

**E 4 0**

**METHODE D'ETUDE ANALYTIQUE SEQUENTIELLE  
DES CONVERTISSEURS STATIQUES**

# METHODE D'ETUDE ANALYTIQUE

## DES CONVERTISSEURS STATIQUES

### 1/ INTRODUCTION

La façon dont est présentée en général l'étude des convertisseurs statiques est souvent reçue par les néophytes comme étant une science quelque peu ésotérique.

En effet, en dehors des changements d'état des semiconducteurs commandés, qui sont définis par la commande, les autres restent à "deviner" (ouverture des thyristors et des diodes, fermeture des diodes). C'est du moins ce qui apparaît si on n'utilise pas une méthode systématique.

Or, laissant de côté les régimes transitoires, les défauts, etc, les régimes permanents de ces montages sont par définition parfaitement reproductibles, et les différents semiconducteurs ne se trompent pas pour effectuer leurs changements d'état !

Cela signifie qu'une étude menée selon le même processus que celui suivi par les éléments du montage réel, doit aboutir à la solution.

Dans cet esprit, des méthodes de simulation numériques et analogiques ont été développées : elles font appel à des modèles de semi-conducteurs dont les changements d'état sont régis par les mêmes lois que dans le cas des éléments réels.

De la même façon, nous pouvons proposer une méthode systématique d'analyse du fonctionnement, en observant à chaque instant ce qui peut provoquer le changement d'état d'un ou de plusieurs semiconducteurs.

Mais, alors que pour les méthodes de simulation, on choisit en général pour les interrupteurs un modèle résistif binaire (résistance petite à l'état passant, résistance grande à l'état bloqué), on utilise pour une méthode analytique des interrupteurs idéaux : résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué. Ainsi une branche comprenant un interrupteur sera supprimée lorsque celui-ci sera bloqué.

Cela signifie donc que la topologie du circuit est variable, c'est-à-dire qu'à chaque séquence correspond un circuit électrique déterminé et a priori différent d'une séquence à l'autre.

### 2/ PRINCIPE DE LA METHODE ANALYTIQUE

Pour connaître le fonctionnement séquentiel d'un convertisseur il faut :

a/ déterminer ce qui provoque un changement de séquence

b/ savoir ce qui se passe durant une séquence.

Analysons ces deux points en détail :

Tout changement de séquence résulte de la commutation d'un ou de plusieurs semiconducteurs. Il faut donc connaître le processus de changement d'état des semiconducteurs : thyristors et diodes, le cas du transistor commandé à l'ouverture et à la fermeture est finalement plus simple.

Amorçage :

- Diode : lorsque la tension à ses bornes devient positive
- thyristor : lorsque la tension à ses bornes est positive ET qu'il reçoit un signal de gachette.

Blocage :

Diode et thyristor : lorsque le courant qui les traverse s'annule.

Ainsi pour déterminer le changement de séquence il faudra observer à chaque instant :

- *le courant dans tous les semiconducteurs qui conduisent*
- *la tension aux bornes des semiconducteurs qui ne conduisent pas*

Pour savoir ce qui se passe durant une séquence il est nécessaire de connaître l'évolution des variables d'état. Pour cela il faut d'abord déterminer l'ordre du système correspondant à chaque séquence, sachant qu'il est à priori variable puisque la topologie du circuit est variable.

### 3/ PLAN D'ETUDE

Pour effectuer l'étude analytique d'un convertisseur statique il faut effectuer un certain nombre d'opérations. Nous allons décrire ces opérations en renvoyant les remarques concernant chacune d'elles au paragraphe suivant.

#### 1°/ Recherche de l'ordre du système

L'ordre du système constitue une information essentielle pour connaître le type de réponse et prévoir ainsi l'évolution des variables d'état.

#### 2°/ Expression des tensions aux bornes des semiconducteurs bloqués et des courants dans les semiconducteurs passants en fonction des sources et des variables d'état.

Ces expressions seront nécessaires pour effectuer les tests de compatibilité et analyser les commutations possibles.

#### 3°/ Test de compatibilité

Cette opération est destinée à s'assurer de l'existence effective d'une séquence. Les tests portent sur tous les semiconducteurs, excepté celui qui vient de commuter. Toutes les tensions aux bornes des diodes bloquées doivent être  $< 0$  et tous les courants dans les semiconducteurs passants doivent être  $> 0$ .

#### 4°/ Evolution des variables d'état

Elle sera effectuée à partir de la connaissance du régime libre et du régime forcé en prenant pour conditions initiales les conditions finales de la séquence précédente.

#### 5°/ Evénements susceptibles de provoquer une commutation

Il s'agit de dégager les événements qui peuvent provoquer dans la séquence étudiée un ou

plusieurs changements d'état de semiconducteurs

#### 6°/ *Choix de l'évènement qui provoque la commutation*

Il s'agit de déterminer l'évènement qui doit se produire le premier, parmi tous ceux recensés au

5°.

### 4/ REMARQUES SUR LES DIFFERENTES OPERATIONS

Pour effectuer ces opérations avec facilité, Il est nécessaire de bien posséder les connaissances du chapitre : " Les outils de base de l'Electronicien de puissance "

- Opération N° 1 : Pour déterminer l'ordre correspondant à une séquence de fonctionnement on utilise le schéma équivalent correspondant au régime libre (système sans excitation). On effectue cette opération en premier lieu parce qu'elle permet de visualiser immédiatement les particularités rencontrées dans certaines séquences, par exemple les dégénérescences.

- Opération N° 2 : pour les semiconducteurs, les courants sont toujours comptés positivement dans le sens passant. Les tensions sont comptées positivement dans le sens inverse des courants (convention récepteur). On notera que le nombre d'expressions à écrire est égal au nombre de semiconducteurs.

Si un semiconducteur est polarisé en inverse par un autre qui est passant, on écrit une expression de la forme  $v_D = -v_T$ , considérant que lorsqu'un semiconducteur est conducteur il se comporte comme une source de tension.

- Opération N° 3 : cette opération est destinée à s'assurer de l'existence effective d'une séquence. On peut trouver en effet dès le début d'une séquence un courant négatif dans un semiconducteur ou une tension positive aux bornes d'une diode. Cela se manifeste par le fait que le changement d'état du semiconducteur qui vient de se produire a provoqué le changement d'état d'un ou plusieurs autres semiconducteurs. Ce nouvel état correspond à une nouvelle séquence. On recommence alors ces tests jusqu'à trouver une séquence où il y a compatibilité entre l'état des semiconducteurs et les valeurs des variables d'état.

Pour illustrer ces propos on se reportera aux séquences N° 3 bis et N° 6 bis du hacheur étudié dans le paragraphe suivant.

- Opération N° 4 : à partir de la connaissance des régimes libre et forcé et des conditions initiales de la séquence analysée, on effectue un tracé de l'évolution des variables d'état sans se préoccuper de la prochaine commutation. C'est l'opération la plus délicate de l'étude et, pour la réussir, la méthode du plan de phase est particulièrement efficace.

-Opération N° 5 : Il s'agit ici d'envisager tous les événements qui pourraient provoquer une commutation. Ils seront de trois types :

- a/ un courant semiconducteur qui devient égal à zéro
- b/ une tension semiconducteur qui devient égale à zéro
- c/ la présence d'un signal de commande

Cette opération correspond à un inventaire. Le choix de l'événement qui provoque la commutation est fait à l'opération suivante.

- Opération N° 6 : Il s'agit de déterminer l'événement qui doit se produire le premier parmi tous ceux recensés au 5°. Cette opération nécessite souvent de la réflexion et un minimum de connaissances des conditions de fonctionnement du système étudié.

## 5/ CHOIX DE LA PREMIERE SEQUENCE

Dans le cas des circuits à commutation forcée à thyristors, le choix de la première séquence présente une difficulté pédagogique. En effet, si l'on commence l'étude par une séquence où interviennent les circuits de commutation forcée, le problème risque de se poser de façon douloureuse car les circuits de commutation conduisent à des formes d'onde très variées.

Aussi, il semble plus raisonnable de choisir la première séquence parmi celles rencontrées dans l'étude des structures :

- celles où la charge est reliée à la source (phase active)
- celles où elle ne l'est pas (roue libre, récupération et éventuellement conduction discontinue)

Ainsi, pour simplifier l'étude, nous conviendrons donc de *prendre comme première séquence une phase active du convertisseur, c'est-à-dire une phase pendant laquelle le thyristor principal est conducteur, avec un circuit de commutation dans un état tel qu'il permette l'extinction de ce thyristor.*

Bien entendu cette règle n'est pas impérative et l'étude peut toujours être conduite en faisant un choix différent.

## 6/ ETUDE D'UN HACHEUR A THYRISTORS

Nous allons illustrer la méthode que nous venons de décrire en étudiant le hacheur représenté sur la figure 1. Pour bien distinguer les différentes séquences et bien montrer le caractère systématique de cette méthode nous utiliserons une page pour chaque séquence.

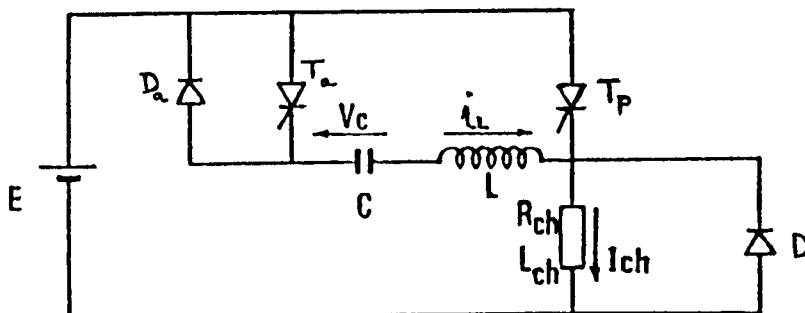
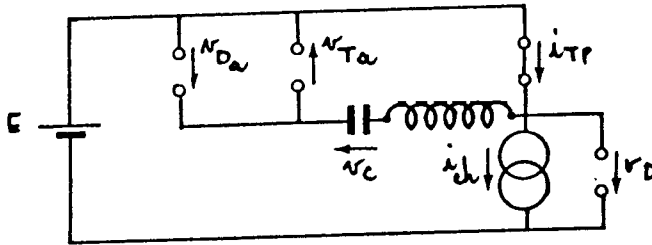


Figure 1

## SEQUENCE N° I



C'est la séquence où la charge est alimentée par la f.e.m. E. On suppose que le condensateur C présente une charge initiale  $v_{C0} < 0$

### 1 - Recherche du type de réponse

Le circuit oscillant n'évolue pas puisqu'il est ouvert

### 2 - Expression des tensions et des courants dans les semiconducteurs

$$v_{Ta} = -v_C \quad i_{Tp} = i_{ch}$$

$$v_{Da} = v_C$$

$$v_D = -E$$

### 3 - Tests de compatibilité

Les tensions  $v_{Da}$  et  $v_D$  sont négatives, le courant  $i_{Tp}$  est positif. Les tests sont donc positifs, cette séquence existe effectivement.

### 4 - Evolution des variables d'état

Les variables d'état sont : la tension  $v_C$  aux bornes du condensateur C et le courant  $i_L$  dans l'inductance

L. Les conventions de signe pour ces grandeurs sont précisées sur la figure 1.

Elles n'évoluent pas durant cette séquence.

### 5 - Evènements susceptibles de produire une commutation

$v_C$  étant  $< 0$ ,  $v_{Ta}$  est  $> 0$  et Ta s'amorcera s'il recoit un signal sur sa gachette

### 6 - Evènement provoquant la commutation

L'application d'un signal de gachette sur Ta provoque l'amorçage de ce dernier.

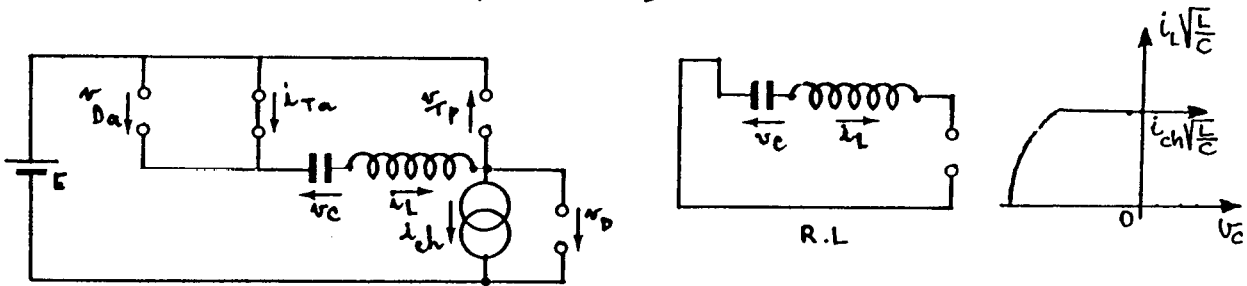
Conditions finales :  $v_C = v_{C0}$ ,  $i_L = 0$ . Nous verrons plus loin en étudiant la séquence N° 7 que

$$v_{C0} = -(E - i_{ch} \sqrt{L/C})$$

Remarque : dans cette séquence la variable  $i_L$  ne peut plus, en toute rigueur, être appelée variable d'état puisqu'elle est liée ( $i_L = 0$ ). Cependant pour simplifier nous utilisons toujours le même terme.

Conditions finales :  $v_C = v_{C1}$  et  $i_L = i_{ch}$

## SEQUENCE N°3



Dans cette séquence, le circuit oscillant se trouve en série avec la charge. Il y a charge du condensateur par le courant  $i_{ch}$ .

### 1 - Recherche du type de réponse

Le schéma équivalent du régime libre fait apparaître une dégénérescence car la variable  $i_L$  est liée ( $i_L = 0$ ). En se reportant au schéma réel avec les excitations on constate que  $i_L = i_{ch}$ .

### 2 - Expression des tensions et des courants dans les semiconducteurs

$$v_{Da} = -v_{Ta}$$

$$i_{Ta} = i_L$$

$$v_{Tp} = v_C + v_L = v_C \quad \text{car } i_L = i_{ch} = \text{Cte}$$

$$v_D = -E + v_C + v_L = -E + v_C$$

### 3 - Tests de compatibilité

$v_{Da} < 0$ ,  $v_D = -E + v_C$  est  $< 0$  avec  $v_C$ : valeur de  $v_C$  en début de séquence. Tests positifs, donc cette séquence existe.

### 4 - Evolution des variables d'état

On a  $i_L = i_{ch}$ , donc  $v_C = (i_{ch} t / C) + v_{C1}$ : c'est une charge à courant constant du condensateur.

### 5 - Evènements susceptibles de produire une commutation

A partir du moment où  $v_C$  est positif,  $T_p$  s'amorcera s'il a un signal positif sur sa gachette.

Si  $v_C = E$ ,  $v_D$  sera nul, il y aura amorçage de D.

### 6 - Evènement provoquant la commutation

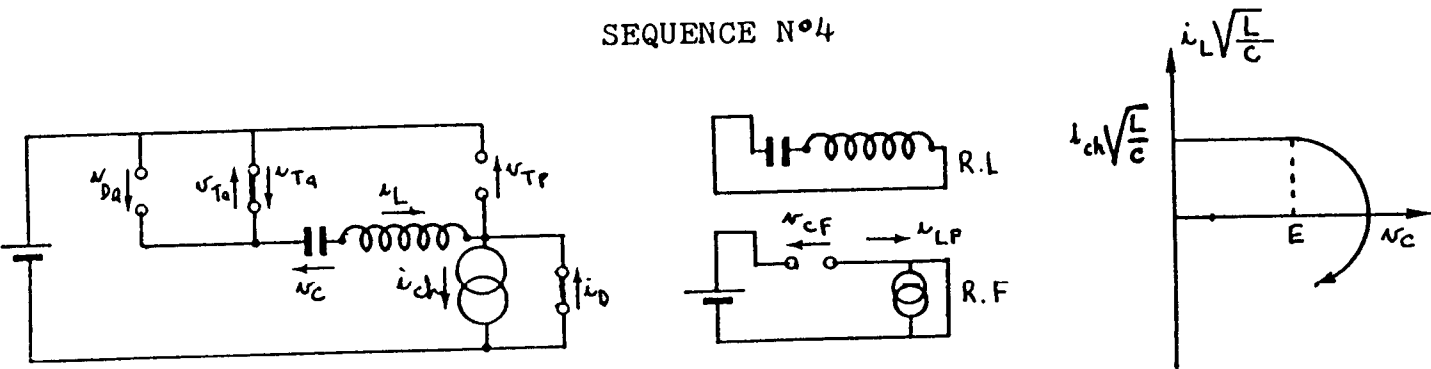
L'amorçage de  $T_p$  n'est pas souhaitable (perte de contrôle).

Un seul évènement possible en fonctionnement normal : l'amorçage de D lorsque  $v_C = E$

Conditions finales :  $v_C = E$  et  $i_L = i_{ch}$



## SEQUENCE N°4



C'est la phase de roue libre sur la charge et celle dans laquelle le circuit oscillant se trouve fermé sur E.

### 1 - Recherche du type de réponse

Le schéma équivalent du régime libre montre que l'on a un système du second ordre.

### 2 - Expression des tensions et des courants dans les semiconducteurs

$$v_{Da} = -v_{Ta}$$

$$i_{Ta} = i_L$$

$$v_{Tp} = E$$

$$i_D = i_{ch} - i_L$$

### 3 - Tests de compatibilité

$v_{Da} < 0$ ,  $i_{Ta} > 0$ . Les tests sont positifs, donc cette séquence existe effectivement. On n'a pas à faire de test sur la diode puisqu'elle vient de commuter.

### 4 - Evolution des variables d'état

Le schéma équivalent du régime forcé nous donne  $v_{CF} = E$  et  $i_{LF} = 0$ . Les conditions initiales sont  $v_C = E$  et  $i_L = i_{ch}$ . Ainsi l'évolution de ces variables est donnée par un cercle centré en  $(E, 0)$  et passant par le point  $(i_{ch}\sqrt{L/C}, E)$ .

### 5 - Evènements susceptibles de produire une commutation

$T_p$  s'amorce si l'on envoie un signal sur sa gachette.

$i_{Ta}$  se bloque si  $i_L = 0$

$i_D$  se bloque si  $i_{ch} = i_L$

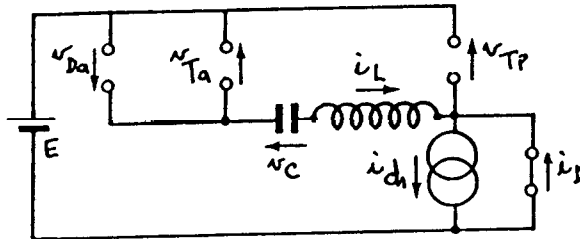
### 6 - Evènement provoquant la commutation

Il n'est pas souhaitable d'amorcer  $T_p$  car cela entraînerait une perte de contrôle.

On voit, sur le plan de phase, que l'évènement  $i_L = 0$  a lieu après 1/4 de période alors que  $i_L = i_{ch}$  se produit au bout d'une période complète. Il y aura donc extinction de  $T_p$  lorsque  $i_L = 0$ .

Conditions finales  $i_L = 0$   $v_C = E + i_{ch}\sqrt{L/C}$

## SEQUENCE N°4bis



C'est une séquence instantanée qui n'a pas d'existence physique .

### 1 - Recherche du type de réponse

Le circuit oscillant est ouvert, les variables d'état n'évoluent pas.

### 2 - Expression des tensions et des courants dans les semiconducteurs

$$v_{Da} = v_C - E$$

$$i_D = i_{ch}$$

$$v_{Tp} = E$$

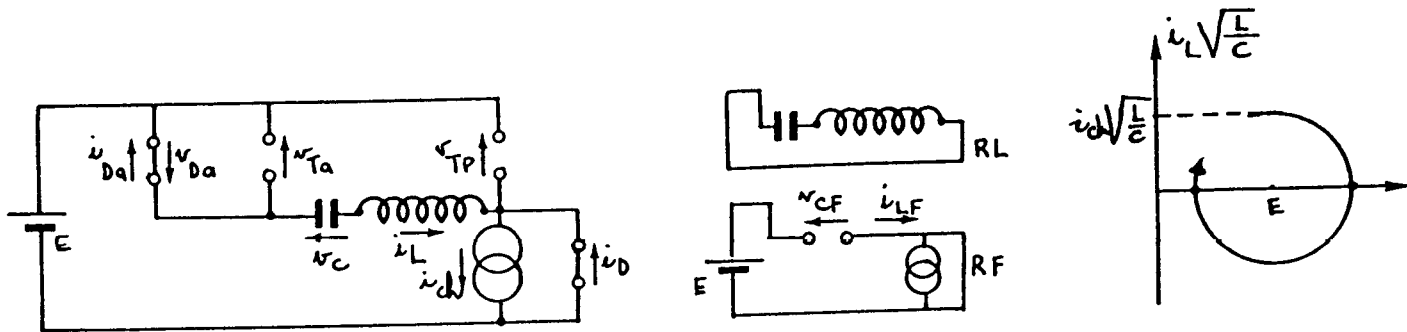
$$v_{Ta} = E - v_C$$

### 3 - Tests de compatibilité

La tension aux bornes de  $T_a$  est négative puisqu'elle est égale à  $E - v_C$  avec  $v_C = E + i_{ch} \sqrt{L/C}$  .

Ainsi la tension  $v_{Da} = v_C - E$  est positive, donc cette diode s'amorce instantanément dès que  $T_a$  se bloque. Cette séquence n'a donc pas d'existence physique.

## SEQUENCE N°5



C'est une séquence de roue libre sur la charge, dans laquelle le circuit oscillant se trouve fermé sur E.

### 1 - Recherche du type de réponse

Le schéma équivalent du régime libre montre que l'on a un système du deuxième ordre

### 2 - Expression des tensions et des courants dans les semiconducteurs

$$v_{Ta} = -v_{Da}$$

$$i_{Da} = -i_L$$

$$v_{Tp} = E$$

$$i_D = i_{ch} - i_L$$

### 3 - Tests de compatibilité

$i_D > 0$  puisque  $i_L = 0$ . Pas de test sur Da puisqu'elle vient de commuter. Cette séquence existe.

### 4 - Evolution des variables d'état

Comme dans la séquence 4, le régime forcé est  $v_{CF} = E$ ,  $i_{LF} = 0$ . L'évolution des variables  $v_C$  et  $i_L$  est donnée par un cercle centré en  $(E, 0)$  et passant par le point  $(E + i_{ch}\sqrt{L/C}, 0)$ . On notera que c'est le même cercle que celui de la séquence 4.

### 5 - Evènements susceptibles de produire une commutation

Si  $i_L = 0$ , Da se bloque.

Si  $i_L = i_{ch}$ , D se bloque

### 6 - Evènement provoquant la commutation

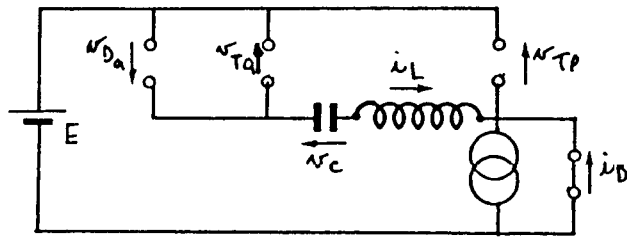
L'évènement  $i_L = 0$  nécessite  $1/2$  période.

L'évènement  $i_L = i_{ch}$  nécessite  $3/4$  de période.

C'est donc lorsque  $i_L = 0$  que la diode Da se bloque.

Conditions finales :  $v_C = E - i_{ch}\sqrt{L/C}$ ,  $i_L = 0$ .

## SEQUENCE N°6



C'est la séquence de roue libre sur la charge

### 1 - Recherche du type de réponse

Le circuit oscillant n'évolue pas puisqu'il est ouvert :  $v_C = E - i_{ch} \sqrt{L/C}$ ,  $i_L = 0$

### 2 - Expression des tensions et des courants dans les semiconducteurs

$$v_{Da} = v_C - E \quad i_D = i_{ch}$$

$$v_{Ta} = E - v_C$$

$$v_{Tp} = E$$

### 3 - Tests de compatibilité

$v_{Da}$  est négatif puisqu'en début de séquence  $v_C = E - i_{ch} \sqrt{L/C}$ ,  $i_D > 0$ , donc les tests sont positifs, cette séquence existe.

### 4 - Evolution des variables d'état

Elles n'évoluent pas durant cette séquence.

### 5 - Evènements susceptibles de produire une commutation

$E - v_C$  est  $> 0$ , ainsi, s'il y a un signal de gachette sur  $Ta$ , ce dernier s'amorce.

$E$  est  $> 0$ , ainsi, s'il y a un signal de gachette sur  $Tp$ , ce dernier s'amorce.

Si  $i_{ch} = 0$  la diode  $D$  se bloque.

### 6 - Evènement provoquant la commutation

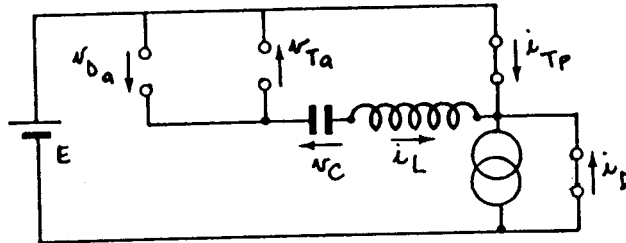
Il n'est pas souhaitable d'amorcer  $Ta$ , sinon on se retrouve dans les conditions de la séquence 4.

Si l'évènement  $i_{ch} = 0$  a lieu avant l'envoi d'une impulsion sur la gachette de  $Tp$ , on a une conduction discontinue que nous n'envisageons pas.

Un seul évènement possible, l'amorçage de  $Tp$  par un signal de gachette.

Condition finale :  $v_C = E - i_{ch} \sqrt{L/C}$ ,  $i_L = 0$ .

## SEQUENCE N° 6 bis



C'est une séquence instantanée qui n'a pas d'existence physique .

### 1 - Recherche du type de réponse

Le circuit oscillant n'évolue pas puisqu'il est ouvert.

### 2 - Expression des tensions et des courants dans les semiconducteurs

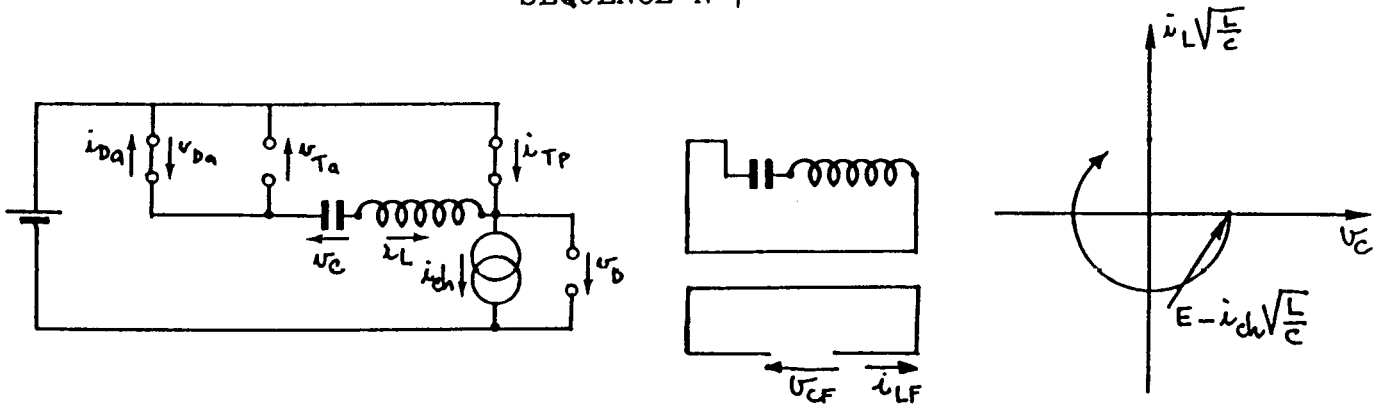
$$\begin{aligned} v_{Ta} &= -v_C & i_{Tp} &= i_{cc} \text{ courant de court-circuit de } E \\ v_{Da} &= v_C & i_D &= -i_{cc} \end{aligned}$$

### 3 - Tests de compatibilité

$i_D < 0$  puisqu'il est égal à  $i_{cc}$  : la diode D se bloque instantanément.

$v_{Da} > 0$ , la diode Da s'amorce instantanément. Cette séquence n'existe pas . Dès que  $T_p$  s'amorce, D se bloque et  $D_a$  s'amorce.

## SEQUENCE N°7



C'est la séquence d'inversion de polarité du condensateur .

### 1 - Recherche du type de réponse

C'est le régime libre du circuit oscillant, donc un système du second ordre.

### 2 - Expression des tensions et des courants dans les semiconducteurs

$$v_{Ta} = -v_{Da} \quad i_{Tp} = i_{ch} - i_L$$

$$v_D = -E \quad i_{Da} = -i_L$$

### 3 - Tests de compatibilité

$v_D < 0$  ,  $i_{Tp} > 0$  . Pas de test sur  $i_{Tp}$  puisqu'il vient de commuter. Les tests sont positifs, cette séquence existe effectivement.

### 4 - Evolution des variables d'état

Le régime forcé est :  $v_{CF} = 0$  ,  $i_{LF} = 0$  . La réponse du système est donnée par le cercle centré à l'origine et passant par le point  $(v_C = E - i_{ch} \sqrt{L/C} , i_L = 0)$  .

### 5 - Evènements susceptibles de produire une commutation

Si  $i_L = i_{ch}$  ,  $T_p$  s'ouvre.

Si  $i_L = 0$  ,  $D_a$  se bloque.

### 6 - Evènement provoquant la commutation

L'évènement  $i_L = i_{ch}$  nécessite  $3/4$  de période , l'évènement  $i_L = 0$  nécessite  $1/2$  période. C'est donc le passage par zéro de  $i_L$  qui provoque le blocage de  $D_a$ .

Condition finale :  $v_C = -(E - i_{ch} \sqrt{L/C})$  ,  $i_L = 0$  .

Après la séquence N° 7 on retrouve la séquence N° 1 avec comme conditions initiales :

$$v_{CO} = -(E - i_{ch} \sqrt{L/C}), \quad i_L = 0$$

La figure 2 donne la représentation, dans le plan de phase, de l'ensemble des 7 séquences. Sur le dessin, chaque séquence est repérée par son N° correspondant, placé à l'intérieur d'un cercle.

De ce diagramme, on déduit les courbes  $v_C(t)$  et  $i_L(t)$ . Pour ce travail on se reportera au paragraphe 3-2-1 du chapitre : "Outils de base".

De ce tracé on peut déduire les courbes relatives aux variables secondaires, par exemple :

$$v_{Tp}, v_{Ta}, i_{Tp}, i_{Tp} \text{ et } v_{ch}$$

Remarque : La durée de la commutation est très courte devant celle des autres séquences. Sur les figures, pour des raisons de clarté du dessin, nous avons volontairement augmenté le temps de commutation.

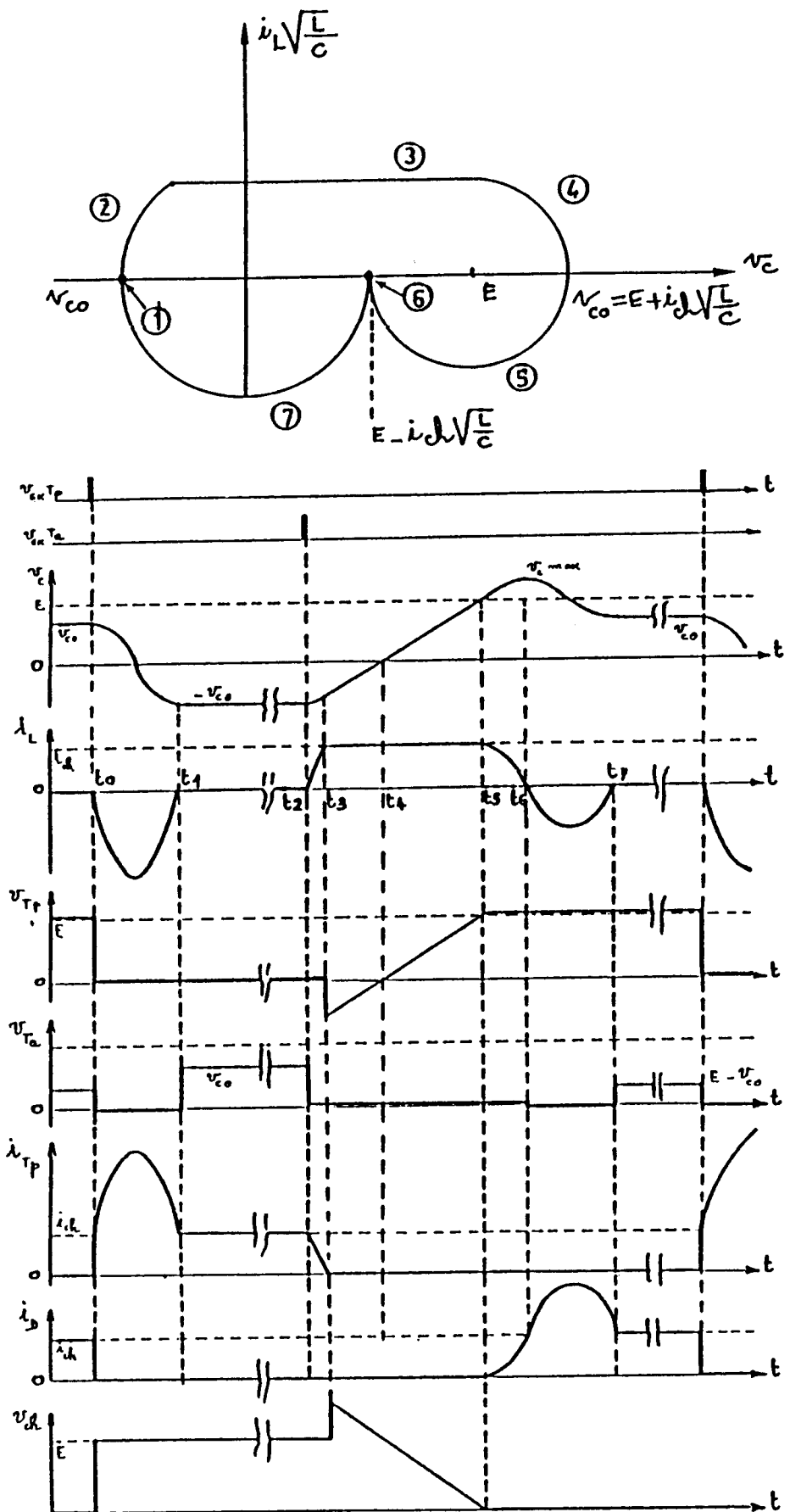


Figure 2



### 3-2-2/ Pas de calcul

La détermination des matrices d'état discrètes n'impose aucune contrainte pour le choix du pas de calcul au niveau de la précision des points calculés.

La résolution d'un système multilinéaire, c'est-à-dire dans notre cas la prise en compte du comportement des semiconducteurs (phénomènes de commutation), pose le problème de la détermination du changement de modèle (changement de configuration ou de séquence).

Il est donc important de déterminer avec précision l'instant de changement d'état des semiconducteurs.

Les changements d'état de semiconducteurs peuvent être scindés en deux grandes familles :

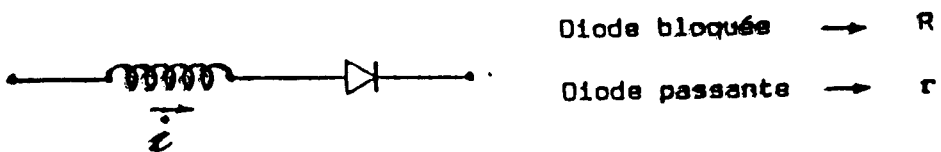
- changements d'état commandés : ils sont provoqués par un ordre de commande.
- changements d'état spontanés : ils sont "issus" du franchissement d'une valeur

caractéristique du semiconducteur.

#### 3-2-2-1/ Changements d'états commandés

Les instants de commande étant parfaitement connus, ce type de changement d'état ne pose pas de problème. A chaque pas de calcul, on observe si un semiconducteur va être commandé dans le pas suivant. Dans l'affirmative, on vient se caler sur cet instant de commande où l'on calcule les vecteurs d'état et de sortie. On détermine alors la nouvelle configuration.

#### 3-2-2-2/ Changements d'état spontanés



A l'extinction de la diode, apparition d'un  $\frac{dv}{dt}$  dans le circuit.

$$\frac{dv}{dt} = R1 - r1$$

Figure 10

Ils sont issus du franchissement des valeurs caractéristiques provoquant une commutation ou un fonctionnement dégradé (dépassement des plages limites de fonctionnement) de l'interrupteur considéré.