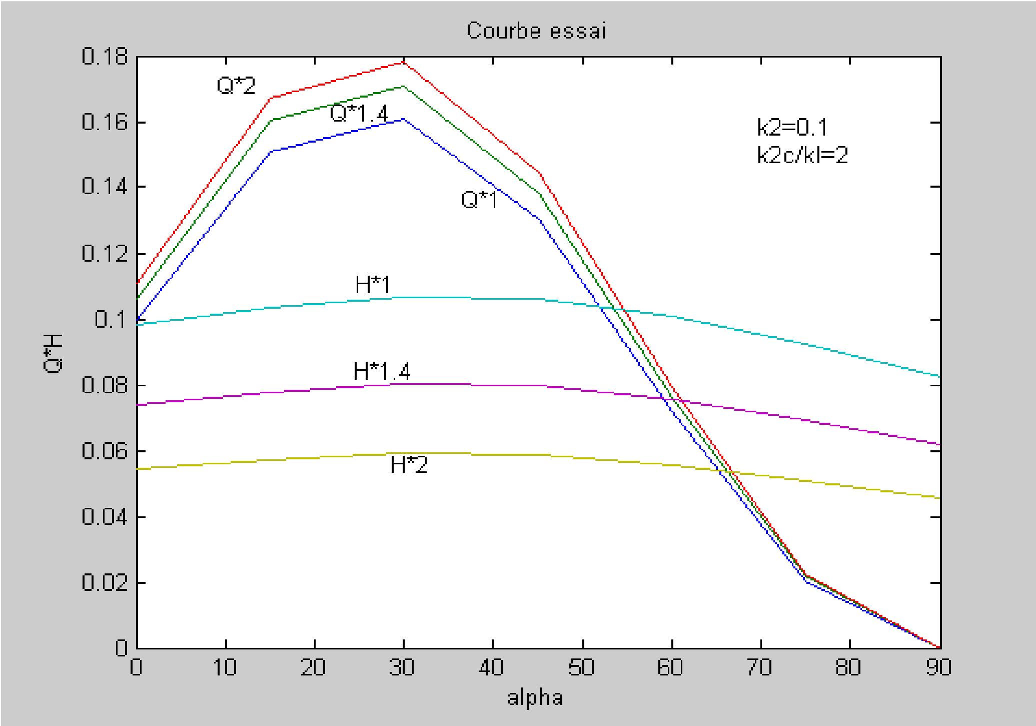

Figure IV.3.a Caractéristiques des puissances statiques du nœud pour le fondamental, k2=0.1 et k2c/k2l=2

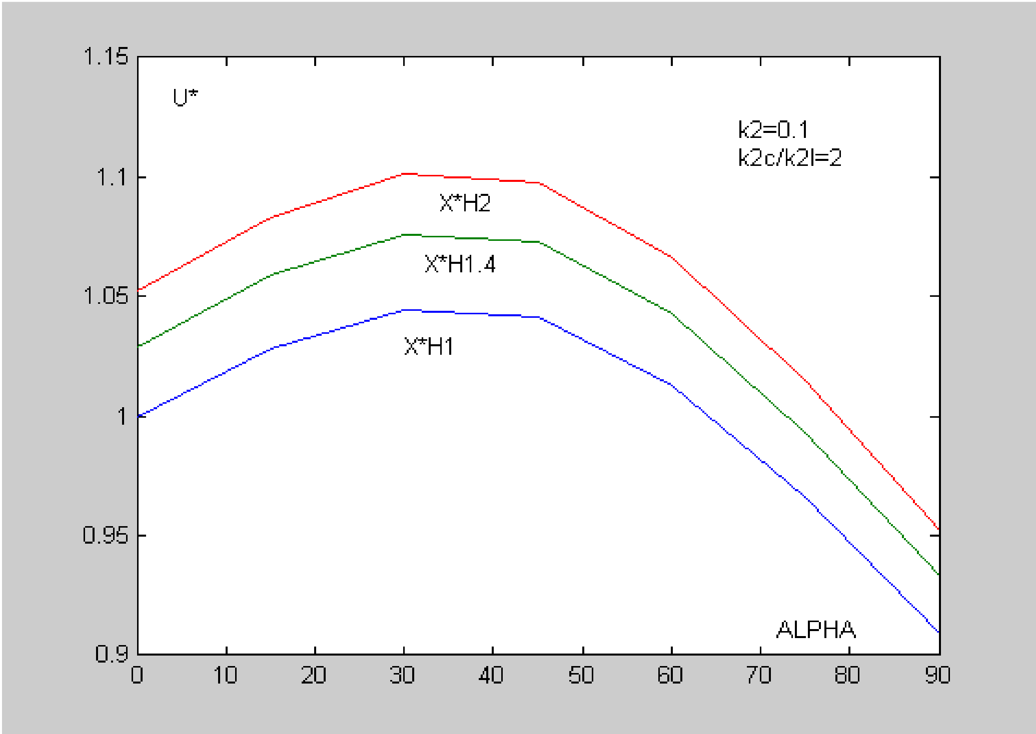

Figure IV. 3. b Caractéristiques des tensions statiques du nœud pour le fondamental, k2=0.1 et k2c/k2l=2

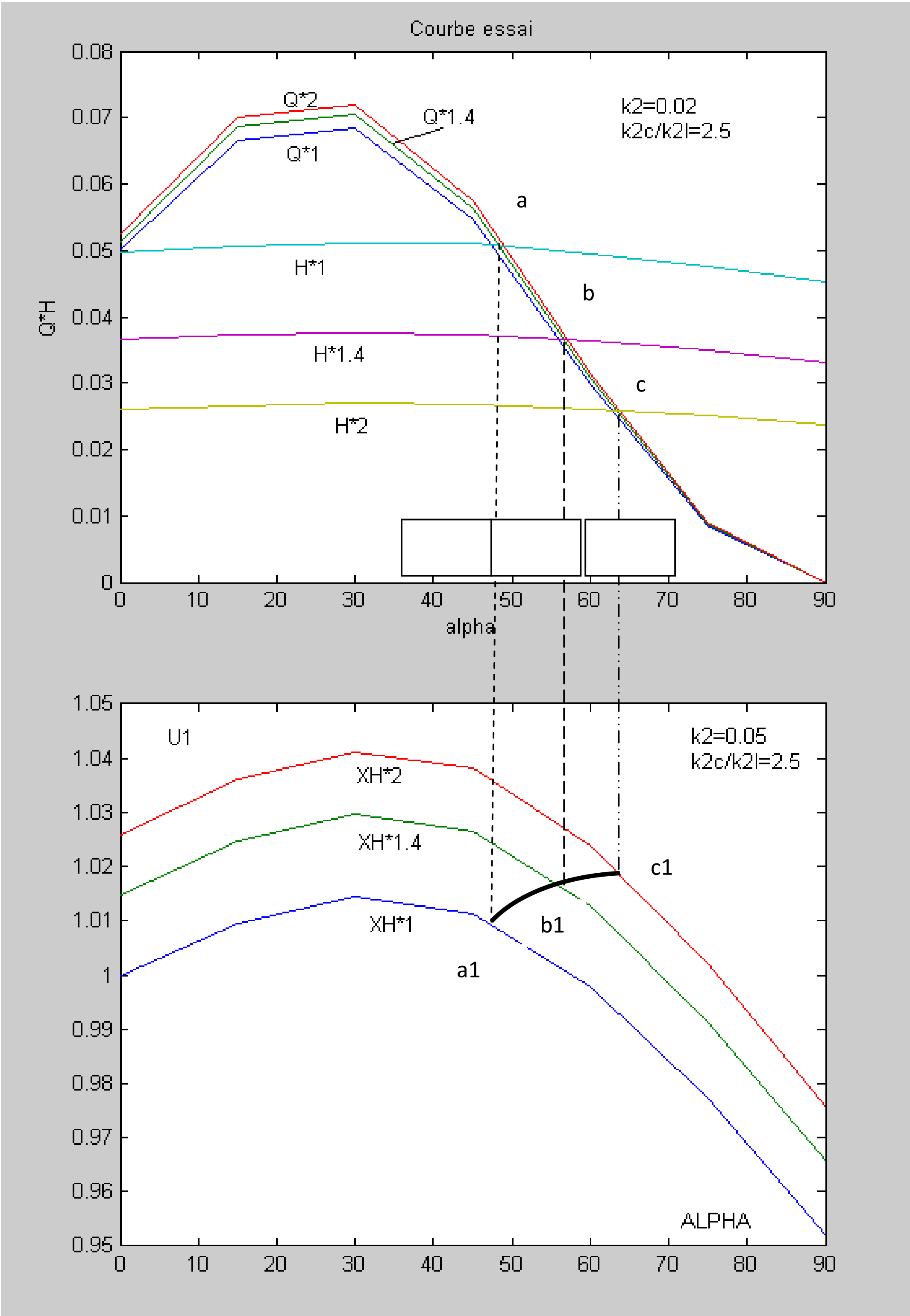

Figure IV. .4 Caractéristiques de réglage du nœud pour le fondamental, k2=0.05 et k2c/k2l=2.5

Analyse des caractéristiques

Les tableaux IV.1 à 3, nous ont permet de tracer les caractéristiques pour les grandeurs fondamentales et pour les rapports de puissance donnés.

Nous constatons de ces résultats que les caractéristiques statiques des courbes du compensateurs et de la charge correspondantes au régime initial c'est à dire quand $X_H^* = 1$, font intersection en deux points entre 0 et αa, (figure IV.4.). Le point "0" correspond à l'état d'équilibre quand $\alpha_L = \alpha_c = \alpha_a = 0$ et $X_H^* = 1$; par contre le point "a" corréspond à l'état $\alpha_L = \alpha_c = \alpha_a$ $et\ X_H^* = 1$. De ce fait quand la charge subit une variation par rapport au régime initial, en passant d'une caractéristique statique à une autre, le réglage de la puissance réactive qui doit suivre fera que la caractéristique de réglage évaluera suivant la courbe reliant les points a, b et c pour la puissance et les points a_1, b_1, et c_1.

Sur le diapason $D_{\alpha_0} = 0 \div \alpha_a$, les caractéristiques statiques passent par un maximum et dans ce cas la puissance du condensateur augmente et atteint un maximum ensuite elle décroit et passe par le niveau initial (point "a"). Le passage par le maximum de la valeur de la puissance du compensateur s'explique par le fait que les vitesses de variation en fonction de α des puissances fondamentales dans les branches en interaction du compensateur sont différentes, pour toute la gamme de réglage des thyristors.

Une autre remarque la puissance fondamentale de la branche inductive $Q_L(\alpha)$décroit avec une vitesse considérablement que celle de la puissance fondamentale de la branche capacitive dans la même zone. On peut déterminer sur le fondamental et dans tout l'intervalle maximal de la conductibilité, une zone d'influence capacitive et une zone d'influence inductive, qui dans une permutation déterminent celles correspondantes aux harmoniques supérieurs.

L'analyse faite pour les régimes fondamentaux uniquement en l'absence des harmoniques supérieurs ne peut données des informations complètes sur l'état d'équilibre réel dans ce nœud considéré. Il est nécessaire de déterminer l'apport des harmoniques supérieurs dans cet état d'équilibre.

IV -4. Balance de la puissance réactive en présence des harmoniques

IV -4-1 Schémas équivalent et paramètre pour les harmoniques supérieurs

Le schéma équivalent pour les harmoniques supérieurs permet d'exprimer les paramètres du régime et du système. (figII. 4).

L'impédance équivalente vue du compensateur pour le schéma des harmoniques supérieurs s'exprime simplement à partir de l'égalité :

$$\frac{1}{Z_n\, éq} = \frac{1}{j_n X_s} + \frac{1}{j_n X_H} = \frac{nX_H + nX_S}{j_n X_s \,.\, nX_H} = \frac{X_H + X_S}{j_n X_s X_H}$$

ou bien

$$Z_n eq = j\,\frac{n_X . X_s}{H_X + X_s} = j\,\frac{n}{1 + K_3}$$

Ou bien

$$Z_n eq = jn \ .K1\, X_S \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad \dots.(\mathrm{IV}.17)$$

Les branches thyristors-inductances et thyristors-capacité sont des branches non linéaires, habituellement on les considère comme des sources de courants harmoniques.

La tension du n^{ième} harmonique peut être définie comme le produit du courant correspondant de la charge par l'impédance.

$$U_n = j\, I_{Hn} \,. X_{Hn}.$$

Ou bien comme

$$U_n = j\, I_{sn} \,. X_{sn} = j\, I_{pn} \,. Z_{néq} \dots\dots\dots\dots\dots. \qquad .(\mathrm{IV}.18)$$

Sachant que

$$I_{pn} = I_{cn} + I_{Ln}$$

Et tenant compte des expressions (I. 54), (I. 47) et (IV. 17)

On peut écrire, en unité relative,

$$U_n = j\left[\frac{K_1 \,. K_{2C}}{1 - K_1\,(K_{2c} - K_{2L})}\, a_{cn} - \frac{K_1 \,. K_{2L}}{1 - K_1\,(K_{2c} - K_{2L})}\,\frac{a_{Ln}}{n}\right] . j\, nK_1.$$

$$= -\left[\frac{K_1\,.K_{2C}}{1-K_1\,(K_{2c}-K_{2L})}a_{cn}-\frac{K_1\,.K_{2L}}{1-K_1\,(K_{2c}-K_{2L})}\;\frac{a_{Ln}}{n}\right].nK_1$$

Ou bien :

$$U_n^{*}\;=-\;\frac{K_1\,.K_{2L}}{1-K_1\,(K_{2c}-K_{2L})}\left[\frac{K_{2C}}{K_{2L}}\;a_{cn}\quad\frac{a_{Ln}}{n}\;\right]\dots\dots\dots\dots\dots(\text{IV19})$$

IV-5. Calcul des puissances réactives des branches du nœud :

Pour le n[ième] harmonique on peut obtenir :

Branche inductive.

$$U_{Ln}\;=U_0.\,a_{Ln}\;=\frac{K_1\,.K_{2L}}{1-K_1\,(K_{2c}-K_{2L})}\,.E\dots\dots\dots\dots\dots..(\text{IV}.20)$$

$$I_n\;=I_0\;\frac{a_{Ln}}{n}=-j\;\frac{K_1\,.K_{2L}}{1-K_1\,(K_{2c}-K_{2L})}\;\frac{E}{XS}\;\frac{a_{Ln}}{n}\dots\dots\dots\dots\dots(\text{IV}.21)$$

U_{Ln}, I_n : Respectivement la tension et le courant de l'harmonique de rang n.

$$Q_L=Q_{L1}+\sum_n Q_{Ln}=U_{L1}.I_{L1}+\sum_n I_{Ln}.U_{Ln}$$

Les expressions $(\text{IV}.6)$, $(\text{IV}.7)$, $(\text{IV}.20)$ et $(\text{IV}.21)$ donnent en valeur relative.

$$Q_{Ln}^{*}=-j\;\frac{{K_1}^2\,.K_{2L}}{1-K_1\,.(K_{2c}-K_{2L})}\,.\frac{{a_{Ln}}^2}{n}\dots\dots\dots\dots\dots\qquad\dots(\text{IV}.22)$$

Branche capacitive :

$$U_{cn}\;=U_0\;\frac{a_{cn}}{n}=\;\frac{K_1}{1-K_1\,(K_{2c}-K_{2L})}\;E\;\frac{a_{cn}}{n}$$

$$I_{cn}\;=\;I_0 a_{cn}=j\,\frac{K_1\,K_{2c}}{1-K_1\,.(K_{2c}-K_{2L})}.\frac{E}{XS}.\,a_{cn}$$

On peut écrire, en unité relative,

$$U_{cn}{}^{*}\;=\;\frac{K_1}{1-K_1\,.(K_{2c}-K_{2L})}.\frac{a_{cn}}{n}\dots\dots\dots\dots.\qquad.(\text{IV}.23)$$

$$I_{cn}{}^{*} = j\frac{K_1.\ K_{2c}}{1 - K_1.(K_{2c} - K_{2L})}.a_n \dots\dots\dots.\dots\dots \qquad ..(\mathrm{IV}.24)$$

U_{cn}, I_{cn} : Respectivement la tension et le courant de l'harmonique de rang n de la capacité :

$$Q_c = Q_{c1} + \sum_n Q_{cn} = U_{c1}.I_{c1} + \sum_n I_{cn}.U_{cn}$$

En valeur relative :

$$Q_{cn}^{*} = U_{cn}^{*}.\ I_{cn}^{*} = j\frac{K_1\ .\ K_{2c}}{(1 - K_1.(K_{2c} - K_{2L}))^2}.\frac{a_{cn}}{n} \dots\dots\dots..(\mathrm{IV}.25)$$

La puissance réactive totale fournie par le compensateur.

$$Q_p^{*} = Q_c^{*} + Q_L^{*} = j\frac{K_1{}^2(K_{2c}a_{cn}{}^2 - K_{2L}a_{Ln}{}^2)}{(1 - K_1.(K_{2c} - K_{2L}))^2}.+\frac{K_1{}^2}{(1 - K_1.(K_{2c} - K_{2L}))^2}$$
$$+\sum\left(K_{2c}\,a_{cn}{}^2 - K_{2L}a_{Ln}{}^2\right)$$
$$= \frac{K_1{}^2\ .\ K_{2c}}{(1 - K_1.(K_{2c} - K_{2L}))^2}\left[\left[\frac{K_{2c}}{K_{2L}}a_{c1}{}^2 - a_{L1}{}^2\right] + \sum\left[\frac{K_{2c}}{K_{2L}}a_{cn}{}^2 - a_{Ln}{}^2\right]\right]$$
$$= Q_{p1}^{*} + \sum_n Q_{pn}^{*} \dots\dots\dots\dots\dots\dots.... \qquad (\mathrm{IV}.26)$$

La puissance réactive pour l'harmonique de rang n dans la charge ;

$$Q_{Hn} = U_{Hn}.I_{Hn} = j_n\,I_H.X_H = j_n\frac{K_1{}^2\ .\ K_{2c}}{(1 - K_1.(K_{2c} - K_{2L}))^2}\left[K_{2c}\,a_{cn} - K_{2L}\frac{a_{Ln}}{n}\right]^2\frac{E^2}{X_S{}^2}X_H$$
$$= -j\frac{n.\ \ K_1{}^4\ \ K_3}{(1 - K_1.(K_{2c} - K_{2L}))^2}(K_{2L})^2\left[\frac{K_{2c}}{K_{2L}}\ a_{cn} - \frac{a_{Ln}}{n}\right]^2 \dots\dots\dots(\mathrm{IV}.27)$$

Les expressions $(\mathrm{IV}.16)$ et $(\mathrm{IV}.27)$ permettent d'écrire :

$$Q_H^{*} = K_1{}^2.\ K_3\left[1 + \frac{K_1K_{2L}\left[\frac{K_{2c}}{K_{2L}}\ a_{c1} - a_{L1}\right]}{1 - K_1.(K_{2c} - K_{2L})}\right]^2 + \frac{K_1{}^4.\ K_{2L}{}^2.K_3}{\left(1 - K_1.(K_{2c} - K_{2L})\right)^2}.\sum n^2\left[\frac{K_{2c}}{K_{2L}}a_{cn}{}^2 - \frac{a_{Ln}}{n}\right]^2$$

Pour les thyristors $Q_{t1}^{*} + \sum nQ_{tn}^{*} = 0$ puisque le thyristor est considéré comme une clé qui ouvre et ferme et non comme un élément consommant ou fournissant de l'énergie.

X_H^*	$Q^*{}_1(a)$ $U^*{}_1(a)$	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1	U_1	0,99958	1,01433	1,0228	1,021	1,0063	0,982	0,952
	Q_{1H}	0,04973	0,05114	0,051971	0,05181	0,05038	0,0480	0,0453
	Q_{1k}	0,04995	0,0755	0,0806	0,0652	0,03508	0,01022	0,0000
1,4	U_1	1,0144	0,02965	1,0384	1,0368	1,021	0,9965	0,9655
	Q_{1H}	0,03656	0,0376	0,0382	0,03812	0,03705	0,0353	0,0332
	Q_{1k}	0,0514	0,0777	0,0831	0,0671	0,0368	0,0105	0,0000
2	U_1	1,0256	1,04114	1,0501	1,0484	1,0327	1,0072	0,975
	Q_{1H}	0,0261	0,0269	0,02737	0,0272	0,0265	0,0252	0,0237
	Q_{1k}	0,0525	0,0794	0,0849	0,0686	0,0376	0,1076	0,0000

Tableu IV. 4. Caractéristiques statiques entières du nœud, k2=0.05 et k2c/k2l=2

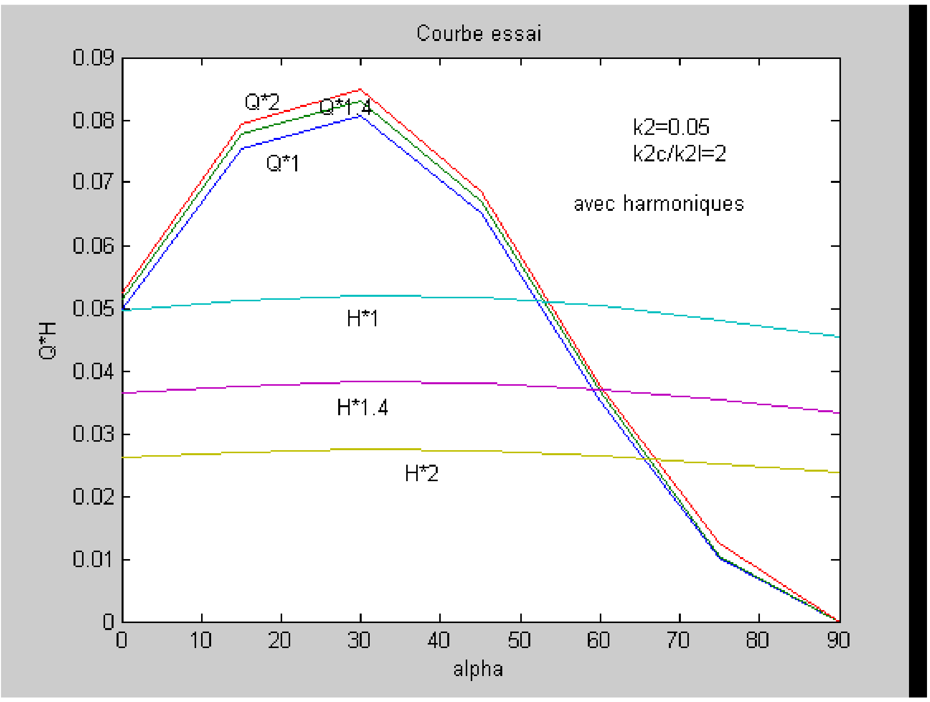

Figure IV 5. a Caractéristiques des puissances statiques entières du nœud, k2=0.05 et k2c/k2l=2

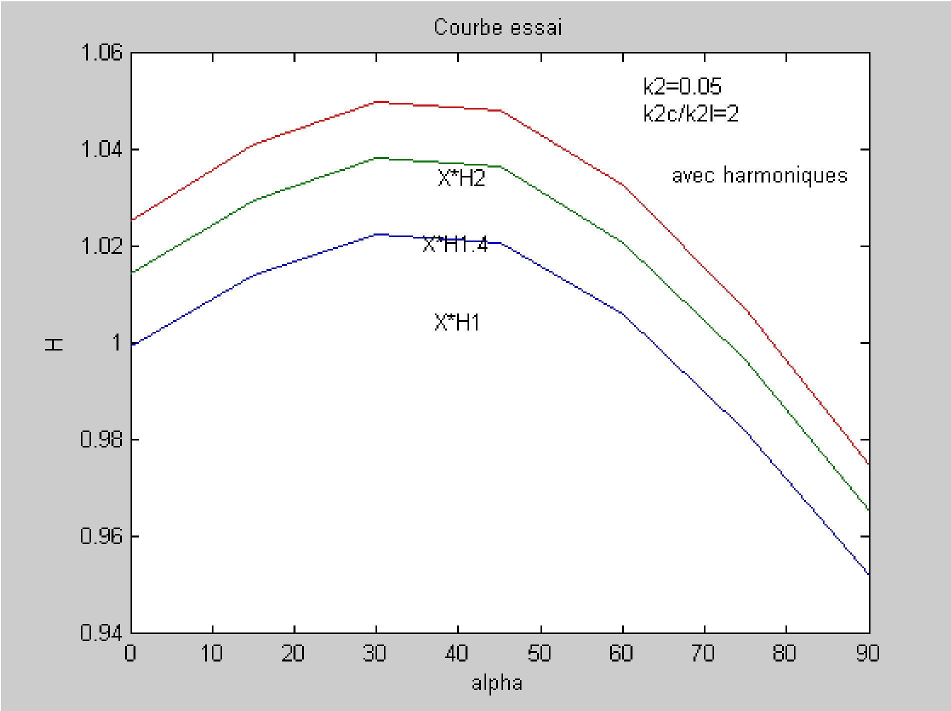

Figure IV 5. b Caractéristiques des tensions statiques entières du nœud, k2=0.05 et k2c/k2l=2

X_H^*	$Q^*(a)$ $U^*(a)$	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1	U	0.9998	1.01094	1.01915	1.0175	1.0107	0.9935	0.952
	Q_H	0.04973	0.0507	0.051602	0.05145	0.0508	0.04922	0.0453
	Q_k	0.0499	0.0611	0.0652	0.0543	0.0460	0.0208	0.0000
1,4	U	1.01472	1.0262	1.03473	1.03314	1.0263	1.0086	0.9655
	Q_H	0.03656	0.0373	0.03796	0.03786	0.03741	0.03621	0.03327
	Q_k	0.0514	0.0629	0.0671	0.0559	0.0474	0.0214	0.0000
2	U	1.02588	1.03748	1.0458	1.0441	1.03650	1.0181	0.975
	Q_H	0.02617	0.02674	0.02671	0.02711	0.0267	0.0255	0.0237
	Q_k	0.0525	0.0643	0.0686	0.0572	0.0485	0.0219	0.0000

Tableu IV. 5. Caractéristiques statiques entières du nœud, k2=0.05 et k2c/k2l=2.5

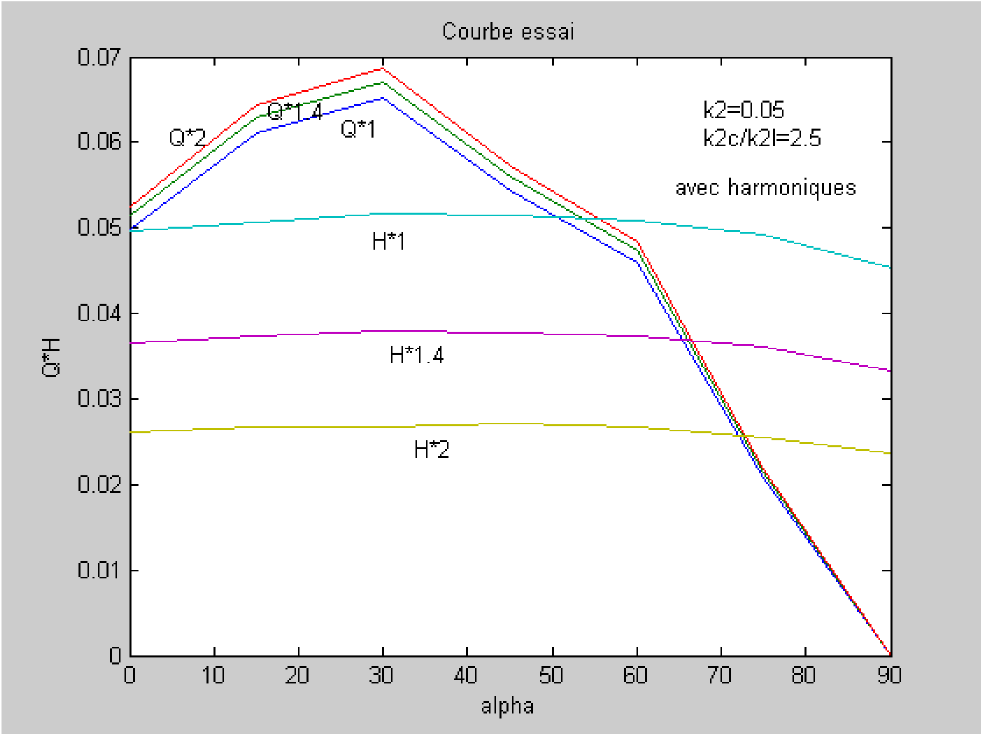

Figure IV. 6. a Caractéristiques des puissances statiques entières du nœud, k2=0.05 et k2c/k2l=2.5

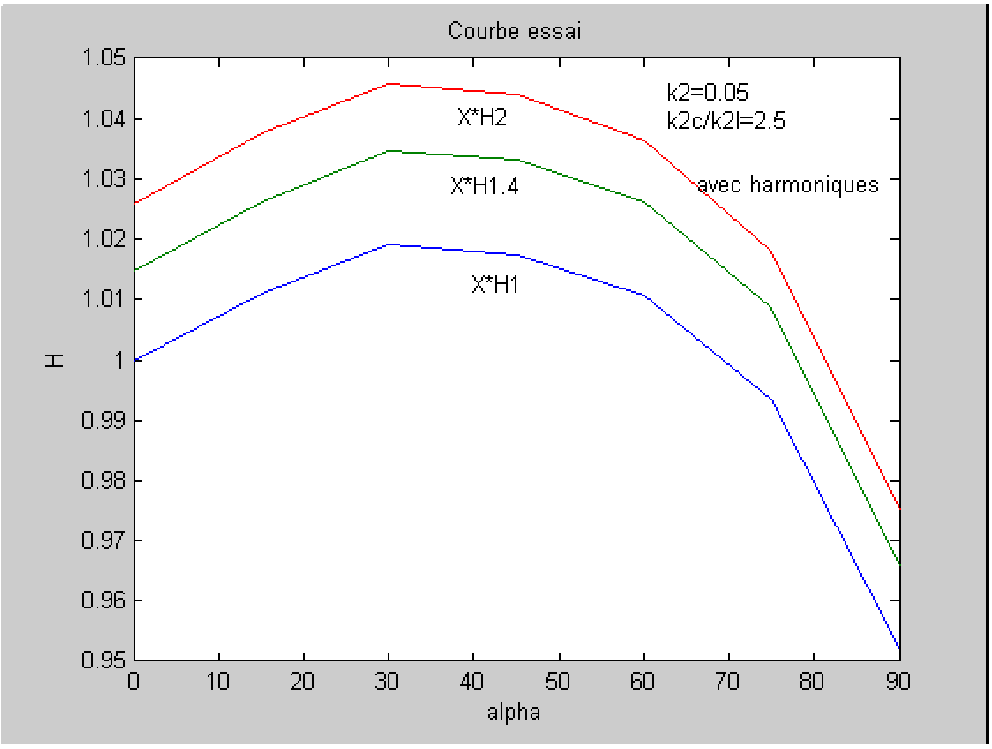

Figure IV. 6.b. Caractéristiques des tensions statiques entières du nœud, k2=0.05 et k2c/k2l=2.5

X_H^*	$Q^*(a)$ $U^*(a)$	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
1	U	0.9998	1.0359	1.0693	1.0729	1.078	1.0518	0.909
	Q_H	0.0983	0.1051	0.1117	0.1126	0.1144	0.1096	0.0826
	Q_k	0.09997	0.134	0.149	0.127	0.109	0.0408	0.0000
1,4	U	1.0290	1.06730	1.1029	1.01070	1.1137	1.0861	0.933
	Q_H	0.0738	0.0791	0.0843	0.08503	0.08655	0.0829	0.0618
	Q_k	0.1058	0.1422	0.158	0.134	0.116	0.0508	0.0000
2	U	1.0521	1.0908	1.1253	1.128	1.129	1.0973	0.952
	Q_H	0.05435	0.0583	0.0622	0.0628	0.0640	0.0139	0.0453
	Q_k	0.1107	0.148	0.165	0.140	0.121	0.0531	0.0000

Tableu IV. 6. Caractéristiques statiques entières du nœud, k2=0.1 et k2c/k2l=2

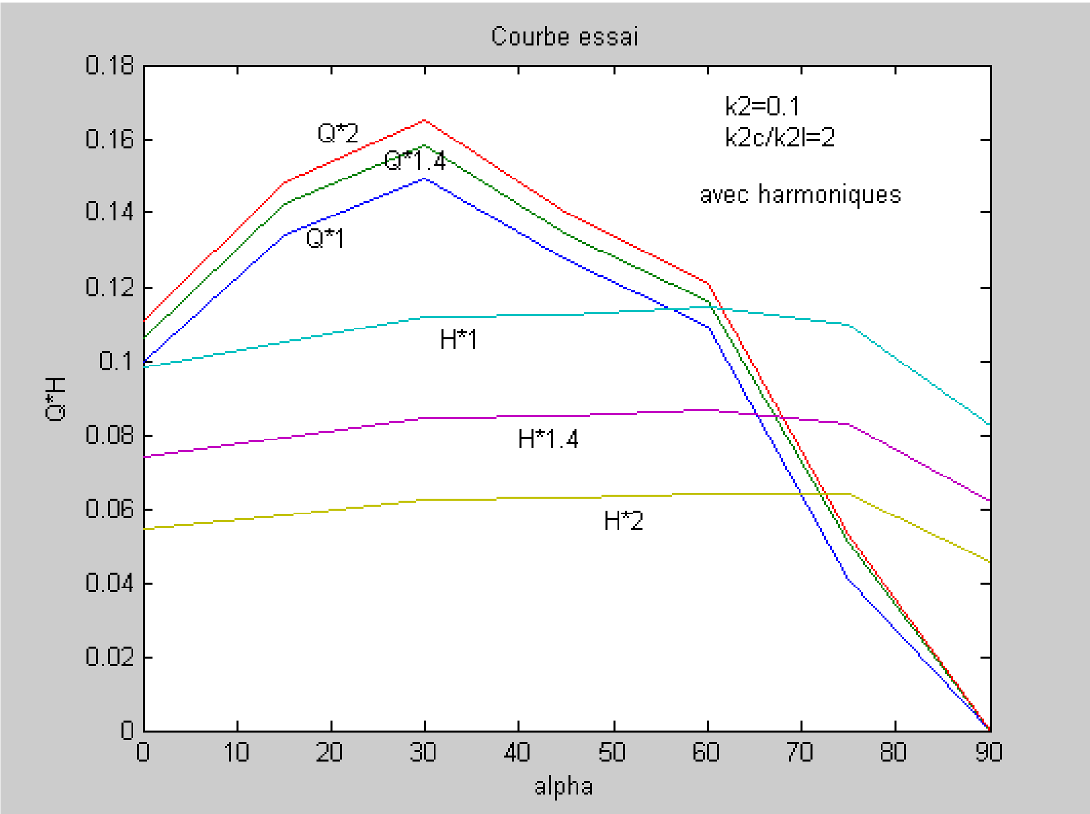

Figure IV. 7 a Caractéristiques des puissances statiques entières du nœud, k2=0.1 et k2c/k2l=2

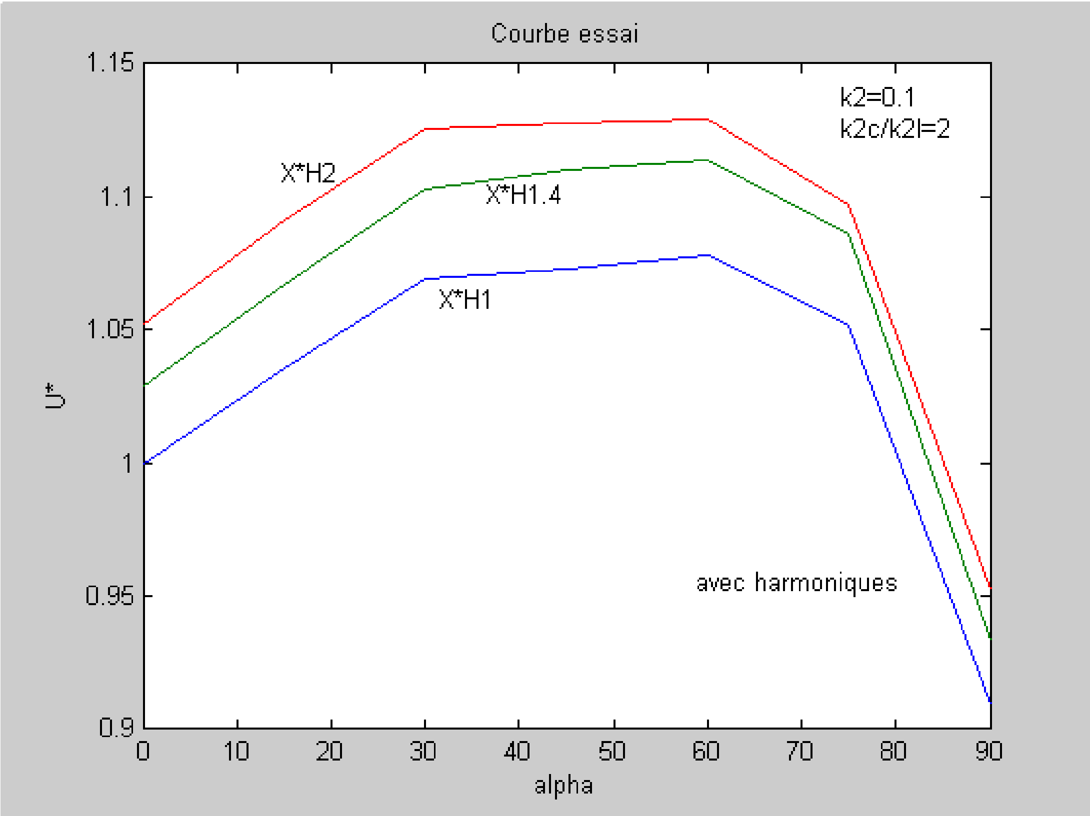

Figure IV. 7 b Caractéristiques des tensions statiques entières du nœud, k2=0.1 et k2c/k2l=2

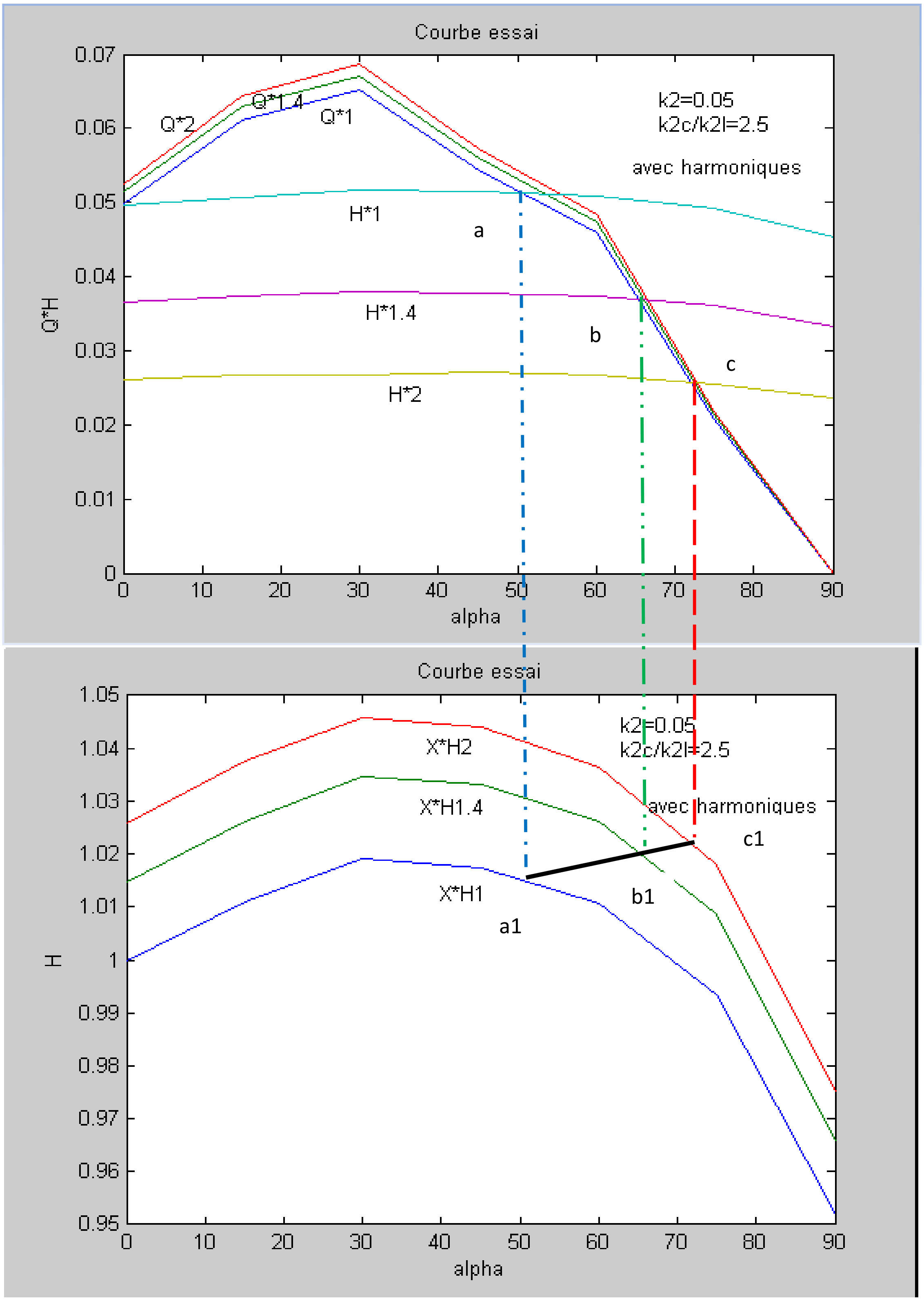

Figure IV. .8 Caractéristiques de réglage du nœud entières, k2=0.05 et k2c/k2l=2.5

IV. 6. Analyse des caractéristiques

Dans l'objectif de voir l'influence des harmoniques supérieurs sur les caractéristiques du nœud, nous avons comparé les courbes IV.4 et IV.8 des grandeurs fondamentales obtenues à ceux des grandeurs avec les harmoniques supérieurs.

La comparaison montre les rapports d'influence entre les branches du compensateur, cette comparaison se manifeste par une zone à influence inductive pour les harmoniques supérieurs et une zone capacitive pour les grandeurs fondamentales.

Les courbes obtenues en tenant compte des harmoniques supérieurs sont plus basses et passent en dessous des courbes pour les grandeurs fondamentales.

Dans l'intervalle $\pi/4$ et $\pi/2$ les courbes des caractéristiques fondamentales passent au contraire en dessus, des courbes renfermant les grandeurs contenant les harmoniques supérieurs, de cela nous déduisons que cet intervalle est celui de l'influence capacitive pour les grandeurs avec les harmoniques supérieurs et inductive pour les grandeurs fondamentales.

Nous remarquons aussi que sur l'intervalle 0 à $\pi/4$ les harmoniques supérieurs ont un effet compensatoire, puisqu'ils diminuent la puissance du compensateur, ainsi que la tension, tandis que dans l'intervalle $\pi/4$ et $\pi/2$, ils ont un effet inverse.

Ces interprétations nous permettent de dire que les points pour lesquels s'établi la balance pour différents régimes, se déplacent effectivement si nous négligeons l'effet des harmoniques supérieurs, la balance de la puissance réactive du nœud pendant le processus de réglage qui est censé s'établir dans la zone des points a, b et c, lorsque la charge aura respectivement les valeurs X*H=1, 1.4 et 2.

La tension du nœud évaluera suivant les projections des points **a**, **b** et **c**, sur les courbes de tensions figure IV. 8 et nous constatons sur la même figure que l'écart de la tension atteint au point **c'** approximativement 7 à 10%. Hors dans ces mêmes, c'est à dire ceux correspondants aux points **a, b** et **c** la tension est tout à fait autre et elle est déterminée en réalité par la courbe passant par les points **a', b'** et **c'**

Conclusion

De l'analyse des courbes obtenues on peut déduire un résultat également très important. On peut constater, en effet, que l'écart de variation de la tension, dépend du rapport entre les puissances installées des, branches du compensateur. Cette écart indépendamment du fait tient-on compte des harmoniques où pas , est d'autant plus réduit que le rapport $\frac{K_{2c}}{K_{2L}} = 2$ à la valeur $\frac{K_{2c}}{K_{2L}} = 2{,}5$; l'écart sera réduit et par conséquence l'on peut s'attendre à ce que si $\frac{K_{2c}}{K_{2L}}$ augmente encore l'écart de tension ne sortira pas des limites admissibles; et ceci pendant tout le diapason de réglage.

Le choix judicieux du rapport de puissance installée des branches du compensateur pourrait permettre un réglage continu du compensateur dans un intervalle plus large, sans toute fois entamer la sortie des limites admissibles aussi duK_{ns}. En outre ce mode ce réduction du K_{ns} peut être présenté comme alternative aux méthodes basées sur l'installation des filtres et autres.

CONCLUSION GENERALE

Le but des travaux de ce mémoire a été d’étudier les possibilités de réglage des paramètres électroénergitique du nœud de charge en agissant sur le compensateur formé des branches inductive et capacitive

Sachant que dans les réseaux électriques il est intéressant d’avoir une balance des puissances optimale. Il a été fait une projection sur des besoins attendus à la fois sur la gestion des puissances du compensateur et de la charge et sur les plans de connaitre l’évolution de tension dans le nœud.

L’intérêt s’est rapidement focalisé sur les systèmes complexes, non sinusoïdaux et non linéaires, l’interprétation physique de certaines caractéristiques des processus électroénergétiques, comme, par exemple les puissances réactives; ainsi que leurs définitions mathématiques restent, malgré quelques résolutions, un problème posé. Cependant dans certains cas particuliers ; pour cerner un aspect du processus, on peu utiliser certaines définitions déjà préétablies.

Il est avantageux d'utiliser un compensateur statique à thyristors, composé de deux branches parallèles capacitive et inductive, toutes les deux réglées de manière synchronisée. Pour réaliser une compensation statique de la puissance réactive, afin de réglage de la tension, dans un nœud de charge a régime non sinusoïdale, Ce dernier mode de réglage permet de réduire le coefficient de non sinusoïdalité du courant de charge, sans avoir recours à l'installation des filtres.

Dans ce travail nous avons remarqué que la réduction du coefficient de non sinusoïdalité est d' autant plus grande, que le rapport entre les puissances capacitive et inductive dans les branches du compensateur est plus grand. Cependant doit y avoir un rapport limite optimal, du coefficient de non sinusoïdalité admissible, pour lequel les pertes de puissance active dans le compensateur sont minimales.

Le travail, réaliser a permet de cerner de manière pertinente la problématique posé et offre une opportunité et des perspectives de développer aux mieux les modèles de réglage des puissances dans des nœuds à charge non linéaire dans l’avenir

Références Bibliographies

[1] Jean Paul Barret, "Nécessité du maintien de la tension et de fréquence”, RGE, n° 12, 1985

[2] Jean Paul Barret, "le réglage de la tension- aspects généraux”, RGE, n° 12, 1985.

[3] Ian Welch, "interogation of the HVDC LINK into the british 400kv AC, traux mission systeme, central electricity generating”, RGE, n° 2, 1984.

[4] J. le Jmtel, "caractéristique d’un reseau industriel comportant de nombreuse sources d’harmoniques”, RGE, n° 12, 1984.

[5] Rabah Diabi, "détermination des caractéristiques de réglage d’un compensateur statique à thyristor dans un nœud de charge quelconque”, Thèse de magister, université de Annaba 1988

[6] Jean Paul Barret, "Nécessité du maintien de la tension et de fréquence”, RGE, n° 12, 1985

[7] Boudjella Houari, “ Contrôle des puissance et des tensions dans réseau de transport au moyen des dispositifs FACTS”, thèse de magister janvier 2008 Sidi Bel Abbes.

[8] LIPSKIJ A. M, “ Relations entre les indices de qualité de l'énergie électrique dans les réseaux avec charges à variation brutale“, Journal Èlektričestvo ISSN 0013-5380,1983, n°8, pp. 50-52

[9] Bouharkat. M, ‘’ détermination des caractéristiques de compensation de l’énergie électrique dans un nœud de charge non linéaire’’, thèse de Magister, dec/ 1991 université de Annaba.

[10]Kamel Bounaya " Compensation de l’énergie réactive dans un nœud ", P.hd Moscou 1984.

[10]Emile Pillet " sur la génération de la notion de la puissance réactive ", RGE, n° 5, 1982.

[12] Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty H. W.,‘’*Electrical Power Systems Quality*’’, McGraw-Hill Companies, Inc., New York 2003M.

[13] Mansoor A., Collin E. R., Morgan R. L., *''Effect of Unsymmetrical Voltage Sags on Adjustable Speed Drive,''*Textile, Fiber, and Film Industry Technical Conference,1997, IEEE 1997 Annual, 1997

[14] R. Fournié, J. Capelle, "Condensateurs de puissance" Techniques de l'ingénieur D4 II.D644

[15] C. Joubert, "Etude des phénomènes électromagnétiques dans les condensateurs à films métallisés -Nouvelle génération de condensateurs-", Thèse de Doctorat, Lyon 1996.

[16] J. Wu, T. Saha, "Simulation of Power Quality Problems on a University Distribution system", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Volume: 4, 2000, Pages: 2326-2331 vol. 4

[17] IEEE Standards Board, "IEEE std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE, Inc., New York June 1995

[18] H. J. Bollen, P. Wang, N. Jenkins, "Analysis and Consequences of the phase jump Associated With A Voltage Sag ", Power System Computation Conference, Dresden, Germany, August 1996

[19] Samet Biricik, "A Research and Solution Proposal for Reactive Power Problems in North Cyprus Industries", Master thesis, Near East Univ., Nicosia, Turkish republic of Northern Cyprus, 2009.

[20] Ö. C. Özerdem, S. Biricik, "Development of a Solution for Reactive Power Problems in North Cyprus Industries," EMO Bilim Journal of the Chamber of Electrical Engineers, vol.2, Pages: 48-50, Turkish Republic of Northern Cyprus, August 2009

[21]. M.A. El-Sharkawi, M. Dong, T. Huang et A. Szofran. « Development and Field Testing of a 15kV Class Adaptive VAR Compensator », Travaux de l'IEEE sur la distribution d'énergie, vol. 10 no. 4, octobre 1995.

[22]. E. Wilson, A. Jefferson. « Power Factor Correction using the Adaptive VAR Compensator », Actes de la conférence sur la qualité de l'onde et le coût de l'énergie - conférence PQA, septembre 1997.

[23]. L. Conrad, J. Jatskevich, O. Wasynczu. « A Method for Evaluating Flicker- Reduction Strategies in Power Systems », travaux de l'IEEE sur la distribution d'énergie, publication PE-310-PWRD-0-1-1998, 16 janvier 1998.