PREMIER CHAPITRE

TRAITEMENT ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE- HYPOTHESES

1.1. INTRODUCTION.

La croissance permanente de la consommation de l'énergie électrique et le développement parallèle des systèmes électriques posent, pour l'énergétique moderne, des problèmes d'ordre aussi bien pratique que théorique. La recherche permanente des conditions d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique transférée représente et définit un de ces problèmes. Les conditions de transport de l'énergie électrique vers les consommateurs sont, dans une large mesure, caractérisées par la propriété énergétique qu'on a l'usage de designer et de quantifier par la grandeur dite puissance réactive (énergie réactive). En effet, introduite pendant l'analyse des processus énergétiques dans les systèmes à courant alternatif, la puissance réactive s'avère tout à fait utile pour la description et l'évaluation des caractéristiques de transfert, l'amélioration des indices de la qualité de l'énergie électrique et le contrôle des paramètres du régime, aussi bien au niveau du système qu'à celui des récepteurs ; tels que le réglage de la tension, la réduction des pertes, l'augmentation de la stabilité des systèmes [1÷16]… L'impact effectif de la solution des problèmes posés dépend de l'exactitude des informations (données) sur les processus électriques dans le système, en général, et sur l'énergie réactive en particulier; la notion de laquelle et la méthode de détermination restent encore objet de discussions de plusieurs auteurs [8,15,17÷22]. Ainsi le problème de la puissance réactive, dans sa relation avec ceux de compensation et de contrôle des régimes, reste, encore, autant actuel et important que les régimes des réseaux électriques sont non sinusoïdaux et non linéaires.

On sait que le traitement des problèmes de compensation de la puissance réactive dans les systèmes électriques à régimes non sinusoïdaux et non linéaires soulève des questions autour de l'interprétation physique de la puissance réactive et de sa détermination qui, comme le confirment différents travaux [18], restent encore ambigus, voire même paradoxales. Du fait que les conditions de bon fonctionnement des réseaux électriques sont tributaires de la compensation du réactif, il devient, alors, évident que les indices de la qualité de l'énergie seront d'autant plus améliorés que les questions soulevées sont plus justement résolues.

Dans ce travail, il est soutenu et jugé concevable que l'introduction de nouvelles hypothèses, dans la présentation et le traitement de ces questions, permet de contenir le paradoxe des différentes interprétations, en lui substituant une relation, plutôt, de complémentarité entre ces dernières.

1.2. PRESENTATION DU PROBLEME.

Un traitement bibliographique détaillé (de 1927-1984), assez riche, alors, concernant la notion de puissance réactive, a été présenté dans le travail [1]. En ce qui nous concerne, nous le prenons comme donnée bibliographique initiale pour lui adjoindre, en le relayant, nos propres points de vue et approche.

Les analyses des caractéristiques énergétiques des régimes non sinusoïdaux et non linéaires, présentées dans plusieurs travaux [8,17,18], ont donné lieu à une série de propositions pour la détermination et l'interprétation de la puissance réactive. Un premier examen critique montre que les expressions proposées ne donnent pas de solutions univalentes pour la grandeur « puissance réactive Q » à définir.

Ainsi l'analyse des travaux, considérés dans leurs hypothèses, leurs développements et leurs applications, montre que les expressions proposées se réduisent à trois formules caractéristiques intégrales qui s'expriment, à leur tour et après traitement harmonique respectif, sous les trois formes;

$$Q = \frac{1}{T}\int i' u\,dt = \sum Q_n \qquad (1.1)$$

$$Q = \frac{\omega}{T}\int i\left(\int u\,dt\right)dt = \sum \frac{1}{n} Q_n \qquad (1.2)$$

$$Q = \frac{1}{2\pi}\int i \frac{du}{dt}\,dt = \sum n Q_n \qquad (1.3)$$

où, $i' = \Sigma i'_n$; $i = \Sigma i_n$; i'_n - grandeurs orthogonales à i_n ; n- ordre d'harmonique ;
$Q_n = U_n I_n \sin\varphi_n$; $u = \Sigma u_n$ - tension appliquée.

Il découle de ces propositions généralisées que pour la définition d'une même et seule grandeur, on obtient, pour $n>1$, non seulement des valeurs différentes mais, aussi, des interprétations différentes. Ces expressions ne donnent de solutions univalentes que lorsque $n=1$; c'est à dire quand le régime est parfaitement sinusoïdal. La lecture directe de ces expressions conduit à l'évidence d'un état paradoxal de la définition de la puissance réactive.

En partant, ainsi, de ces hypothèses de relations contradictoires, il serait difficile de résoudre un problème pratique de compensation dans les réseaux, puisque la nécessité de détermination, à cette fin, de la valeur de la puissance réactive conduit à la confrontation, inévitable, au choix de l'expression adéquate.

A notre sens, ce paradoxe et ces contradictions ne sont pas justifiés. Mais ils peuvent trouver signification objective et cohérente dans une même proposition, plus générale, d'un modèle de présentation, objet de cette partie de travail, dans lequel les différentes hypothèses, les développements ainsi que les différentes déductions, relatifs aux expressions considérées, s'avèrent non seulement bien fondés mais aussi porteurs d'informations plus complètes sur le régime.

1.3. DESCRIPTION ET ANALYSE DES PROPOSITIONS DONNEES.

Pour situer ces propositions et définir les relations éventuelles entre elles, il est nécessaire de les analyser et d'extraire leur signification.

L'expression (1.1), proposée dans les recueils d'électrotechnique et utilisée pour le traitement des régimes non sinusoïdaux, définit la puissance réactive par analogie a la puissance active, moyennant une représentation symbolique des grandeurs tension et courant (u,i). En effet, pour un ordre d'harmonique « n » quelconque (u_n,i_n), on peut symboliquement exprimer,

$$\left.\begin{array}{ll} \overrightarrow{u_n} = u_n + j u_n^{'} & \overrightarrow{i_n} = i_n + j i_n^{'} \\ \overleftarrow{u_n} = u_n - j u_n^{'} & \overleftarrow{i_n} = i_n - j i_n^{'} \end{array}\right\} \qquad (1.4)$$

Avec,

$$\left.\begin{array}{l} u_n = \dfrac{\overrightarrow{u_n} + \overleftarrow{u_n}}{2} = U_{mn} \sin(n\omega\, t + \beta_n) \\ i_n = \dfrac{\overrightarrow{i_n} + \overleftarrow{i_n}}{2} = I_{mn} \sin(n\omega\, t + \alpha_n) \end{array}\right\} \qquad (1.5)$$

La puissance réactive instantanée s'exprime alors [18],

Ou bien;

$$\left.\begin{array}{l} q_n = u_n\, i^{'}_n \\ q_n = u^{'}_n\, i_n \end{array}\right\} \qquad (1.6)$$

On obtient, donc, l'expression

$$q_n = Q_n - Q_n \cos(2n\omega\, t+2\beta_n) + P_n \sin(2n\omega\, t+2\beta_n) \qquad (1.7)$$

où, $Q_n = U_n I_n$ sinö$_n$; $P_n = U_n I_n$ cosö$_n$; ö$_n$ = (â$_n$ - á$_n$) – respectivement, puissances réactive et active, et déphasage du n^{éme} harmonique; et dont l’intégrale sur une période «τ» déterminée,

$$\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} q_n dt = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} u_n i_n' dt = Q_n = U_n I_n \sin(\varphi_n) \qquad (1.8)$$

donne, évidement, la valeur moyenne Q_n de la puissance instantanée q_n, analogiquement à la puissance active. Cette valeur coïncide parfaitement avec celle qu’on aurait pu déterminer, comme amplitude des oscillations de la puissance instantanée $s_n = u_n i_n$ du circuit considéré, dont l’intégrale sur la période est nulle (la valeur moyenne est nulle). Ainsi, selon la première proposition, la puissance réactive peut être déterminée comme caractéristique intégrale, de la même manière que celle active.

La représentation symbolique vectorielle et, par conséquent, la forme déduite de q_n, n’ont de sens objectif que dans cette commodité de présenter cette grandeur sous forme de caractéristique intégrale (non nulle); laquelle contredit, en fait, le caractère oscillatoire du processus énergétique.

Chaque terme de cette même expression (1.1) est introduit dans la somme comme valeur réduite par rapport à la période fondamentale. Donc, et en tenant compte de ce qui a été avancé, l’expression (1.1) ne peut renfermer d’informations complètes sur la puissance réactive des harmoniques supérieurs.

Ces observations critiques permettent d’en faire une autre concernant l’expression (1.2). En effet, dans cette dernière, la puissance réactive du n^{éme} harmonique est définie, dans la somme, non seulement par rapport à la fréquence fondamentale, mais en plus, diminuée de n fois. Une courte analyse, très indicative et a juste titre, faite dans le travail [18], donne une évaluation critique assez significative de la grandeur correspondante à (1.2). En effet, pour les harmoniques u_n et i_n, l’échange énergétique pendant la période correspondante T/n est, quantitativement, caractérisé par l’amplitude de la composante oscillatoire, qui le mesure et dont la valeur correspond à (1.8). D’un autre coté, la puissance réactive du n^{éme} harmonique, déjà dans une forme réduite conformément à (1.2), s’exprime,

$$Q_{\left(\frac{1}{n}\right)} = \frac{1}{n} U_n I_n \sin\varphi_n \qquad (1.9)$$

Les expressions (1.8) et (1.9) peuvent être représentées par les aires délimitées par les caractéristiques « Volt – Ampère » (V-A). En prenant la même échelle pour la tension et le courant $m_u = m_i = 1$, on peut écrire,

$$\left.\begin{aligned} Q_n &\equiv F_{n(V-A)} \\ Q_{\left(\frac{1}{n}\right)} &\equiv F_{\left(\frac{1}{n}\right)(V-A)} = \frac{1}{n} F_{n(V-A)} \end{aligned}\right\} \quad (1.10)$$

Il découle, que la puissance réactive, calculée par l’expression (1.9), est proportionnelle à l’aire du cercle de rayon $R = U_n = I_n$, diminuée de n fois, (Fig.1.1). Cette valeur est, également, proportionnelle à l’aire du cercle de rayon $r = U_n/n = I_n/n$, mais augmentée de n fois. Autrement dit, dans le premier cas, un point géométrique sur la caractéristique V-A, se déplacera du point « a » au point « b » en passant une seule fois par l’extremum de q_n, (Fig.1.1); tandis que, dans le deuxième - il effectue n tours du cercle en passant $2n$ fois par la valeur maximale de $q_{(1/n)}$. Ainsi, dans un cas, la puissance réactive du n^{éme} harmonique se trouve être calculée proportionnelle a l’aire « V-A » instantanée de valeurs efficaces $U_{(1/n)} = U_n/n$ et $I_{(1/n)} = I_n/n$ dont la fréquence $\omega_n = n\omega$ est supérieur à la fondamentale et dans un autre - proportionnelle à l’aire définie par u_n et i_n instantanés, dont la fréquence $\omega_{(1/n)} = \omega/n$ est inférieur à la fondamentale, ce qui est, tout à fait, fictif.

Dans tel cas comme dans l’autre, ces observations permettent de dire que la valeur déterminée par l’expression (1.9) ne donne pas une représentation complète de la puissance réactive, quand il s’agit de tenir compte des harmoniques supérieurs.

A la différence des valeurs obtenues par (1.1) et (1.2), la valeur, réduite à la fréquence fondamentale, de la puissance réactive déterminée par (1.3) introduit, dans la somme, celle du n^{éme} harmonique augmentée de n fois. De même, que précédemment, on peut écrire,

$$Q_{(n)} \quad n \,.\, F_{n,(V-A)} \quad (1.11)$$

Physiquement c’est ainsi, du fait que, pendant la période fondamentale sur laquelle est examiné le processus énergétique, les vecteurs tension u_n et courant i_n font n rotations complètes; puisque leur fréquence est n fois supérieure à la fondamentale. Cette grandeur vérifie, également, la balance des puissances correspondantes dans un contour fermée, [8]

$$\Sigma Q_{(n)i} = 0 \quad (1.12)$$

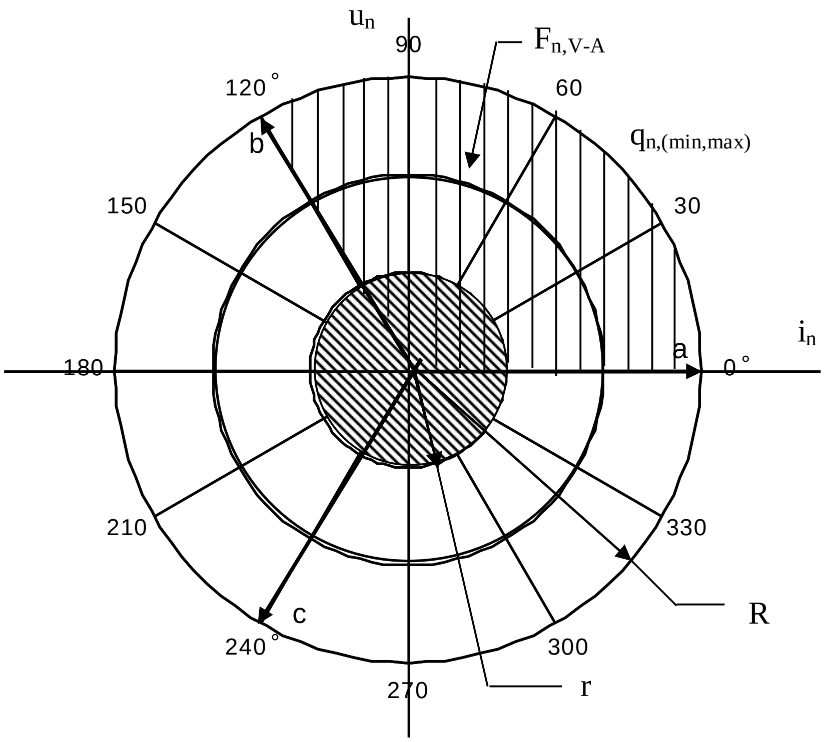


Fig.1.1. Caractéristiques Volt-Ampère (V-A),
Correspondantes au n^{eme} harmonique.

Ces deux observations permettent de dire que la somme (1.3) comporte plus d'information sur la puissance réactive, donc a une valeur relativement, plus représentative de cette dernière.

1.4. SPECIFICITE D'UN CIRCUIT OHMIQUE COMMANDES PAR THYRISTORS.

Quand on s'intéresse à la notion de la puissance réactive dans les circuits non linéaires et non sinusoïdaux et aux différentes applications de son utilité établie, on ne peut s'empêcher de considérer certains circuits particuliers, tels les fours à résistance commandés par thyristors, (fig.1.2.a), qui révèlent, encore davantage, le paradoxe dans la définition de la puissance réactive. En effet, les descriptions analytiques du régime du modèle donné font état d'un paradoxe entre les déductions mathématiques et les interprétations physiques du régime.
Pour analyser le régime de ce modèle, et déterminer les caractéristiques fondamentales, on peut faire les hypothèses suivantes.

- La tension instantanée e de la source supposée de puissance infinie, est parfaitement sinusoïdale,
- La charge R branchée au nœud du réseau est purement active,
- Les thyristors sont supposés idéaux; leurs pertes sont nulles.

Ainsi, une tension appliquée,

$$e = E_m sinù\, t$$

engendre dans le circuit, pendant les intervalles de conduction $á + kð \quad ù\, t \quad ð(1+k)$, un courant,

$$i = I_m sinù\, t$$

lequel peut être décomposé en série de fourrier. Le fondamental aura pour expression

$$i_1 = I_m(a_1 sinù\, t - b_1 cosù\, t) \qquad (1.13)$$

où,

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha\right) \qquad (1.14) \\ b_1 &= \frac{1}{\pi}\sin^2\alpha \end{aligned}\right\}$$

le courant fondamental du circuit définit, avec la tension du réseau, une puissance instantanée,

$$s = e.i_1 = P - P\, cos2ù\, t - Q\, sin2ù\, t \qquad (1.15)$$

Avec,

$$P = EIa_1 = EI\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha\right) \qquad (1.16)$$

$$Q = EIb_1 = \frac{EI}{\pi}\sin^2\alpha \qquad (1.17)$$

L'expression (1.16) définit entièrement l'énergie dissipée dans la résistance R du circuit, puisque,

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T eidt = EIa_1 \qquad (1.18)$$

Ainsi la puissance active, caractéristique intégrale, est entièrement déterminée par la tension du réseau et le fondamental du courant.

La grandeur (1.17) est dite puissance réactive du circuit ; elle est physiquement interprétée, dans les travaux [8], comme mesure de la vitesse de variation de la résistance instantanée du circuit. Dans les circuits à régimes sinusoïdaux cette signification physique ne présente aucune contradiction avec la physique des processus énergétiques s'y découlant. En effet, si dans le circuit considéré on suppose *á = 0*, le courant devient parfaitement sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau. De ce fait, la résistance instantanée du circuit, définie comme

$$r(t) = \frac{e}{i} = \frac{E_m \sin \omega t}{I_m \sin \omega t} = \frac{E_m}{I_m} = R$$

serait une constante et sa vitesse de variation est partout nulle pendant le déroulement du processus énergétique. Dans ce cas la grandeur Q, dite puissance réactive, s'annule et toute la puissance du circuit sera déterminée par la puissance instantanée active, ayant pour valeur moyenne $P = E.I = E^2/R = I^2.R$.

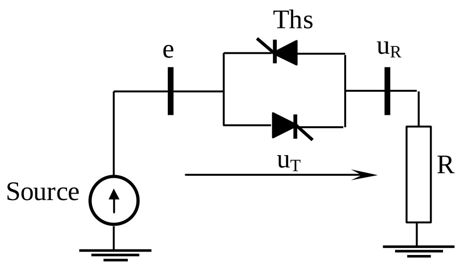
Si, par contre, dans ce même circuit, on insère une inductance L (ou une capacité) en gardant *á = 0*, le courant y apparaissant sera déphasé de *ð/2* par rapport à la tension e (R étant prise nulle pour simplifier). Dans ces conditions la résistance instantanée du circuit

$$r_{(t)} = e/i = - X_L \, tgù \, t$$

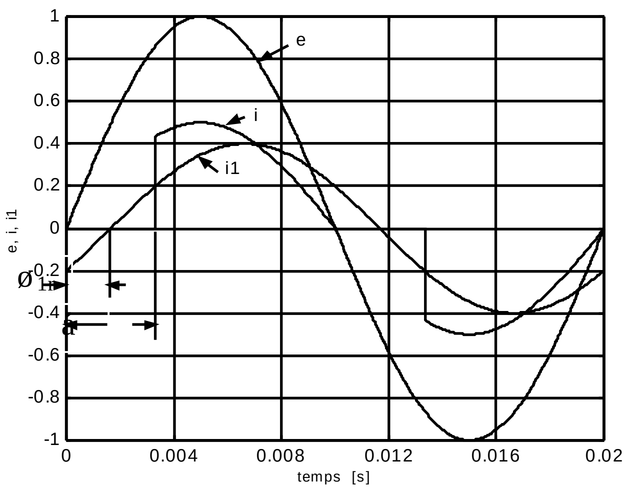
sera alors une fonction du temps, définie dans]0 ÷ ð/2[et]ð/2 ÷ ð[.
La puissance active, dans ce cas, étant nulle ($R=0$); la puissance réactive sera égale à $Q = E.I = E^2/X_L = I^2. X_L$. et caractérise l'échange de l'énergie électrique entre la source et l'élément de réactance $X_{L.}$

Ainsi, pour les régimes sinusoïdaux, la présence de la puissance réactive dans un circuit inductif (ou capacitif), est, sans contradiction, liée, simultanément, à la présence de l'échange énergétique entre les éléments du système et la variation de la résistance instantanée du circuit. Dans les systèmes à régime non sinusoïdaux et non linéaires cette dernière constatation ne peut être, dans tous les cas, justifiée et, par conséquent, ne peut être généralisée. Le circuit considéré, (Fig.1.2.) représente, à ce propos, un cas caractéristique. En effet, quand *á   0*, la résistance instantanée du circuit varie, pendant la période T, d'une manière discontinue dans l'intervalle]   ÷ *R*]. Si, dans ce cas, la puissance réactive est liée à la variation de la résistance, elle serait déterminée par l'expression (1.17). Si, par contre, la puissance réactive est définie comme caractéristique de l’échange énergétique dans le circuit, elle serait nulle puisque, conformément aux hypothèses faites, le thyristor est un élément « nul » et la résistance R est purement active, non douée d’échange, mais de dissipation.

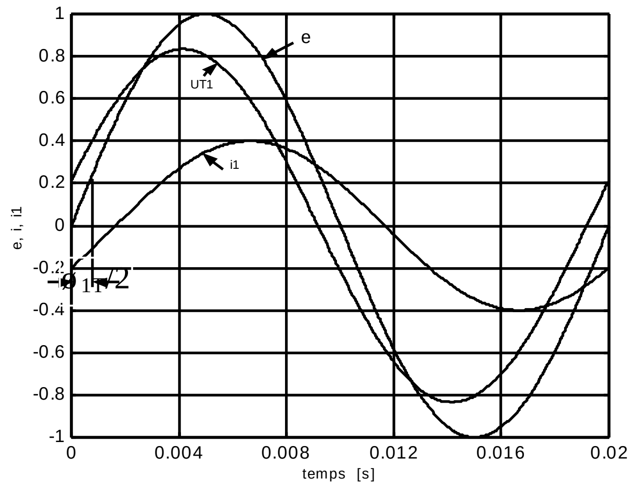
Ainsi, l’analyse du régime du système donné pose, en fait, le problème concernant l’interprétation physique de la puissance réactive d’une manière générale et de la grandeur définie par l’expression (1.17), d’une manière particulière.



a.



b.



c.

Fig.1.2. Schéma de principe et diagramme
d'un circuit Ohmique commandé.

1.5. ANALYSE ET INTERPRETATIONS PHYSIQUE DU REGIME DU MODELE DONNE.

Pour effectuer une analyse plus complète des caractéristiques énergétiques du circuit, il est jugé nécessaire de porter la réflexion aussi bien sur les valeurs instantanées que sur les caractéristiques intégrales de son régime.

1.5.1. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES INSTANTANEES.

Dans l'expression (1.15) la grandeur $q = Q \sin \omega t$ est due au déphasage $Ø_{1R}$ entre le fondamental du courant et la tension du réseau, (Fig.1.2.). Ce déphasage découle de la décomposition en séries de fourrier de la courbe du courant i du circuit. Cette décomposition définit également une tension fondamentale sinusoïdale sur les thyristors, déphasée d'un angle $Ø_{1T}$ en avance par rapport à la tension du réseau. Pour le circuit donné, on peut écrire,

$$e = u_R + u_T \tag{1.19}$$

où, u_R ; u_T - tensions instantanées aux bornes, respectivement, de la résistance R et du thyristor T.

Cette égalité est aussi valable pour les grandeurs instantanées fondamentales

$$e = u_{1R} + u_{1T}\,, \qquad (1.20)$$

et pour les composantes actives correspondantes, définies par rapport à e,

$$e = u_{1R,a} + u_{1T,a} \qquad (1.21)$$

En multipliant l'expression (1.20) par le courant fondamental i_1, on obtient

$$s = e.\,i_1 = u_{1R}\,.i_1 + u_{1T}\,.i_1 = s_{1R} + s_{1T} \qquad (1.22)$$

Cette dernière expression définit deux composantes de la puissance instantanée du circuit; correspondantes, respectivement, à la résistance $s_{1R} = u_{1R}.i_1$ et aux thyristors $s_{1T} = u_{1T}.i_1$. Conformément au hypothèses précédemment faites, la composante s_{1T}, correspondante aux thyristors, est fictive ; elle découle uniquement de la transformation mathématique opérée sur les courbes instantanées des paramètres du régime du circuit. Elle n'a de signification que dans l'équivalence mathématique des expressions représentatives de la même puissance.

Les tensions fondamentales correspondantes, respectivement, à la résistance R et aux thyristors T peuvent être réduites à la forme,

$$u_{1R} = E_m\left(a_1 \sin\omega t - b_1 \cos\omega t\right) = E_m\sqrt{a_1^2 + b_1^2}\,\sin\left(\omega t - \psi_{1R}\right) \qquad (1.23)$$

$$u_{1T} = E_m\left[(1 - a_1)\sin\omega t - b_1 \cos\omega t\right] = E_m\sqrt{(1 - a_1)^2 + b_1^2}\,\sin\left(\omega t + \psi_{1T}\right) \qquad (1.24$$

Les puissances instantanées correspondantes, auraient, alors, respectivement, pour expressions,

$$\begin{aligned} s_{1R} &= E.I.(a_1^2 + b_1^2) - E.I.(a_1^2 + b_1^2).\cos(2ù t - 2\,Ø_{1R}) = \\ &= P_{1R} - P_{1R}.\cos(2ù t - 2\,Ø_{1R}) \end{aligned} \qquad (1.25)$$

$$\begin{aligned} s_{1T} &= E.I.[a_1 - (a_1^2 + b_1^2)] - E.I.\,[a_1 - (a_1^2 + b_1^2)].\cos(2ù t - 2\,Ø_{1R}) + \\ &+ E.I\, b_1 \sin(2ù t - 2\,Ø_{1R}) = P_{1T} - P_{1T}.\cos(2ù t - 2\,Ø_{1R}) + Q.\sin(2ù t - 2\,Ø_{1R}) \end{aligned} \qquad (1.26)$$

L’expression (1.25) définit la puissance fondamentale de l’élément Ohmique *R*. Elle est purement active. La puissance instantanée fondamentale correspondante aux thyristors, définie par l’expression (1.26), est composée d’une partie active,

$$p_{1T} = P_{1T} – P_{1T}.\ cos(2ù\ t\ -\ 2\ Ø_{1R})$$

et d’une partie réactive,

$$q_{1T} = Q.sin(2ù\ t\ -\ 2\ Ø_{1R}) \qquad (1.27)$$

La composante réactive, ainsi définie, est justement égale à celle que le système, conformément aux expressions (1.15) et (1.17), est sensé échanger avec le circuit extérieur; l’élément ohmique R étant, du fait, exclus de ce schéma d’échange. Le schéma d’échange, ainsi obtenu, est fictif; et porte un caractère purement conventionnel, puisque le thyristor, étant considère comme un élément idéal, ne peut être le siège ni d’une transformation (en négligeant les pertes actives) ni d’un échange énergétique. Cependant les expressions obtenues quantifient des grandeurs physiques déterminées. En effet, on peut donner une interprétation physique plausible des valeurs ainsi obtenues; et en particulier, de la grandeur $Q = E.I\ b_1 = (EI/ð)sin^2á$. dite, dans différents travaux [18], puissance réactive.

Conformément aux conditions de Dirichlet, le courant dans le circuit à l’instant d’ouverture (ou de fermeture) du thyristor tend vers

$$i(\alpha) = \frac{i_{\alpha+0} + i_{\alpha-0}}{2} = \frac{I_m \sin\alpha + 0}{2} = \frac{I_m}{2}\sin\alpha\ , \qquad (1.28)$$

ce qui donne, à cet même instant, la puissance du circuit,

$$p(\alpha) = E_m \sin\alpha.\frac{I_m}{2}\sin\alpha = EI\sin^2\alpha \qquad (1.29)$$

En moyennant cette valeur sur l’intervalle correspondant, c. à.d. *ð*, on obtient

$$\frac{p(\alpha)}{\pi} = \frac{EI}{\pi}\sin^2\alpha = Q \tag{1.30}$$

Ainsi, peut-on dire que, ce qui est désigné par puissance réactive dans le circuit considéré, n'est, en fait, que la moyenne sur la période correspondante de la puissance active instantanée au moment de l'ouverture (fermeture) du thyristor. Cette conclusion est d'autant plus juste que l'expression (1.15) définit, en fait, une balance de puissances purement actives, y compris leurs sauts. En effet, la puissance active totale débitée dans le circuit donné est égale à

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T eidt = \frac{1}{T}\int_0^T ei_1dt = \frac{1}{T}\int_0^T \left[E_m I_m \sin\omega t\left(a_1 \sin\omega t - b_1 \cos\omega t\right)\right]dt = EIa_1 \tag{1.31}$$

D'autre part l'expression (1.20) permet d'obtenir,

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T eidt = \frac{1}{T}\int_0^T \left(u_{1R} + u_{1T}\right)i_1dt = P_{1R} + P_{1T}\ , \tag{1.32}$$

mais, en tenant compte de l'expression (1.19) on peut écrire

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T eidt = \frac{1}{T}\int_0^T \left(u_R + u_T\right)idt = \frac{1}{T}\int_0^T \left(\sum u_{nR} + \sum u_{nT}\right)\sum i_n dt = P_{1R} + \sum P_{nR} \tag{1.33}$$

avec,

$$\frac{1}{T}\int_0^T \sum u_{nT}\sum i_n.dt = P_{1T} + \sum_2^\infty P_{nT} = 0 \tag{1.34}$$

En comparant les expressions (1.32), (1.33) et (1.34) on peut déduire

$$P_{1T} = -\sum_2^\infty P_{nT} = \sum_2^\infty P_{nR} \tag{1.35}$$

On peut, immédiatement, faire remarquer conformément à l'expression (1.34), que le thyristor, en dehors des points de discontinuité, est nul, du point de vue énergétique.

Les égalités (1.35) permettent, en tenant compte de (1.22), de représenter la puissance du circuit comme suit,

$$s = s_{1R}+s_{1T} = (P_{1R}+\Sigma P_{nR}) - (P_{1R}+\Sigma P_{nR}) \,.\, \cos(2\omega t - 2\varphi_{1R}) + Q.\sin(2\omega t - 2\varphi_{1R}), \quad (1.36)$$

ou bien, en développant par rapport à la tension du réseau,

$$s = (P_{1R}+\Sigma P_{nR}) - (P_{1R}+\Sigma P_{nR}) \,.\, \cos(2\omega t) - Q.\sin(2\omega t) \quad (1.37)$$

De l'expression (1.37) et conformément à (1.30) et (1.34), il découle que la balance dans le circuit s'établit uniquement pour la puissance active.

1.5.2. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES INTEGRALES.

La balance de la puissance réactive dans le système, définie par l'expression (1.15) peut être analysée d'une autre manière. Les courbes sur la Fig.1.3 représentent, respectivement, la puissance instantanée totale du circuit $s = ei$ et la puissance instantanée définie par le courant fondamental $s = ei_1$. Les aires délimitées par ces courbes avec l'axe des temps, moyennées sur la période, déterminent les puissances actives correspondantes.

Ainsi, en intégrant les deux courbes dans l'intervalle de conduction et en moyennant sur la période T, on obtient, respectivement,

$$\frac{2}{T}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} ei\,dt = \frac{2}{T}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} E_m \sin\omega t . I_m \sin\omega t . dt = EIa_1 = P \quad (1.38)$$

$$\frac{2}{T}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} ei_1 dt = \frac{2}{T}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} E_m \sin\omega t . I_m \left(a_1 \sin\omega t - b_1 \cos\omega t\right). dt = EI\left(a_1^2 + b_1^2\right) = P_{1R} \quad (1.39)$$

Mais l'intégrale moyennée sur la période T, de la puissance $s = e.i,$ dans les intervalles de non-conduction, donne

$$\frac{2}{T}\int_{0}^{\alpha/\omega} e i_1 dt = a_1 - \left(a_1^2 + b_1^2\right) = P_{1T} = \sum P_{nR} \qquad (1.40)$$

Ainsi, la différence entre les puissances correspondantes aux aires délimitées par les courbes instantanées dans les intervalles de conduction est strictement égale à la puissance correspondante à l'aire délimitée, dans les intervalles de non-conduction, par la courbe de la puissance instantanée fondamentale du circuit,

$$P - P_{1R} = P_{1T} = \sum P_{nR} \qquad (1.41)$$

Il découle alors, des expressions (1.34), (1.38), (1.40) et (1.41), que la grandeur Q n'intervient dans la balance que dans les points de discontinuité. En effet, on peut le montrer d'une manière encore plus précise. La différentielle de la puissance (1.22) donne

$$ds = ds_{1R} + ds_{1T} \qquad (1.42)$$

où,

$$ds_{1R} = u_{1R} di_1 + i_1 du_{1R}$$
$$ds_{1T} = u_{1T} di_1 + i_1 du_{1T}$$

En intégrant sur la période T, l'expression (1.42), on obtient

$$\int_{(0)}^{(T)} ds = \int_{(0)}^{(T)} ds_{1T} = \int_{0}^{T} u_{1T}\frac{di_1}{dt}dt + \int_{0}^{T} i_1 \frac{du_{1T}}{dt}dt \qquad (1.42)$$

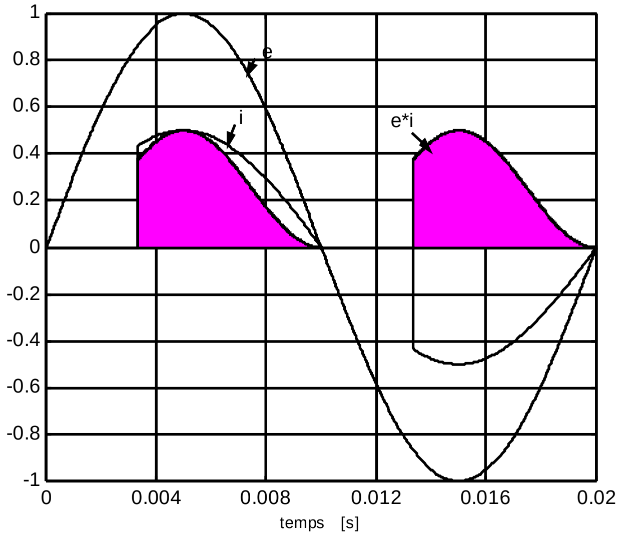
où,

$$\int_{(0)}^{(T)} ds_{1R} = 0 \ , \qquad (1.43)$$

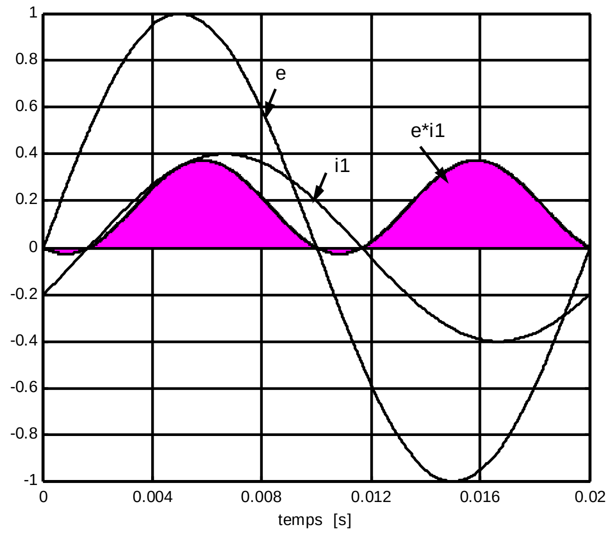
avec,

$$\int_{0}^{T} u_{1R}\frac{di_1}{dt}dt = \int_{0}^{T} i_1 \frac{du_{1R}}{dt}dt = 0 \qquad (1.44)$$

L'intégrale (1.42) donne



a



b

Fig.1.3. Puissances instantanées totale et fondamentale.

$$\int_{(0)}^{(T)} ds = \int_{(0)}^{(T)} ds_{1T} = 0$$

avec,

$$\int_0^T u_{1T} \frac{di_1}{dt} dt = -\int_0^T i_1 \frac{du_{1T}}{dt} dt = 2EI \sin^2 \alpha \tag{1.45}$$

En prenant la moyenne sur *2ð*, on obtient,

$$\frac{2EI \sin^2 \alpha}{2\pi} = \frac{EI}{\pi} \sin^2 \alpha \tag{1.46}$$

Les expressions (1.43), (1.44), (1.45) et (1.46) montrent clairement que la grandeur Q ne représente que la valeur, moyennée sur la période, de la puissance instantanée du circuit au moment de l'ouverture (ou fermeture) des thyristors.

1.6. APPROCHE PROPOSEE.

L'étude bibliographique développée montre, d'une manière générale, que certains aspects (relatifs à l'énergie réactive) des processus énergétiques dans les réseaux sont d'une ambiguïté encore discutable. Cependant, l'intention dans ce travail n'est pas d'approfondir cette analyse en l'orientant vers une remise en cause des différentes évaluations, relatives aux rapports des différents travaux dans ce domaine; mais de montrer et d'insister sur le fait que les résolutions des problèmes de contrôle ou de commande des régimes des systèmes d'énergie sont d'autant plus optimales, que les interprétations physiques, dont elles sont inévitablement tributaires, sont plus justes.

Ainsi, en tenant compte de ce qui a été déduit de l'analyse bibliographique et conformément à des réflexions propres à ce travail, il est jugé tout à fait plausible, pour résoudre cet « a priori » de paradoxe, impliqué, à notre sens, par un conflit de conformité entre déductions mathématiques et interprétations physiques, relatives à la notion de puissance réactive, de se défaire de cet aspect d'hypothèses paradoxales et de s'orienter vers une proposition de base plus générale.

A notre sens, donc, les propositions (1.1), (1.2) et (1.3) ne sont, nullement, contradictoires. Contrairement à ce qui pourrait être déduit et interprété des discussions et travaux autour de la question traitée, ces propositions ne doivent plus être considérées comme contradictoires. Elles ne comportent nullement de paradoxe ; mais, bien au contraire, elles n'expriment que des aspects complémentaires d'un même processus énergétique. Cette proposition est d'autant plus justifiée qu'un processus, aussi complexe que l'est l'échange énergétique dans les systèmes, ne peut être décrit par un seul paramètre.

Les expressions considérées convergent et font état d'intersection quand $n = 1$, c'est à dire, quand le régime est quasi-stationnaire, sans aucune pollution. Ces mêmes expressions divergent et prennent des valeurs différentes quand n   1 ou, d'une manière encore plus précise, quand le régime du système subit une perturbation qui implique un changement d'état caractérisé par l'apparition d'autres processus (transitoires non linéaire, harmonique…). Il est, donc, évident que, pour décrire et quantifier le processus énergétique dans son aspect résultant, il est nécessaire de tenir compte de l'impact de ces processus complémentaires qui viennent se superposer au régime stationnaire en polluant, ainsi, le régime résultant.

Cette proposition constitue, justement, l'intérêt essentiel dans cette thèse.

La divergence entre les formules données est due au changement d'état de la distribution des énergies libres du système. A notre sens, l'énergie électromagnétique totale qui se manifeste dans un système peut être décomposée en deux processus.

- processus dissipatif
- processus « conservatif »

Dans le premier, une partie de l'énergie sommaire, par une transformation en une autre forme qu'électromagnétique, se dissipe en sortant du système électrique. Cette énergie est quantifiée par la vitesse de transformation de l'énergie dite puissance active. Dans le processus « conservatif », la deuxième composante reste dans le système et s'établit, dans les éléments du système, sous différentes distributions qui peuvent être dans un état statique ou cinétique. En effet, dans certains circuits, suite à des lois de commande de leurs régimes, les charges peuvent se trouver, pendant les moments de non-conduction, dans un état de distribution statique et définir, ainsi, une présence d'énergie statique (potentielle). Pendant les intervalles de conduction, les charges, sous l'effet de forces extérieures, deviennent mobiles en commençant à se déplacer et expriment, par ce fait, une énergie cinétique en engendrant, alors, un échange énergétique, quantifié par ce qu'on appelle puissance réactive.

Dans les systèmes à paramètres de régime sinusoïdaux, la présence de l'échange énergétique peut être indiquée par l'équation

$$\int_{(0)}^{(T)} ds(t) = \int_{(0)}^{(T)} udi + \int_{(0)}^{(T)} idu = 0 \qquad (1.47)$$

qui se vérifie par

$$\int udi = -\int idu = 0 \ ; \qquad (1.48)$$

quand le circuit est purement actif ou bien par

$$\int udi = -\int idu \equiv Q\,, \qquad (1.49)$$

dans les autres cas.

Les expressions (1.48) et (1.49) signifient, respectivement, l'absence et la présence de l'échange d'énergie. En appliquant (1.47) sous la forme (1.3) au circuit simple (Fig.1.2.), et en tenant compte de la condition de Dirichlet pour la discontinuité donnée, on peut écrire,

$$\frac{1}{2\pi}\int_{(0)}^{(T)} udi = \frac{1}{2\pi}\int_{0}^{T} u\frac{di}{dt}dt + \frac{u_{(0)}}{2\pi}\frac{\left(i_{+0}+i_{-0}\right)}{2}.2 = -\frac{UI}{\pi}\sin^2\alpha + \frac{UI}{\pi}\sin^2\alpha = 0$$

Ce qui vérifie l'expression (1.48) et permet d'affirmer que dans le circuit considéré il y a absence de la puissance réactive d'échange. Par conséquent, la grandeur définie par l'expression (1.17) et soutenue comme puissance réactive ne l'est pas, en fait, mais recèle une autre signification physique. En effet, elle mesure, à notre sens, l'énergie statique « stockée » dans la distribution des charges du circuit pendant les intervalles de non-conduction. Cette grandeur est nulle pendant les intervalles de conduction dans le circuit ; puisqu'elle se dissipe instantanément dans R, et disparaît quand á est nul, pour la même raison.

1.7. CONCLUSION.

L’analyse bibliographique des travaux relatifs à la notion de l’énergie réactive montre que certains des aspects de cette dernière restent, encore, discutables. Ces aspects sont nettement décrits et évalués dans cette première partie de travail; ce qui permet d’affirmer que la résolution des questions relatives et d’autant plus importante que l’impact des contrôles des régimes par compensation est plus déterminant. Il découle, de cette première partie de travail et dans ce sens, la proposition d’une approche orientée vers la généralisation de la notion de l’énergie réactive. Dans cette nouvelle approche, les différentes hypothèses, avancées précédemment, trouveraient signification déterminante pendant les descriptions des processus énergétiques complexes; et les expressions intégrales qui en découlent pourraient être utilisées comme paramètres ou facteurs d’identification d’une installation électrique à régime complexe.