

E/ METHODES D'ETUDE

E 5

**INTRODUCTION AUX METHODES D'ETUDES
DES CONVERTISSEURS STATIQUES**

INTRODUCTION AUX METHODES D'ETUDES DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Les convertisseurs statiques gèrent l'énergie électrique dans des processus industriels de plus en plus variés et complexes. Ainsi, leurs structures se diversifient pour mieux satisfaire des exigences toujours plus poussées.

Il y a vingt ans, la compréhension du fonctionnement typique, en régime permanent établi de quelques convertisseurs classiques était l'apanage de spécialistes et seuls quelques initiés étaient susceptibles de faire un dimensionnement correct de composants. De très gros efforts ont été depuis lors consentis à la mise au point de méthodes d'études systématiques permettant de mieux appréhender les phénomènes complexes dont ils sont le siège.

L'étude par voie analytique des systèmes comprenant des convertisseurs statiques est difficile et ne peut être menée à bien que grâce à des hypothèses très simplificatrices. C'est pourquoi la simulation, analogique puis numérique, est rapidement apparue comme un moyen privilégié d'étude de ces ensembles.

Au sein du groupe convertisseurs statiques du LEEI, des outils de simulation ont été développés depuis une quinzaine d'années. L'accent a été mis sur des outils généraux, tant en analogique (procédé Cassis décrit au chapitre E 60), qu'en numérique (logiciels SACSO puis SCRIPT, ce dernier est décrit au chapitre E 70).

1/ METHODES D'ETUDES ANALYTIQUES ET REPRESENTATIONS GRAPHIQUES

1 - 1/ Méthodes d'études analytiques

Ces méthodes impliquent généralement la connaissance qualitative du fonctionnement à décrire. Cependant, par passage à la limite ou extrapolations, elles permettent parfois de mettre à jour des structures ou des régimes de fonctionnement nouveaux.

Ex 1 : une représentation synthétique des hacheurs à accumulation d'énergie électromagnétique est donnée sur la figure 1.

L'étude de ce circuit est très générale et englobe plusieurs cas particuliers. On fait aussi apparaître une structure peu courante de hacheur réversible en faisant $\alpha = 1$ et en plaçant les connexions du transformateur dans l'ordre B, A, C.

Ex 2 : l'étude analytique du fonctionnement en conduction discontinue des onduleurs triphasés à commandes disjointes (120° par exemple) amène à mettre en évidence 9 cas de fonctionnement différents par extrapolations successives des deux ou trois cas habituellement rencontrés.

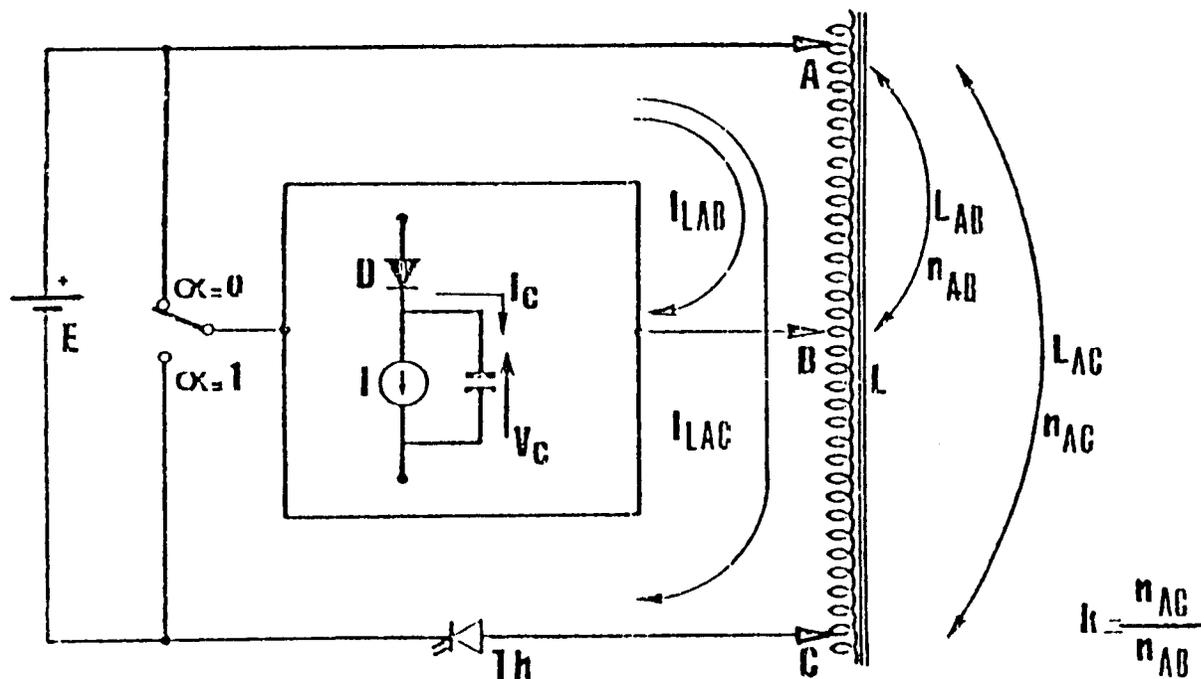


Figure 1

1-2/ Représentations graphiques

Les représentations graphiques sous formes d'abaques permettent une exploitation extrêmement aisée des résultats de calculs souvent fort complexes. La possibilité de travailler en unités réduites augmente encore la puissance de la méthode.

Ex : les divers abaques de conduction discontinue des redresseurs, des hacheurs et des onduleurs à commandes disjointes.

1-3/ Méthodes analytico-graphiques

Ces méthodes allient les avantages des deux formes de raisonnement.

Nous avons présenté en A 30 la méthode du plan de phase. Cette méthode valable pour l'étude de certains filtres de puissance, se justifie surtout dans l'étude des phénomènes de commutation forcée qu'elle isole du reste de la période. Elle présente un intérêt particulier lors des études de régime transitoire où les phénomènes successifs sont superposés.

Nous présentons en E 20 la méthode des composantes symétriques des valeurs instantanées. Cette méthode permet de donner une représentation du fonctionnement d'un onduleur triphasé analogue à celle des machines. Elle donne une vision plus synthétique et concentrée des phénomènes et de la conduction des divers éléments semiconducteurs. Elle permet ainsi d'étudier simplement la nature des commutations et les phénomènes de réversibilité.

Nous présentons en E 40 une méthode d'étude analytico-graphique des convertisseurs statiques. Cette méthode permet l'étude du fonctionnement séquentiel d'un convertisseur statique sans connaissance à priori sur le montage. Elle est très systématique et sa généralisation conduit aux méthodes de simulations numériques et analogiques.

2/ METHODES DE SIMULATION

On peut décomposer les méthodes d'étude des systèmes comprenant des convertisseurs statiques en deux familles : méthode d'étude fonctionnelle et méthode d'étude séquentielle.

2- 1/ Méthode d'étude fonctionnelle

Le convertisseur est considéré comme une "boîte noire", remplissant une fonction donnée (exemples : fonction hacheur, fonction onduleur). Le fonctionnement interne du convertisseur ne fait pas partie intégrante de l'étude mais c'est sa fonction qui permet l'analyse du comportement de l'ensemble source - convertisseur - charge - commande. Il est à noter que cette représentation fonctionnelle d'un convertisseur n'est pas toujours possible ; c'est le cas lorsqu'il y a une forte interdépendance entre le convertisseur et les autres organes du système (exemples : conduction discontinue, gradateur, alimentation en courant d'une machine électrique). Une étude fonctionnelle n'est donc possible que si les formes d'onde imposées par le convertisseur ne dépendent que des sources et des commandes des semi-conducteurs. On peut dire alors que le convertisseur est un "amplificateur" ou "transformateur" de la commande.

2-2/ Méthodes d'études séquentielles

Le convertisseur est alors considéré sous forme d'un réseau électrique maillé ; le fonctionnement global du système étudié est décomposé en une succession de séquences élémentaires définies par la conduction ou la non-conduction des semiconducteurs. Deux cas peuvent alors se présenter et ils donnent naissance à deux types de méthodes.

2-2-1/ Méthodes d'études séquentielles sans à priori (S. A. P.)

La connaissance sur le convertisseur étudié ne permet pas de préjuger de l'existence des différentes séquences de fonctionnement ni de leur enchaînement. On ne peut donc exclure à priori

aucune configuration (parmi les 2^n possibles pour un montage à n semi-conducteurs) et aucune transition entre ces configurations. Les interrupteurs sont modélisés de façon individuelle. L'enchaînement des séquences s'effectue automatiquement grâce aux propriétés fonctionnelles de ces modèles.

Ce type de méthode permet la mise au point d'outils de simulation autorisant en particulier l'étude : des nouvelles structures de convertisseurs - des régimes transitoires même très perturbés - de la sûreté de fonctionnement des convertisseurs

2-2-2/ Méthodes d'études séquentielles avec à priori (A. A. P.)

Une base de connaissance sur le convertisseur permet à priori d'exclure un certain nombre de séquences de fonctionnement et de limiter les tests de changement de séquences. Dans une configuration donnée, on ne prend en compte qu'un certain nombre de tests pré-établis à partir de la base de connaissance. Ce type de méthode permet l'étude de nombreux convertisseurs classiques. Son emploi est difficilement utilisable lors de la conception et l'analyse de nouveaux systèmes, ainsi que pour l'étude des défauts de fonctionnement (problème de l'extension de la base de connaissance) .

E 2 0

**REPRESENTATION COMPLEXE DU
FONCTIONNEMENT D'UN ONDULEUR**

REPRESENTATION COMPLEXE DU FONCTIONNEMENT D'UN ONDULEUR

I - DEFINITION DE LA REPRESENTATION COMPLEXE D'UN SYSTEME DE GRANDEURS TRIPHASEES

L'étude des systèmes triphasés en régime permanent ou transitoire demande d'une manière générale la connaissance des trois grandeurs de phase $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ Ces grandeurs peuvent être tensions, courants, flux, etc.

Si, comme c'est couramment le cas $x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) = 0$, deux de ces grandeurs sont indépendantes et on peut songer alors à une représentation complexe qui permet d'examiner en même temps leur évolution.

La somme de ces grandeurs étant nulle, on peut toujours mettre ces variables sous la forme :

$$x_1(t) = X \cos \psi$$

$$x_2(t) = X \cos \left(\psi - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$x_3(t) = X \cos \left(\psi - \frac{4\pi}{3} \right)$$

$X(t)$ et $\psi(t)$ étant les deux nouvelles variables indépendantes réelles qui peuvent être considérées comme le module et l'argument du nombre complexe $\bar{x} = X \cdot e^{j\psi}$. A partir des expressions précédentes, nous obtenons :

$$\bar{x} = X \cdot e^{j\psi} = \frac{2}{3} \left[x_1(t) + a x_2(t) + a^2 x_3(t) \right] \quad \text{avec } a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

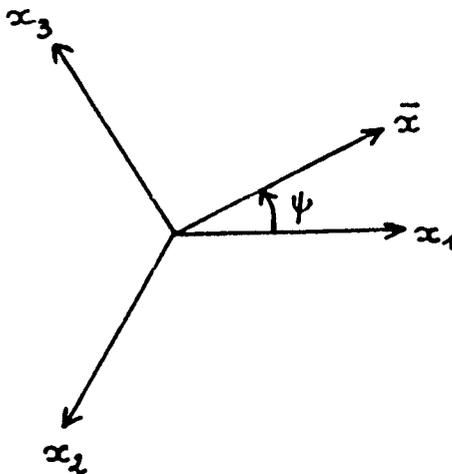


Figure 1

Inversement :

$$\begin{cases} x_1(t) = \Re(\bar{x}) \\ x_2(t) = \Re(a^2 \bar{x}) \\ x_3(t) = \Re(a \bar{x}) \end{cases}$$

ce qui signifie que x_1, x_2 et x_3 sont les projections de \bar{x} sur 3 axes à $\frac{2\pi}{3}$ (figure 1).

Le nombre complexe \bar{x} a pour partie réelle $A(t)$ et pour partie imaginaire $B(t)$.

$$\begin{cases} A(t) = \frac{2}{3} \left(x_1 + \frac{x_2 + x_3}{2} \right) \\ B(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} (x_2 - x_3) \end{cases}$$

La visualisation du lieu de l'extrémité du vecteur représentant \bar{x} peut être réalisée sur un oscilloscope dont les voies reçoivent respectivement les grandeurs $A(t)$ et $B(t)$.

Cette représentation est intéressante car elle permet de suivre l'évolution des grandeurs triphasées x_1, x_2, x_3 en examinant l'évolution du nombre complexe \bar{x} ou de son vecteur représentatif. Cette représentation connue sous le nom de composante symétrique des valeurs instantanées a une portée plus générale. En effet, les machines électriques triphasées sont caractérisées par des relations entre grandeurs électriques instantanées (tension, flux, courant). Dans le cas particulier où ces machines sont symétriques on montre qu'il y a une remarquable simplification de ces relations en utilisant la transformation complexe suivante.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x^+ \\ x^- \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

$x_0 \quad x^+ \quad x^-$ nouvelles variables
 $x_1 \quad x_2 \quad x_3$ anciennes variables

dont la transformation inverse est

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = h' \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x^+ \\ x^- \end{bmatrix}$$

x_0 est la composante homopolaire instantanée (séquence 0). x^+ (séquence positive) n'est autre que le \tilde{x} que nous avons déjà introduit (à un coefficient près éventuellement).

Quant à x^- (séquence négative), c'est x_+^*

Dans le cas d'une machine symétrique, les relations ne font intervenir que les variables d'une même séquence. De sorte que par exemple une machine triphasée pour laquelle les composantes homopolaires sont nulles, sera caractérisée par une équation statorique et une équation rotorique simples entre composantes tension v^+ et courants i^+ de séquence positive du stator et du rotor.

Cette représentation complexe a donc un double intérêt : une meilleure visualisation des phénomènes et une simplification des calculs en particulier lorsque des machines électriques tournantes interviennent dans le système.

Pour illustrer cette représentation, nous allons traiter l'exemple d'un onduleur triphasé à commande type 180° .

II - REPRESENTATION COMPLEXE DU FONCTIONNEMENT D'UN ONDULEUR TRIPHASE

Considérons l'onduleur triphasé de la figure 2 à commande du type 180° .

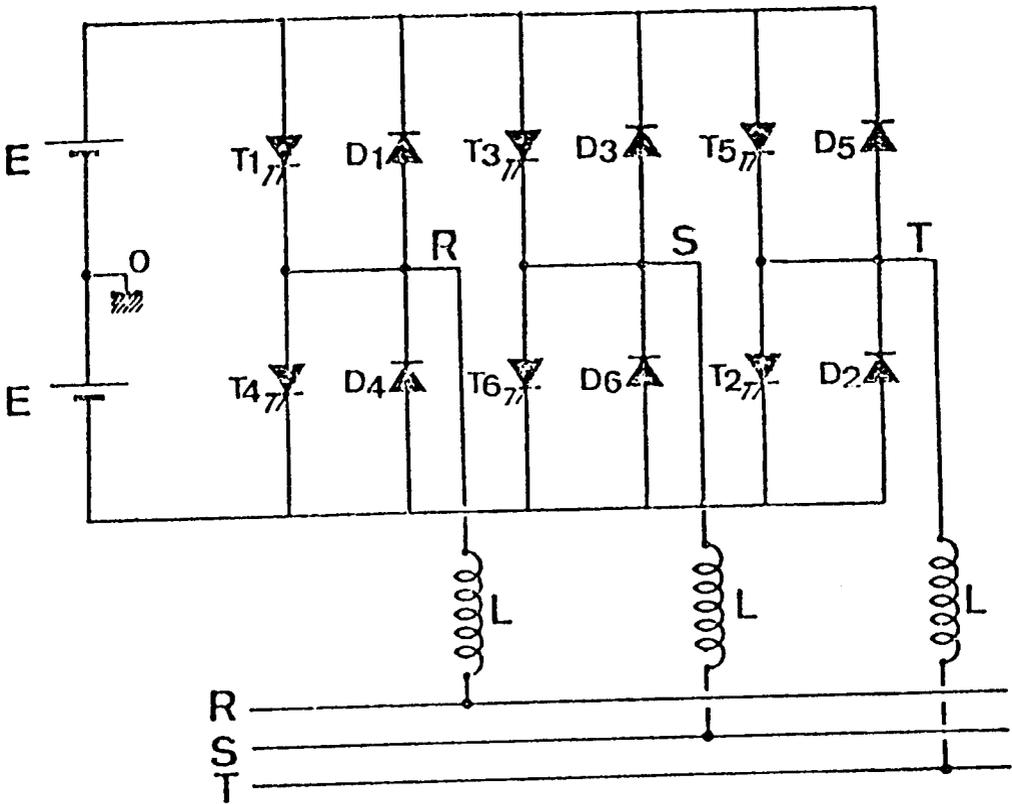


Figure 2

La succession des ordres de commande de cet onduleur est représenté dans le tableau de la figure 3.

II-1 - Représentation complexe des tensions

Voir tableau suivante.

numéro de séquence	Commandes			Tensions			Tension onduleur : $\bar{e}(i)$
				V_{Ro}	V_{So}	V_{To}	
1	T_1	T_6	T_2	+E	-E	-E	$\bar{e}(1) = \frac{4E}{3}$
2							
3	T_4	T_3	T_5	-E	+E	+E	$\bar{e}(2) = \frac{2E}{3}(1+j\sqrt{3})$
4							
5	T_1	T_6	T_2	+E	-E	-E	$\bar{e}(3) = \frac{2E}{3}(-1+j\sqrt{3})$
6							
1	T_4	T_3	T_5	-E	+E	+E	$\bar{e}(4) = -\frac{4E}{3}$
2							
3	T_1	T_6	T_2	+E	-E	-E	$\bar{e}(5) = \frac{2E}{3}(-1-j\sqrt{3})$
4							
5	T_4	T_3	T_5	-E	+E	+E	$\bar{e}(6) = \frac{2E}{3}(1-j\sqrt{3})$
6							
1	T_1	T_6	T_2	+E	-E	-E	$\bar{e}(1) = \frac{4E}{3}$
2							
2	T_4	T_3	T_5	-E	+E	+E	$\bar{e}(2) = \frac{2E}{3}(1+j\sqrt{3})$

Figure 3

On voit apparaître 6 séquences de fonctionnement numérotées de 1 à 6 auxquelles correspondent six états de l'onduleur définis par les potentiels de chaque phase.

La séquence 1 par exemple correspond à :

$$V_{Ro} = +E, \quad V_{So} = -E, \quad V_{To} = -E$$

Le vecteur tension représentant cette séquence est donc :

$$\bar{e}(1) = \frac{2}{3} [E + \alpha(-E) + \alpha^2(-E)] = \frac{4}{3} E$$

De même $\bar{e}(2) = \frac{2E}{3}(-1+j\sqrt{3})$

Les différentes valeurs de $\bar{e}(i)$ sont mentionnées dans le tableau de la figure 3 : la représentation dans le plan complexe de la tension de l'onduleur est donnée à la figure 4.

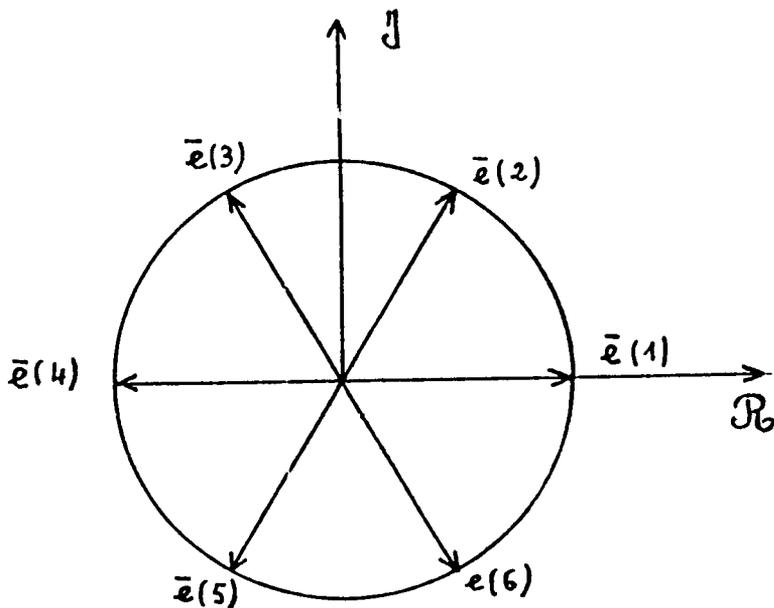


Figure 4

II-2 - Représentation complexe des courants

Si la tension de l'onduleur ne prend que des états discrets, par contre, le courant de cet onduleur décrit généralement (sauf sur charge purement résistive) une trajectoire, continue ou non, dont la forme dépend de la nature de la charge. On montre par exemple que sur charge passive inductive, cette trajectoire est un hexagone.

L'étude d'un onduleur sur charge passive permet certes d'acquérir des renseignements sur quelques fonctionnements particuliers mais ne peut illustrer tous ses fonctionnements possibles.

Nous envisageons donc le cas d'un onduleur connecté à une charge active.

De façon à simplifier la représentation, nous supposons que la charge active est un réseau alternatif sinusoïdal réversible et que les connexions onduleur-réseau se font au moyen de trois inductances L (figure 5a). Nous supposons de même que la source continue d'alimentation de l'onduleur est elle-même réversible. Le schéma équivalent de ce montage est celui de la figure 5b.

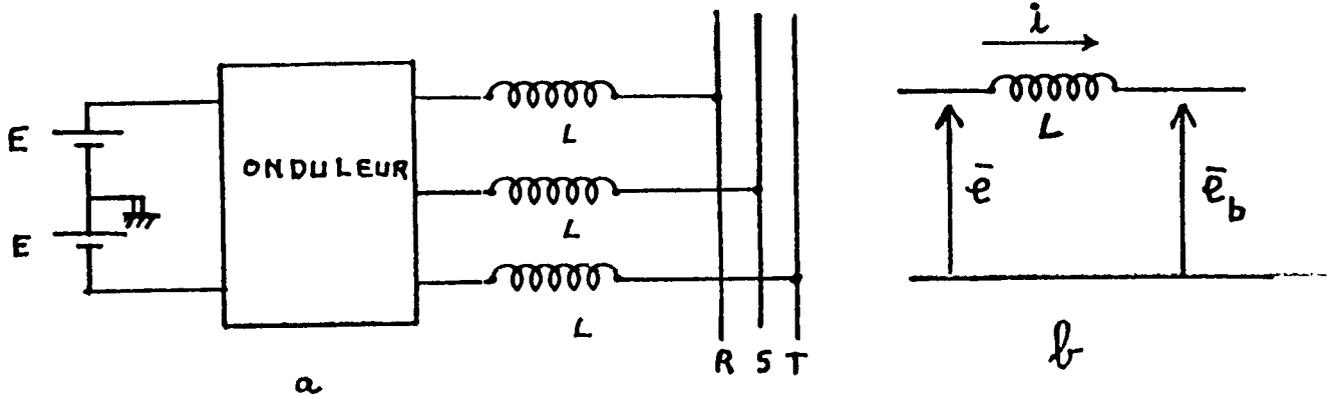


Figure 5

Soient :

e : tension de l'onduleur

e_b tension du réseau alternatif

i courant de l'onduleur

$e_b = E_b \cdot e^{j\omega t}$ avec E_b tension du réseau à l'instant d'origine

$$\bar{e} = \bar{e}_1 \cdot e^{j\omega t} + \Delta e \quad (1)$$

\bar{e}_1 tension fondamentale de l'onduleur

Δe tension harmonique regroupant tous les harmoniques de la tension onduleur

De la même manière on peut décomposer le courant en fondamental et somme des harmoniques.

$$i = i_1 e^{j\omega t} + \Delta i \quad (2)$$

i_1 courant fondamental

Δi ensemble des courants harmoniques

On remarquera que le fonctionnement de l'onduleur est cyclique se reproduisant identiquement à lui-même tous les sixièmes de période.

Il suffit donc d'étudier la trajectoire du courant sur cet intervalle de $\pi/3$ pour la connaître à tout instant. Choisissons de préférence l'intervalle d'étude N° 1 qui mène à une écriture simplifiée (tension réelle positive).

Ainsi :

$$i_1 = \frac{\bar{e}_1 - \bar{E}_f}{j L \omega} \quad (3)$$

$$\Delta i = \frac{1}{L} \int \Delta \bar{e} \cdot dt \quad (4)$$

Sachant que : $e(1) = \frac{4}{3} E$ réel $e_1 = \frac{4}{\pi} E \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}}$

et que : $\Delta i\left(\frac{\pi}{3\omega}\right) = \Delta i(0) e^{j\frac{\pi}{3}}$

on déduit des relations (1) et (2), (3) et (4).

$$\Delta i(t) = \frac{e}{L\omega} \left[\omega t + \frac{\pi}{3} e^{-j\frac{2\pi}{3}} + \frac{3}{\pi} e^{j(\omega t + \frac{\pi}{3})} \right] \quad (5)$$

L'addition de i_1 et Δi permet de faire à chaque instant la construction de la trajectoire du courant $i(t)$ dans un repère fixe. Si par contre on effectue le changement de repère défini par la relation

$$\xi_n(t) = \xi(t) e^{-j(\omega t - \frac{\pi}{6})}$$

où $\xi(t)$ et $\xi_n(t)$ représentent une même variable avant et après transformation, la construction de la trajectoire du courant devient alors beaucoup plus aisée.

En effet, pour la construction, i_{1n} est fixé et la trajectoire de $\Delta i_n(t)$ qui obéit à la relation :

$$\Delta i_n = j \frac{e}{L\omega} \left[\omega t + e^{-j(\omega t + \frac{\pi}{3})} - \frac{\pi}{3} \cdot e^{-j\omega t} + \frac{3}{\pi} \right]$$

peut être représentée par la courbe de la figure 6.

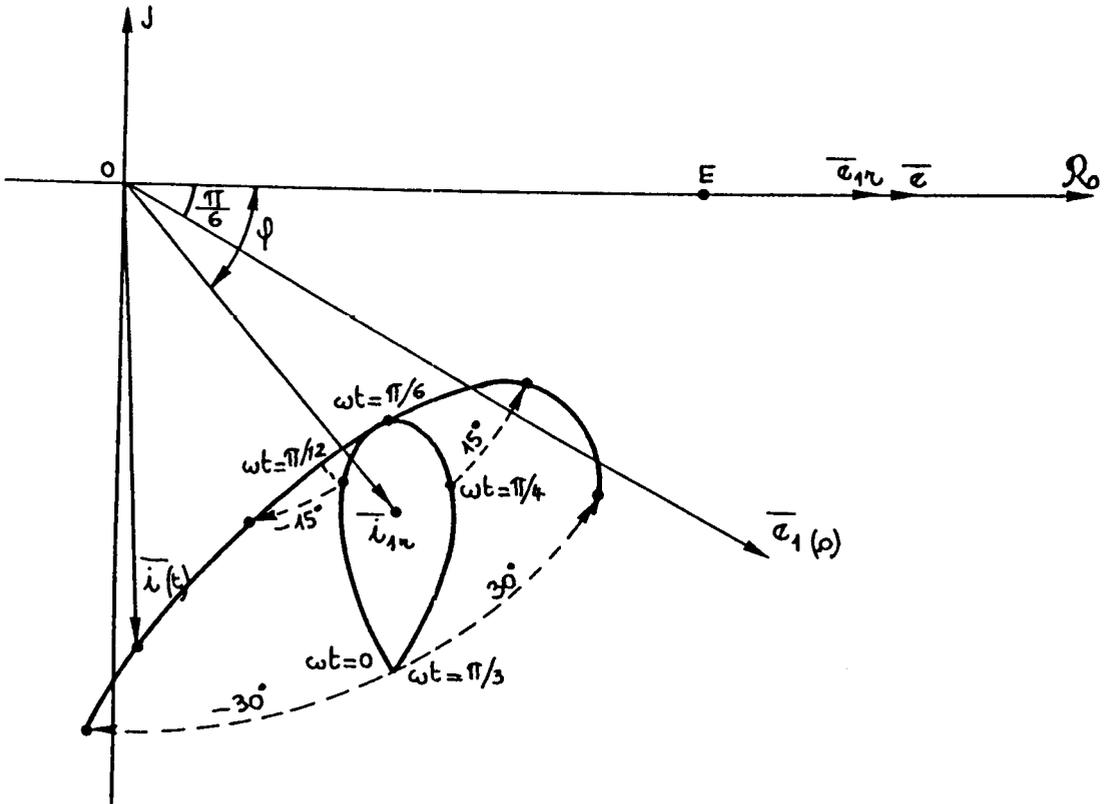


Figure 6

L'application de la transformation inverse permettant de revenir au repère initial s'effectue en opérant sur chaque courant ainsi trouvé une rotation $e^{j(\omega t - \frac{\pi}{6})}$

Un exemple de construction est fourni à la figure 6 dans le cas d'un déphasage arrière φ du courant par rapport à la tension. Le courant instantané dans une phase de l'onduleur est obtenu par projection du courant $i(t)$ sur l'axe de phase orienté correspondant. Le signe de la projection sur cet axe permet à tout instant de déterminer celui des deux composants (interrupteur ou diode) qui est conducteur.

Pour chaque phase l'axe perpendiculaire à l'axe de phase délimite donc deux demi plans correspondant chacun à un signe du courant dans la phase. Le plan complet peut donc être divisé en 6 secteurs correspondant chacun à un ensemble de signes de courant de phase déterminés.

On définit donc tout le fonctionnement de l'onduleur suivant la position initiale du courant lors de l'intervalle N° 1 considéré.

Représentons sur la figure 7 le schéma de principe de l'onduleur durant l'intervalle considéré. Les axes AA', BB' et CC' délimitent les 6 secteurs durant lesquels les signes des courants de phase sont invariants 01, 02, ... 06 représentent les tensions de l'onduleur.

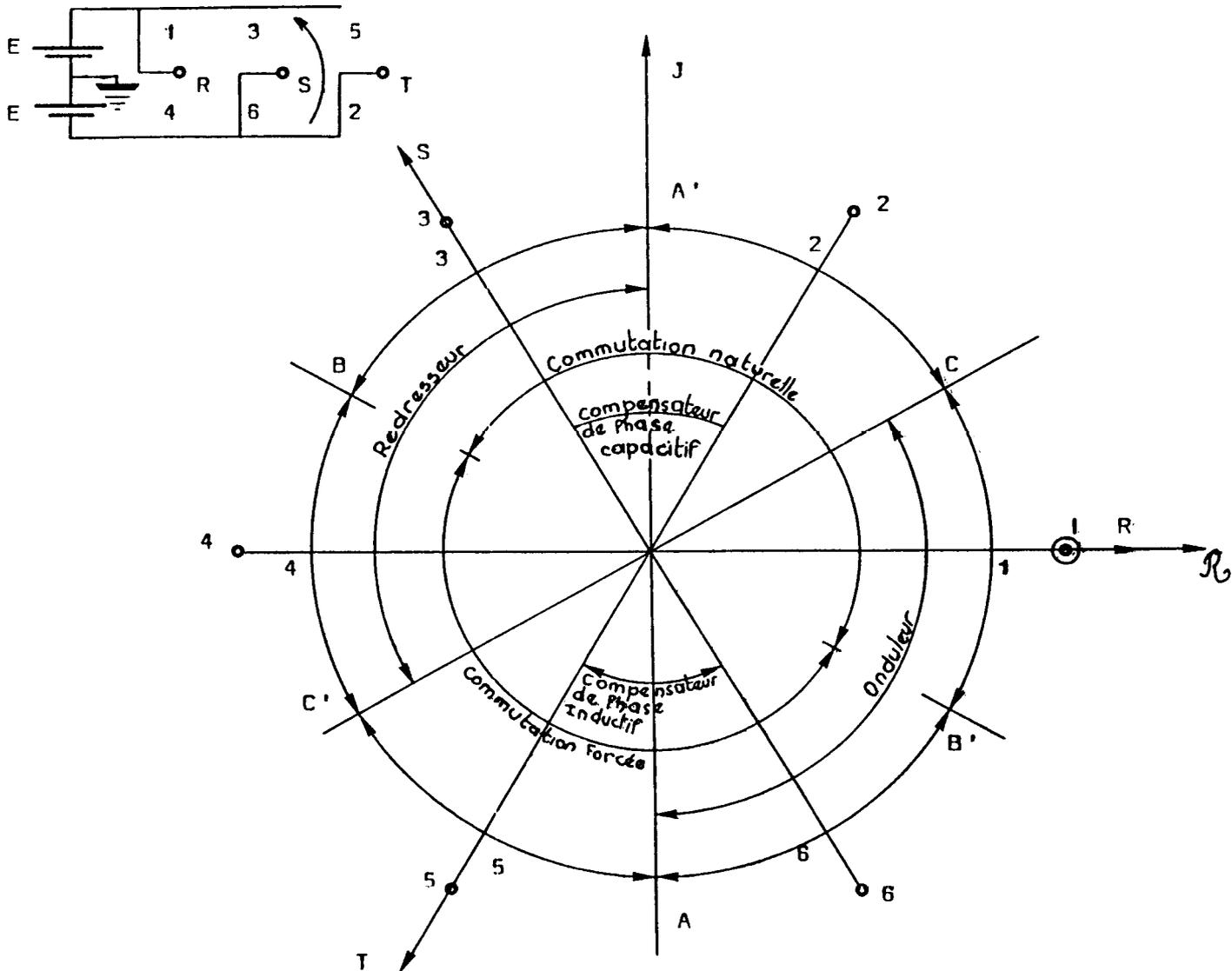


Figure 7

II-3 - Mode de fonctionnement du convertisseur

Si la position initiale du courant \bar{i} dans l'intervalle N° 1 considéré se situe dans les secteurs 6 ou 1 la position finale de ce courant se situera forcément dans le demi plan limité par l'axe AA' et englobant la phase R

Le courant de la phase R sera donc positif et passera donc par l'interrupteur 1. C'est un courant fourni par la source continue, le convertisseur fonctionne en onduleur.

Si par contre la position initiale du courant se situe dans les secteurs 3 ou 4, le même raisonnement amène à conclure au fonctionnement en redresseur du convertisseur.

Les secteurs 2 et 5 correspondent à des fonctionnements hybrides (mi redresseurs, mi onduleur) et seul un bilan en fin d'intervalle permet de conclure à la prédominance de l'un ou l'autre des fonctionnements.

Remarquons enfin que si la position initiale du courant i se situe sur l'axe de la phase T il s'en suivra un fonctionnement à puissance active nulle caractéristique des compensateurs statiques de phase (capacitifs ou inductifs).

II-4 - Mode de commutation du convertisseur

La séquence de commande du convertisseur indique que, à la fin de l'intervalle N° 1 considéré, la commutation s'effectuera de l'interrupteur 6 sur l'interrupteur 3.

Afin de définir le mode de commutation nécessaire il suffit de considérer le signe du courant de phase S à la fin de l'intervalle N° 1.

Si ce courant est positif, la commutation peut être naturelle ou assistée, dans le cas contraire la commutation doit être forcée.

L'axe BB' delimité les deux zones de commutation. Le courant i se trouvant en position initiale dans les secteurs 1, 2 ou 3 correspond

à une commutation naturelle ou assistée. Par contre dans les secteurs 4, 5 ou 6 la commutation devra être forcée.

Remarque : il faut noter que les données caractéristiques du problème étant le rapport des tensions réseau et onduleur et leur déphasage, le courant onduleur n'apparaît que comme grandeur intermédiaire. Il est donc préférable de caractériser les divers modes de fonctionnement du convertisseur sur un abaque tracé dans le plan des tensions et non dans celui des courants. L'équation (3) permet le passage d'un abaque à l'autre. Sur la Figure 8 est représenté l'abaque des tensions. A un point du plan complexe (définissant en amplitude et en phase la f.e.m. réseau par rapport à la tension onduleur) correspond un mode de fonctionnement et un seul du convertisseur.

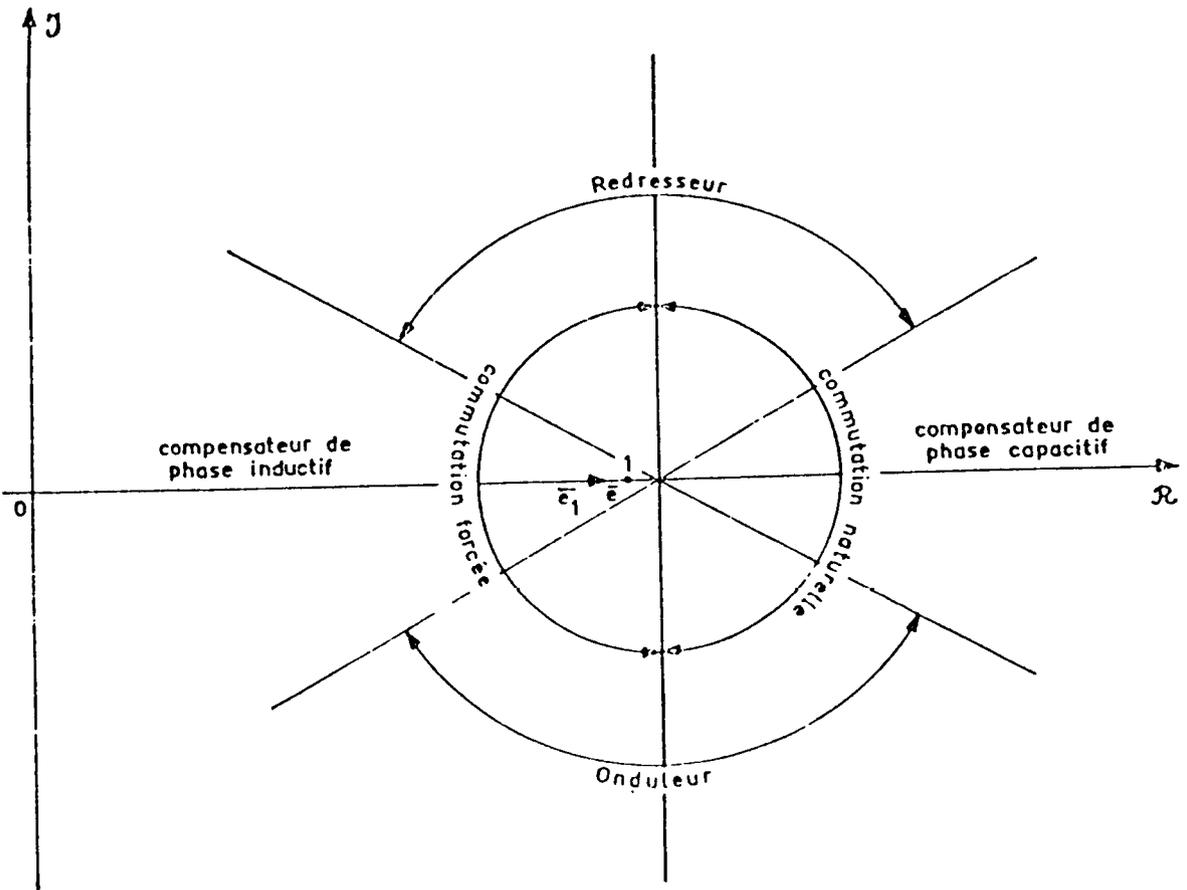


Figure 8