

SECOND PROBLÈME

ÉLECTROTECHNIQUE

INTRODUCTION

L'objectif de ce problème est de proposer une démarche formelle pour la modélisation des convertisseurs statiques d'électronique de puissance et la conception de leur commande. Cette approche suppose la définition d'un certain nombre de notions (fonction de connexion, conversion ...) et l'utilisation d'outils : réseau de Petri pour décrire le fonctionnement séquentiel d'un convertisseur, Graphe Informationnel de Causalité. Celui-ci est présenté progressivement durant l'étude comme une aide à la modélisation des systèmes physiques et à la conception des structures de commande.

L'ensemble de cette démarche est d'abord utilisée sur une cellule de commutation élémentaire puis étendu à des convertisseurs plus complexes pour aboutir à la modélisation et la commande d'un convertisseur multiniveaux. Bien qu'il y ait une progression dans le problème, les parties I, II et III sont relativement indépendantes.

PARTIE I : MODELISATION ET COMMANDE DES CONVERTISSEURS MONOPHASES

1. Description d'une cellule de commutation

La figure 1 présente la structure d'une cellule de commutation reliant une source de courant (charge R,L,e) à une source de tension. On suppose dans la suite de l'étude que la tension u_s est toujours positive. Les interrupteurs sont idéalisés et commandables à l'ouverture et à la fermeture : chute de tension nulle à l'état passant, courant nul à l'état bloqué, durée nulle des changements d'état ; ils apparaissent donc comme des éléments neutres d'un point de vue énergétique. D'une manière générale, ils sont numérotés de la manière suivante :

K_{ci} avec : c : n° de la cellule,
 i : n° de l'interrupteur dans la cellule.

1.1 Fonctions de connexion

A chaque interrupteur K_{ci} , on associe une fonction de connexion f_{ci} qui représente son état :

- Interrupteur ouvert : $f_{ci} = 0$
- Interrupteur fermé : $f_{ci} = 1$

Pour cette première application, il n'y a qu'une seule cellule, l'indice 'c' est donc égal à 1.

Question 1.1 : Dans le cas où les grandeurs de source u_s et i_s ne sont pas nulles, établir la relation qui doit exister entre les états des interrupteurs d'une même cellule : f_{11} et f_{12} pour en assurer le bon fonctionnement.

1.2 Analyse du fonctionnement d'une cellule de commutation

On suppose maintenant et dans la suite de l'étude **que la source de tension est unidirectionnelle et la source de courant bidirectionnelle**. Les interrupteurs (K_{1i}) du

convertisseur présentés ci-dessus sont alors constitués d'un transistor (T_{1i}) associés à une diode (D_{1i}) en antiparallèle (cf. figure 2), la commande de l'interrupteur est appelée B_{1i} .

Question 1.2 a : Justifier ce choix en s'appuyant sur les contraintes électriques qui s'appliquent à l'interrupteur.

On se propose de décrire le fonctionnement séquentiel d'une cellule de commutation au moyen d'un réseau de Petri (cf. figure 3). Le principe est le suivant : on associe une place au semi-conducteur en conduction. Le jeton (\bullet) matérialise la place active, il se déplace lorsque l'une des conditions de transitions, de cette place vers une autre, est activée.

Ex : A l'instant initial, le jeton est en place 0, aucun interrupteur ne conduit. Dans le cas où la tension u_s est supérieure à la tension e , l'application d'une commande B_{11} sur le transistor T_{11} entraîne sa mise en conduction, le jeton passe alors en place 1_T . La condition de transition : t_{01T} s'écrit : $(B_{11} = 1)(u_s > e)$. L'activation des transitions t_{1T1D} (resp. t_{1T2D}) entraîne ensuite un changement de place vers les places 1_D (resp. 2_D).

Question 1.2 b : On souhaite étudier les conditions de transitions entre les interrupteurs K_{11} et K_{12} de la cellule de commutation n°1. Expliciter les conditions de transition définies en figure 3 en fonction de l'état du courant i_s ($i_s > 0$ ou $i_s < 0$), de son changement de signe ($i_s \downarrow 0$ pour i_s tend vers zéro par valeur décroissante ou $i_s \uparrow 0$ pour i_s tend vers zéro par valeur croissante), l'état de la tension u_s par rapport à e ou de l'action sur les commandes ($B_{1i} = 0$ ou $B_{1i} = 1$).

Question 1.2 c : Pour quelles places a-t-on $f_{11} = 1$?
Pour quelles places a-t-on $f_{12} = 1$?

Question 1.2 d : Caractériser les différentes natures de commutations entre les composants ?

Question 1.2 e : On représente sur le document réponse n°1, une forme d'onde de courant et les commandes des transistors. Tracer sur les graphes inférieurs de ce document :

- les semi-conducteurs ($T_{11}, D_{11}, T_{12}, D_{12}$) qui conduisent,
- l'évolution de la fonction de connexion f_{11} ,
- l'évolution de la fonction de connexion f_{12} .

Question 1.2 f : Quelle est la condition théorique à appliquer sur les commandes B_{11} et B_{12} pour que l'état des interrupteurs soit identique à celui des commandes ?
Pourquoi ne peut-on pas l'appliquer à tout instant dans la pratique ?

Dans la suite de l'étude, nous supposerons la condition théorique satisfaite de telle sorte que l'on assimilera la fonction de connexion f_{1i} à la commande de l'interrupteur B_{1i} .

2. Association de deux cellules de commutation

2.1 Fonctions de conversion

La figure 4 présente l'association de deux cellules de commutation. Les variables u_m et i_m apparaissent comme des grandeurs issues de la modulation des variables d'état u_s et i_s . Ainsi, nous définissons une grandeur appelée, fonction de conversion telle que :

$$\begin{aligned} i_m &= m i_s \\ u_m &= m u_s \end{aligned}$$

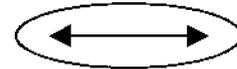
Question 2.1a : Quels sont les différents niveaux possibles pour m ?

Question 2.1b : En utilisant la loi des nœuds ou la loi des mailles, déterminer la relation qui existe entre les fonctions de connexion (f_{1l} et f_{2l}) et la fonction de conversion ?

Remarque : Cette relation est appelée : relation de conversion.

On propose une description du convertisseur sous forme de Graphe Informationnel Causal (cf. figure 5). Chaque processeur (représenté par un ovale sur la figure) matérialise une fonction de la partie opérative. Nous distinguons deux types de relation :

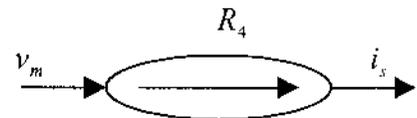
➤ Les relations instantanées (flèches bidirectionnelles):



$$\begin{aligned} R_1 & \quad m = R_1(f_{1l}, f_{2l}) && \text{relation de conversion,} \\ R_{2u} & : \quad u_m = m u_s && \text{modulation de la tension,} \\ R_{2i} & : \quad i_m = m i_s && \text{modulation du courant.} \\ R_3 & : \quad v_m = e - u_m \end{aligned}$$

➤ Les relations causales (flèches unidirectionnelles) sont associées aux éléments de stockage d'énergie dans le système considéré et sont représentées par une équation différentielle du premier ordre.

$$R_4 : \quad L \frac{di_s}{dt} + R i_s = v_m$$



Le modèle global du processus résulte de l'assemblage de plusieurs processeurs. Cette forme de représentation graphique met en évidence les différentes fonctions de la partie opérative du processus et isole les éléments de stockage d'énergie.

Remarque : sur le graphe, une flèche entre deux bulles peut représenter la transmission d'une ou plusieurs informations (ex : f_{1l} et f_{2l} sur la figure 5).

2.2 Définition des fonctions génératrices

Pour synthétiser la commande de ce type de processus, le principe de la modélisation moyenne est utilisé. En désignant par T_c la période de commutation, on définit la fonction **génératrice** de connexion, associée à la fonction de connexion $f_{ci}(t)$:

$$f_{cig} = \frac{1}{T_c} \int_{T_c}^{(q+1)T_c} f_{ci}(t) dt$$

Lorsque T_c tend vers zéro, la fonction génératrice exprime alors la valeur moyenne instantanée de la connexion. On définit de même, la fonction génératrice de conversion m_g . Compte tenu de la définition, on peut déduire les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} 0 &\leq f_{cig} \leq 1 \\ -1 &\leq m_g \leq 1 \end{aligned}$$

Question 2.2 : Quelle est la relation qui existe entre les fonctions génératrices de connexion et la fonction génératrice de conversion ?

Remarque : La relation de conversion entre les grandeurs instantanées est conservée pour les grandeurs moyennes.

Dans toute la suite de l'étude, on ne s'intéressera désormais qu'au **comportement moyen instantané** du processus.

3. Contrôle du courant de source

3.1 Détermination de la structure de la commande

Toute commande d'un processus est issue de l'inversion son modèle. La structure de la commande est donc issue de l'inversion de chacun des éléments définis ci-dessus. Dans le cas présent, on souhaite contrôler le courant i_s . Nous procédons à l'inversion de la partie du processus qui établit le lien entre les fonctions génératrices de connexion et la grandeur à régler (i_s) (cf. figure 6).

Les règles d'inversion sont différentes suivant qu'il s'agisse d'une relation causale ou non.

En effet, il est possible de procéder à une **inversion directe des relations instantanées**. Les relations R_{c1} et R_{c2u} , R_{c3} inversent respectivement les relations R_1 et R_{2u} , R_3 .

$R_1 : m_g = R_1(f_{11g}, f_{21g})$	R_{c1} (générateur de connexion) : $(f_{11g \text{ REG}}, f_{21g \text{ REG}}) = R_{c1}(m_{g \text{ REG}})$
$R_{2u} : u_m = m u_s$	R_{c2u} (linéarisation) : $m_{g \text{ REG}} = \frac{u_{m \text{ REG}}}{u_s}$
$R_3 : v_m = e - u_m$	R_{c3} (compensation) : $u_{m \text{ REG}} = e - v_{m \text{ REG}}$

On fait apparaître pour chaque grandeur de la partie opérative, une grandeur associée dans la partie commande affectée d'un indice 'REG'. L'objectif étant d'avoir égalité entre ces deux entités.

- $v_{m \text{ REG}}$: valeur souhaitée pour v_m ,
- $u_{m \text{ REG}}$: valeur souhaitée pour u_m ,
- $m_{g \text{ REG}}$: valeur souhaitée pour m_g ,
- $f_{11g \text{ REG}}, f_{21g \text{ REG}}$: valeur souhaitée pour f_{11g}, f_{21g} .

L'inversion directe d'une relation causale conduirait inévitablement à une relation non causale pour la partie commande ce que nous excluons a priori. **On utilise alors le principe d'inversion indirecte**, autrement dit une boucle d'asservissement.

$R_d : L \frac{di_s}{dt} + R i_s = v_m$	$R_{c4} \text{ (asservissement) : } \quad v_{m \text{ reg}} = C_i (i_{s \text{ REF}} - i_s)$
-----------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------

Pour distinguer l'inversion directe de l'inversion indirecte, nous affectons un indice 'REF' à la grandeur de consigne.

➤ $i_{s \text{ REF}}$: courant de consigne

C_i est une relation de grand gain de telle sorte que, sous réserve de stabilité de la boucle, la mesure du courant i_s tend vers sa référence $i_{s \text{ REF}}$. La figure 6 présente l'ensemble des fonctionnalités de la commande dont nous allons maintenant étudier les différents éléments

Remarque : Nous avons assimilé les fonctions génératrices de connexion f_{cig} à leur grandeurs de commande ($f_{cig \text{ REG}}$).

3.2 Etude du générateur de connexion

Hypothèse préalable : Afin de respecter les limitations physiques liées au fonctionnement du convertisseur, la commande impose la contrainte suivante :

$$-1 \leq m_{g \text{ REG}} \leq 1$$

La relation R_f n'est pas inversible mathématiquement, la détermination des fonctions $f_{11g \text{ REG}}$ et $f_{21g \text{ REG}}$ n'est donc pas unique. Il existe entre les grandeurs de commande les mêmes relations qu'entre les grandeurs du processus :

$$m_{g \text{ REG}} = f_{21g \text{ REG}} - f_{11g \text{ REG}}$$

Il est possible de calculer $f_{11g \text{ REG}}$ et $f_{21g \text{ REG}}$ à partir de $m_{g \text{ REG}}$ de la manière suivante :

$$f_{21g \text{ reg}} = \frac{m_{g \text{ REG}} + 1}{2}, \quad f_{11g \text{ reg}} = \frac{-m_{g \text{ REG}} + 1}{2}$$

On constate d'une part que la relation de conversion entre les grandeurs de commande est respectée et d'autre part que lorsque $m_{g \text{ REG}}$ parcourt l'intervalle $[-1 +1]$, les fonctions génératrices de connexion restent dans l'intervalle de définition $[0 1]$.

Question 3.2a : Proposer une autre solution pour déterminer $f_{11g \text{ REG}}$, $f_{21g \text{ REG}}$ à partir de $m_{g \text{ REG}}$ respectant la relation de conversion et les contraintes sur les fonctions génératrices de connexion.

Question 3.2b : Tracer la forme d'onde des fonctions de connexion $f_{11g \text{ REG}}$ et $f_{21g \text{ REG}}$ lorsque la fonction de conversion $m_{g \text{ REG}}$ est du type :

$$m_{g \text{ REG}} = 0.8 \frac{\sin(\omega t)}{2} \quad \text{avec } \omega = 314 \text{ rad/s}$$

3.3 Intérêt de la linéarisation.

On se place dans le cas où m_{gREG} est constante et égale à m_{g0} . On suppose que la tension u_s est de la forme suivante :

$$u_s(t) = u_{s0} + u_{s2} \sin(2\omega t - \varphi_u) \quad \text{avec } \omega = 314 \text{ rad/s}$$

On suppose que la tension e est nulle pour cette partie.

Question 3.3a : Montrer que l'influence des ondulations de la tension u_s sur le contrôle du courant peut être assimilée à une perturbation $p(t)$ sinusoïdale de pulsation 2ω sur le courant. Donner l'expression de l'amplitude de la perturbation en fonction de m_{g0} et de u_{s2} . Quelle est la conséquence prévisible sur l'allure du courant ?

La figure 7 présente le modèle du processus ainsi que la commande qui lui est appliquée.

On choisit un correcteur PI pour la boucle d'asservissement de i_s : $C_i(s) = K_i \left(\frac{R + Ls}{s} \right)$

On impose une référence de 10 A. On suppose, en régime établi, que la commande m_{gREG} est quasiment constante et égale à m_{g0} .

Valeurs numériques : $R = 2.5 \Omega$, $L = 0.01 \text{ mH}$, $u_{s0} = 80 \text{ V}$, $u_{s2} = 8 \text{ V}$

Question 3.3b : Calculer la valeur de m_{g0} .

Question 3.3c : Calculer les valeurs de K_i pour que le système bouclé ait une dynamique de 50 rad/s.

Question 3.3d : Déterminer la fonction de transfert $\frac{i_s}{p}$. En déduire l'amplitude des oscillations de i_s à la fréquence de 2ω .

Question 3.3e : Dans ces conditions, quel est l'intérêt d'opérer une division par la mesure de tension u_s dans la commande ?

4. Application à la création d'une source de tension à absorption sinusoïdale de courant au réseau.

Le convertisseur de la figure 4 est utilisé pour créer une source de tension continue réglable aux bornes d'un condensateur C (cf. figure 8). La source de tension e représente la force électromotrice d'un réseau alternatif sur lequel est prélevée l'énergie.

$$e = E\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

La source de courant i_{ch} représente le courant appelé par la charge. On suppose que ce courant est constant et égale à i_{ch0} .

Application numérique : $E = 40 \text{ V}$, $i_{ch0} = 0.5 \text{ A}$ $C = 100 \mu\text{F}$

Question 4 : Etablir le graphe informationnel causal complet du système

4.1 Calcul du taux d'ondulation de la tension continue.

Le courant est asservi à une consigne sinusoïdale $i_{s\text{REF}}$ en phase avec la tension réseau. Il vient donc :

$$i_{s\text{REF}}(t) = I_{s\text{REF}} \sqrt{2} \sin(\omega t).$$

Dans la suite de l'étude, on assimile le courant i_s à sa consigne $i_{s\text{REF}}$ de telle sorte que l'on a :

$$i_s(t) = I_s \sqrt{2} \sin(\omega t) \text{ avec } I_s = I_{s\text{REF}} = 1 \text{ A}$$

Question 4.1 : Calculer la valeur efficace de u_m .

A partir d'un bilan des puissances moyennes, calculer le niveau moyen (u_{s0}) de la tension u_s .

Le courant i_m se décompose de la manière suivante : $i_m(t) = i_{m0} + i_{m2} \sin(2\omega t - \varphi_i)$

Question 4.1b : A partir d'un bilan des puissances instantanées, déterminer les valeurs de l'amplitude de i_{m0} et i_{m2} .

En déduire une valeur approchée de u_{s2} .

Expliquer d'un point de vue qualitatif les conséquences de cette ondulation de tension sur la qualité spectrale du courant i_s dans le cas où l'on n'opère pas de linéarisation dynamique dans la commande.

Remarque : Pour simplifier les calculs, on assimile, dans le bilan des puissances instantanées, la tension u_s à sa composante continue u_{s0} .

4.2 Etude de la régulation de tension continue

Nous nous intéressons maintenant à la mise en œuvre de la régulation de la tension continue aux bornes du condensateur C. Comme nous l'avons montré précédemment, le niveau de tension continue dépend de la valeur efficace du courant i_s ($I_s = I_{s\text{REF}}$) et du courant de charge (i_{ch}). Cette constatation montre que la tension u_s peut être réglée par action sur $I_{s\text{REF}}$. On en déduit la forme générale du graphe proposé en figure 9.

u_{s0} , i_{m0} , i_{c0} sont les valeurs moyennes de u_s , i_m , i_c calculées sur 10 ms.

Remarque : La relation R_{us1} est issue d'un bilan des puissances moyennes dans lequel l'effet de la charge R, L est négligé de même que les ondulations de la tension u_s .

Question 4.2a : Déterminer les relations R_{1us} , R_{2us} , R_{3us} .

Question 4.2b : En appliquant le principe d'inversion du graphe, déterminer les relations R_{c1us} , R_{c2us} , R_{c3us} .

Question 4.2c : Comment évolue la tension u_{s0} si l'on applique un échelon d'amplitude unitaire sur la grandeur de commande $i_{c0\text{REG}}$?

Question 4.2d : On souhaite une erreur nulle entre la référence $u_{s\text{REF}}$ et la tension u_{s0} . Quelle est la structure de correcteur la plus simple que l'on puisse choisir ? Comment doit-on modifier le correcteur si l'on n'a pas accès à la mesure de i_c ?

PARTIE II : MODELISATION ET COMMANDE D'UN CONVERTISSEUR TRIPHASE

5. Modélisation du convertisseur

La figure 10 présente la structure du convertisseur utilisé, celui-ci dispose de trois cellules de commutations à deux interrupteurs. Etant donnée la fonction qu'il remplit, il est appelé, suivant le sens de transfert d'énergie prépondérant, redresseur ou onduleur de tension.

Dans cette étude, ce convertisseur est connecté au réseau au travers d'un filtre R,L triphasé équilibré. On considère dans la suite que l'ensemble des grandeurs électriques triphasées est équilibré.

Notations :

- Tensions composées modulées : $u_{m12}, u_{m23}, u_{m31}$.
- Tensions simples modulées : v_{m1}, v_{m2}, v_{m3} .

5.1 Modélisation en tension composée

En généralisant les définitions données dans la première partie pour les fonctions de conversion et en utilisant un modèle moyen, on pose :

$$u_{m12} = m_{12g} u_s, u_{m23} = m_{23g} u_s, u_{m31} = m_{31g} u_s$$

$m_{12g}, m_{23g}, m_{31g}$ sont appelées fonctions génératrices de conversion composées.

Question 5.1a : Etablir les relations de conversion existant entre m_{12g}, m_{23g} et les fonctions de connexions $f_{11g}, f_{21g}, f_{31g}$.

Question 5.1b : Déterminer la relation entre le courant i_m , les fonctions de conversion m_{12g} et m_{23g} et les courant i_{s1}, i_{s3} .

La figure 11 présente en partie supérieure le graphe partiel du système étudié. La partie inférieure correspond à la structure de la commande issue de l'inversion du graphe.

Question 5.1c : Etablir un tableau regroupant toutes les relations de la partie opérative du système (R_1, R_2, R_3, R_4) en correspondance avec les relations de la partie commande ($R_{c1}, R_{c2}, R_{c3}, R_{c4}$).

Remarque : La relation R_{c1} ne sera pas explicitée dans cette question.

Comme dans le cas précédent, la relation R_1 n'est pas bijective. Il s'agit de déterminer les fonctions de connexion $f_{11g REG}, f_{21g REG}, f_{31g REG}$ à partir des fonctions de conversion $m_{12g REG}, m_{23g REG}$ et $m_{31g REG}$. Il existe une infinité de solutions, nous proposons une méthode basée sur le test du signe des trois fonctions de conversion. On envisage les cas suivants :

$$m_{12g REG} \geq 0 \quad m_{23g REG} \leq 0 \quad \text{cas n}^\circ 1$$

$$m_{23g REG} \geq 0 \quad m_{31g REG} \leq 0 \quad \text{cas n}^\circ 2$$

$$m_{31g REG} \geq 0 \quad m_{12g REG} \leq 0 \quad \text{cas n}^\circ 3$$

Question 5.1d : Pour chacun des cas définis ci-dessus, déterminer les fonctions de connexion de réglage ($f_{c1g REG}$) à partir des fonctions génératrices de conversion de réglage en respectant les relations de conversion (question 5.1a) et les contraintes naturelles sur toutes les fonctions de connexion ($0 \leq f_{c1g REG} \leq 1$).

On souhaite que la solution trouvée permette aux fonctions génératrices de conversion de réglage d'explorer la totalité de leur intervalle de définition c'est à dire $[-1 \ 1]$.

A titre d'exemple, dans le cas n°1, la détermination des fonctions de connexion peut se faire de la manière suivante :

$$f_{11g REG} = m_{12g REG}, f_{21g REG} = 0 \text{ et } f_{31g REG} = -m_{23g REG}$$

Question 5.1e : En fonction des conditions trouvées à la question précédente, tracer la forme d'onde des fonctions de connexion $f_{11g REG}$, $f_{21g REG}$, $f_{31g REG}$ lorsque les fonctions de conversion $m_{12g REG}$ et $m_{23g REG}$ sont du type :

$$\begin{aligned} m_{12g REG} &= \hat{M} \sin(\omega t) && \text{avec } \omega = 314 \text{ rad/s} \\ m_{23g REG} &= \hat{M} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) && \hat{M} = 0.5 \end{aligned}$$

5.2 Modélisation en tension simple

On s'intéresse maintenant à une modélisation faisant intervenir les tensions simples (cf. figure 12).

On pose : $v_{m1} = n_{1g} u_s$, $v_{m2} = n_{2g} u_s$, $v_{m3} = n_{3g} u_s$

n_{1g} , n_{2g} , n_{3g} sont appelées fonctions génératrices de conversion simples.

Question 5.2a : Déterminer les relations entre f_{11g} , f_{21g} , f_{31g} et n_{1g} , n_{2g} , n_{3g} .

Question 5.2b : Vérifier que la solution suivante convient.

$$\begin{aligned} f_{11g} &= n_{1g REG} + 0.5 \\ f_{21g} &= n_{2g REG} + 0.5 \\ f_{31g} &= -f_{11g REG} - f_{21g REG} \end{aligned}$$

On suppose que les grandeurs $n_{1g REG}$, $n_{2g REG}$ sont de la forme suivante :

$$\begin{aligned} n_{1g REG} &= \hat{N} \sin(\omega t) \\ n_{2g REG} &= \hat{N} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

Question 5.2d : Quelle est l'amplitude maximale de \hat{N} admissible si l'on choisit la commande proposée ci-dessus ?

Dans ces conditions, en déduire l'amplitude maximale des fonctions génératrices de conversion composées \hat{M} que l'on peut atteindre avec ce type de commande.

Question 5.2e : En déduire l'intérêt de la commande faisant intervenir les fonctions de conversion composées.

5.3 Étude de la régulation de la source continue.

On suppose que les courants triphasés sont asservis à des consignes sinusoïdales triphasées équilibrées. Le réglage de l'amplitude du courant absorbé au réseau triphasé permet de contrôler le niveau de la tension continue.

Question 5.3a : Quelle est la seule relation à doit-on modifier dans le graphe de la figure 9 pour prendre en compte le réseau triphasé ?

Question 5.3b : Quelle est l'incidence du passage d'un réseau monophasé à un réseau triphasé sur la forme d'onde de la tension u_s ?

PARTIE III : COMMANDE DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

6. Modélisation des convertisseurs multiniveaux

6.1 Analyse du fonctionnement d'un bras

L'analyse du fonctionnement du bras de commutation multiniveaux (cf. figure 13) se fait suivant les trois configurations suivantes :

- T_1 et T_2 commandés ($B_1 = 1$ $B_2 = 1$ $B_3 = 0$ $B_4 = 0$) (configuration n°1),
- T_2 et T_3 commandés ($B_1 = 0$ $B_2 = 1$ $B_3 = 1$ $B_4 = 0$) (configuration n°2),
- T_3 et T_4 commandés ($B_1 = 0$ $B_2 = 0$ $B_3 = 1$ $B_4 = 1$) (configuration n°3).

Question 6.1a : Quel est le niveau de tension v_{m1} pour chacune des configurations de commande définies ci-dessus ?

Question 6.1b : Expliciter le fonctionnement du bras, lorsque le courant i_s est positif, à l'aide d'un réseau de Petri à trois places. Indiquer précisément pour chaque place les semi-conducteurs (transistor ou diode) qui conduisent et donner les conditions de transition entre les places.

Question 6.1c : Proposer un réseau de Petri dans le cas général (courant i_s positif ou négatif).

Remarque : Afin de simplifier la représentation graphique, on ne prend pas en compte le cas où le courant est nul.

Question 6.1d : Montrer qu'un bras est équivalent, sur le plan fonctionnel, à une structure de cellule de commutation à trois interrupteurs (K_{11}, K_{12}, K_{13}) caractérisés par les fonctions de connexion : f_{11}, f_{12}, f_{13} . Déterminer pour chaque place du réseau de Petri précédent l'état de ces fonctions de connexion. Exprimer la tension v_{m1} et les courants i_{m1} et i_{m2} en fonction de f_{11}, f_{12} .

6.2 Analyse du fonctionnement du convertisseur

On se place dans l'hypothèse où les transistors d'un même bras sont commandés suivant les 3 configurations décrites précédemment. On définit une deuxième cellule de commutation composée des trois interrupteurs (K_{21}, K_{22}, K_{23}) auxquels on associe trois fonctions de connexion f_{21}, f_{22}, f_{23} . Dans ces conditions, la tension u_m appliquée à la charge est positive ou négative.

Question 6.2a : Proposer un schéma équivalent du convertisseur mettant en évidence les deux cellules de commutations.

Question 6.2b : Exprimer la tension u_m en fonction de u_{s1} , u_{s2} , f_{11} , f_{12} , f_{21} , f_{22} . Quels sont les niveaux pris par la tension u_m . A quelle condition les niveaux sont-ils équirépartis ?

On définit les fonctions de conversion m_1 , m_2 telles que :

$$i_{m1} = m_1 i_s$$

$$i_{m2} = m_2 i_s$$

Question 6.2c : Montrer que la tension u_m est formée de deux composantes u_{m1} , u_{m2} telles que :

$$u_m = u_{m1} + u_{m2}$$

$$u_{m1} = m_1 (u_{s1} + u_{s2})$$

$$u_{m2} = m_2 u_{s2}$$

Question 6.2d : Etablir les Graphes Informationnels de Causalité partiels existant entre les fonctions de conversion m_1 , m_2 et :

- le courant i_s ,
- la tension u_{s1} ,
- la tension u_{s2} .

6.3 Asservissement des grandeurs électriques.

On choisit d'asservir i_s à une grandeur de référence i_{sREF} à l'aide de m_{2g} et u_{s1} à u_{s1REF} à l'aide de m_{1g} .

Question 6.3a : Par application des règles d'inversion du graphe, établir le graphe de causalité de la commande existant entre u_{s1REF} et m_{1gREG} .

Question 6.3b : Montrer que la tension u_{m1} représente une perturbation pour le réglage de i_s . Sachant qu'il n'est pas possible de mesurer cette tension, comment peut-on estimer sa valeur ?

Question 6.3c : Etablir le graphe de causalité de la commande existant entre i_{sREF} et m_{2gREG} .

Remarque : On suppose l'égalité entre chaque fonction génératrice de conversion m_{1g} et m_{2g} et la grandeur de commande associée m_{1gREG} , m_{2gREG} .

LISTE DES FIGURES

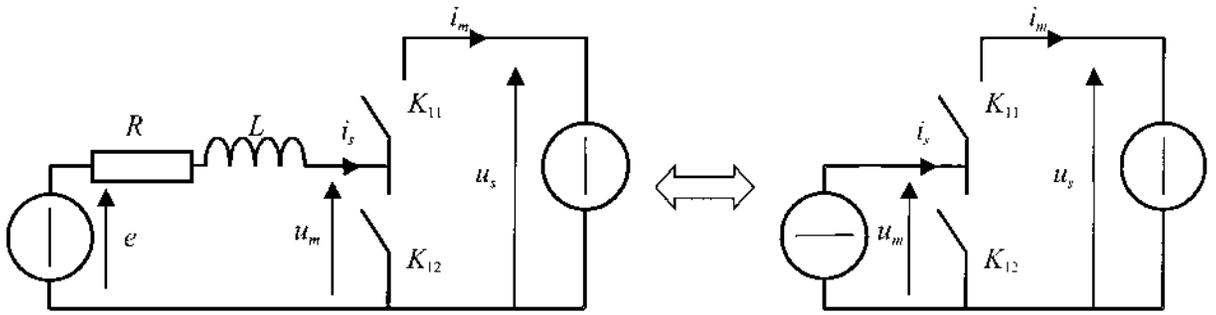


Figure 1 : Description d'une cellule de commutation

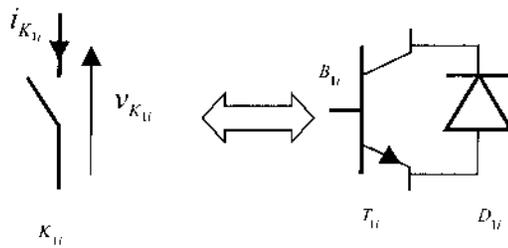


Figure 2 : Caractérisation des interrupteurs

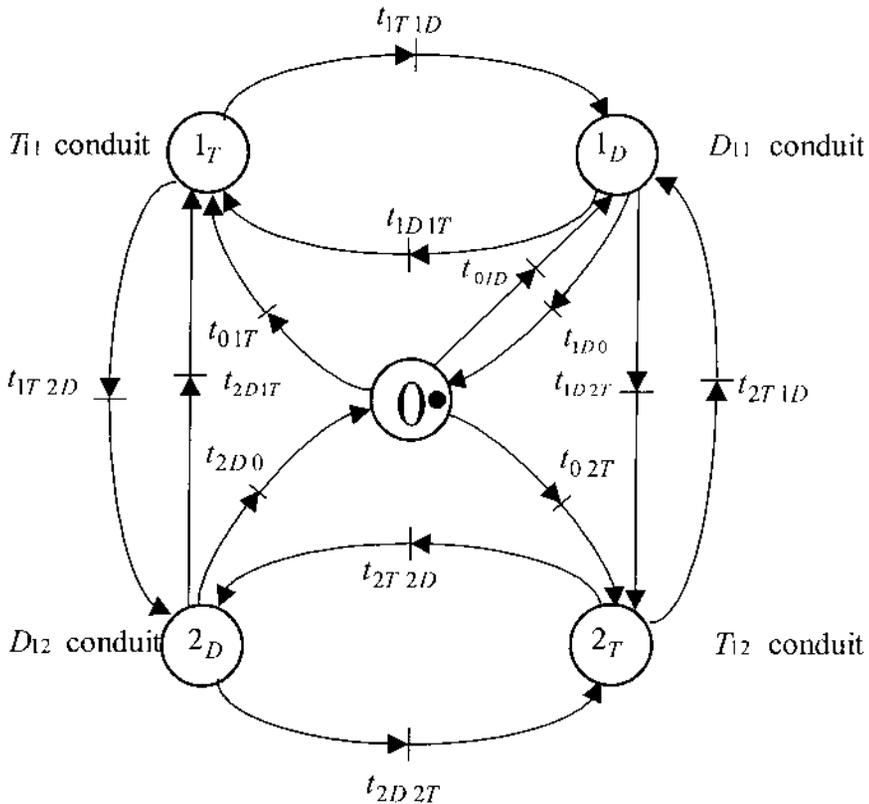


Figure 3 : Réseau de Petri associé à une cellule de commutation

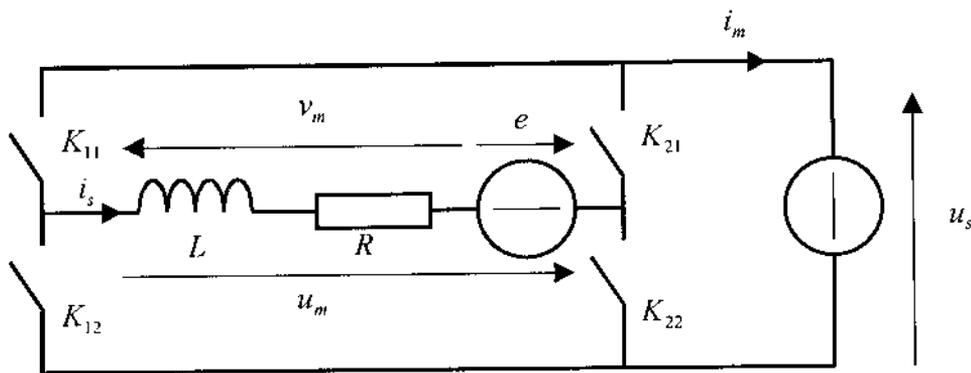


Figure 4 : Association de deux cellules de commutation

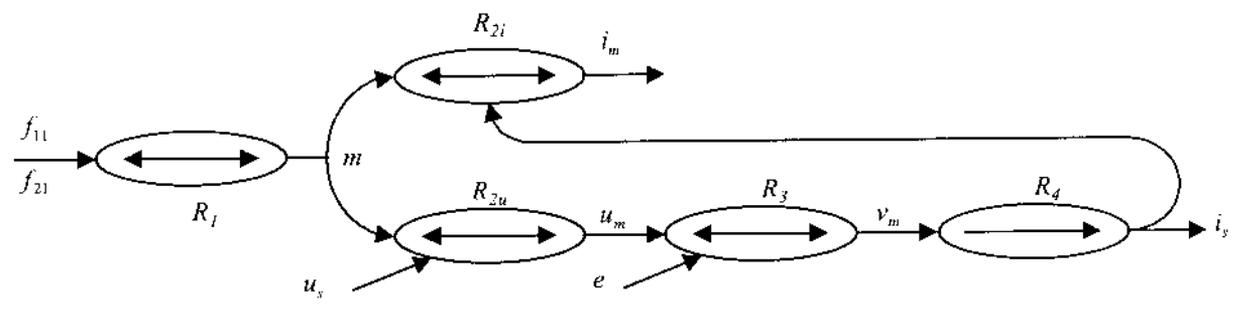


Figure 5 : Graphe Informationnel de Causalité associé au convertisseur

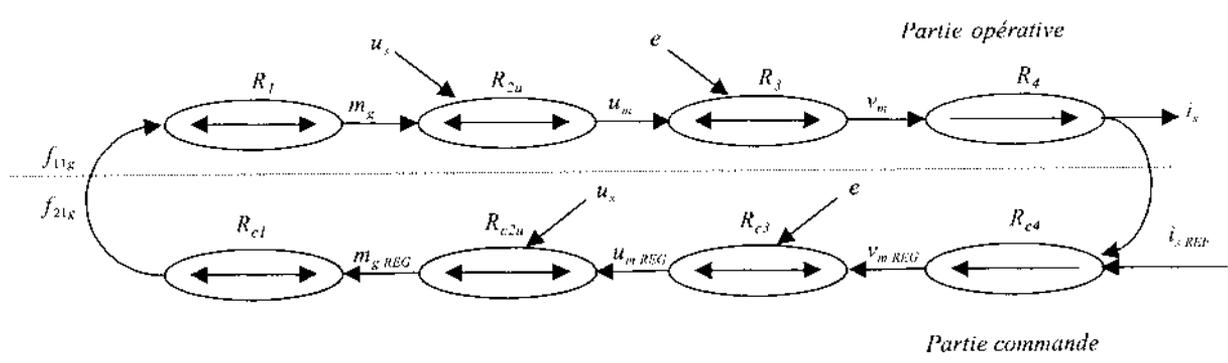


Figure 6 : Structure de la commande du convertisseur

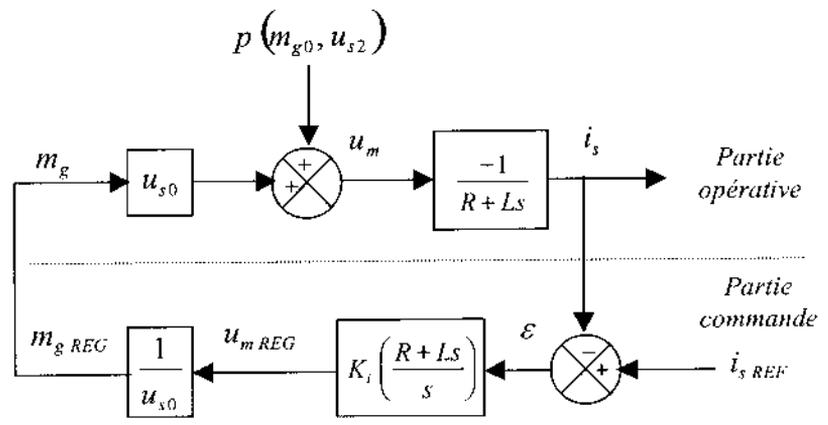


Figure 7 : Schéma fonctionnel du système et de sa commande

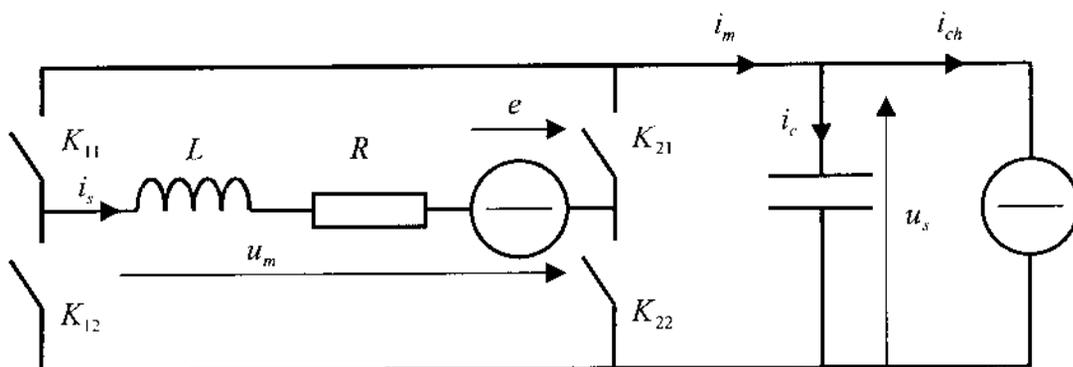


Figure 8 : Structure du système étudié

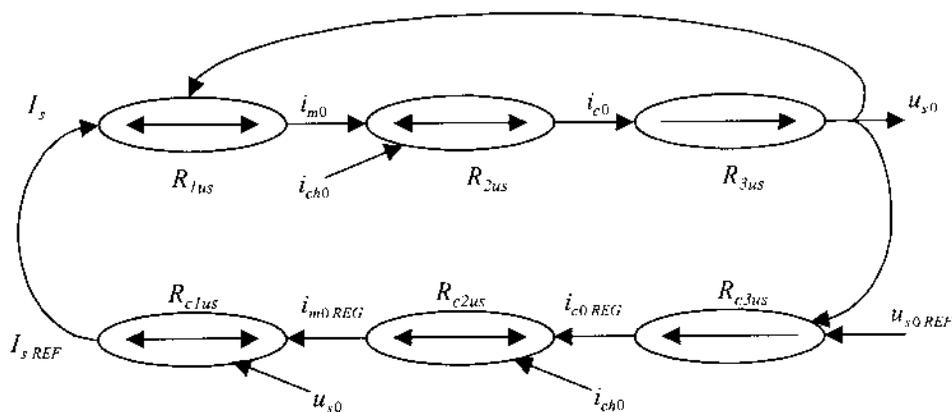


Figure 9 : Réglage de la tension u_s

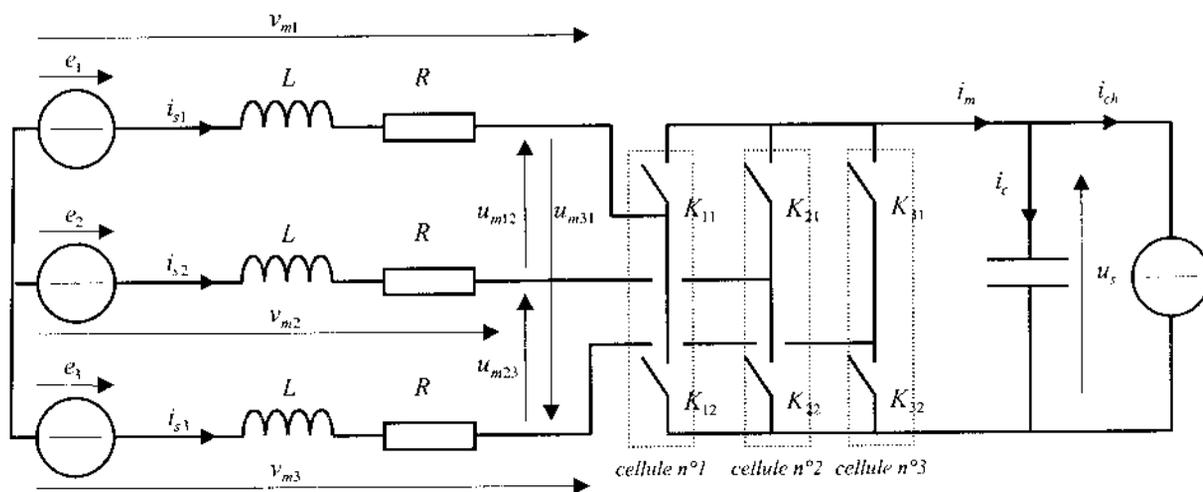


Figure 10 : Description du convertisseur 3/2

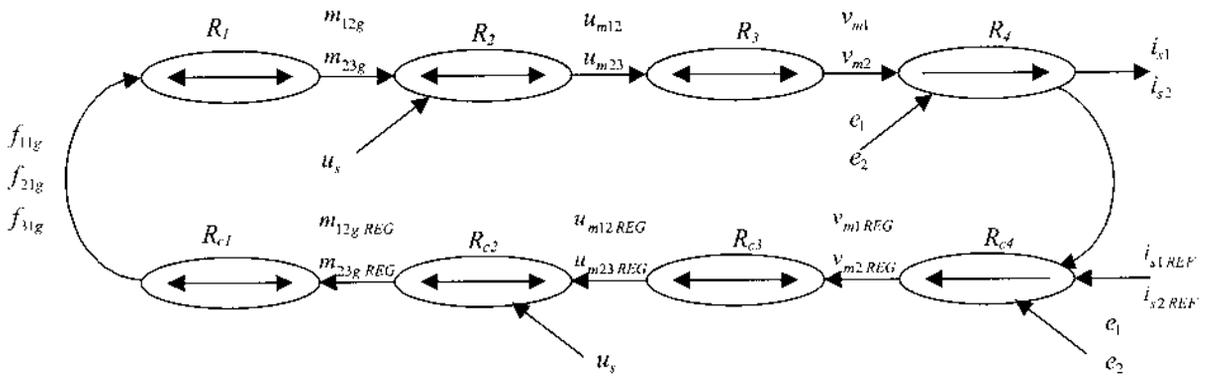


Figure 11 : Graphe partiel du convertisseur 3/2 et de son environnement (modélisation en tension composée)

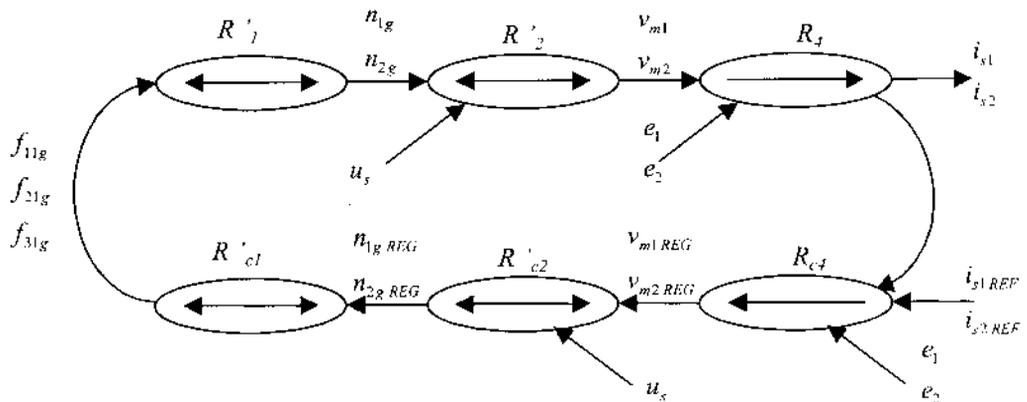


Figure 12 : Graphe partiel du convertisseur 3/2 et de son environnement (modélisation en tension simple)

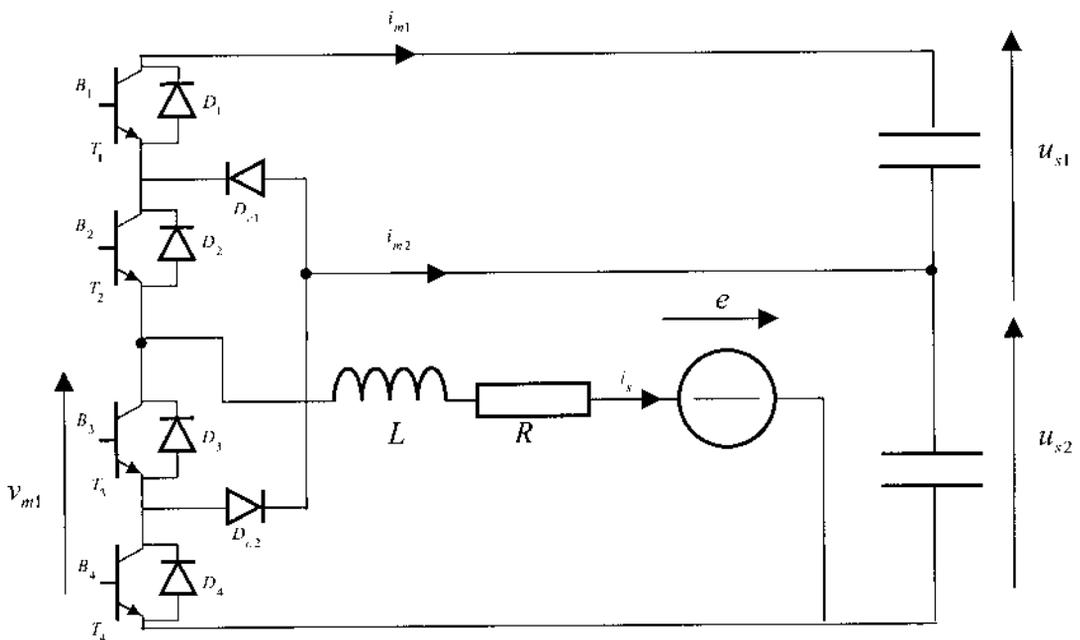


Figure 13 : Convertisseur multiniveaux élémentaire

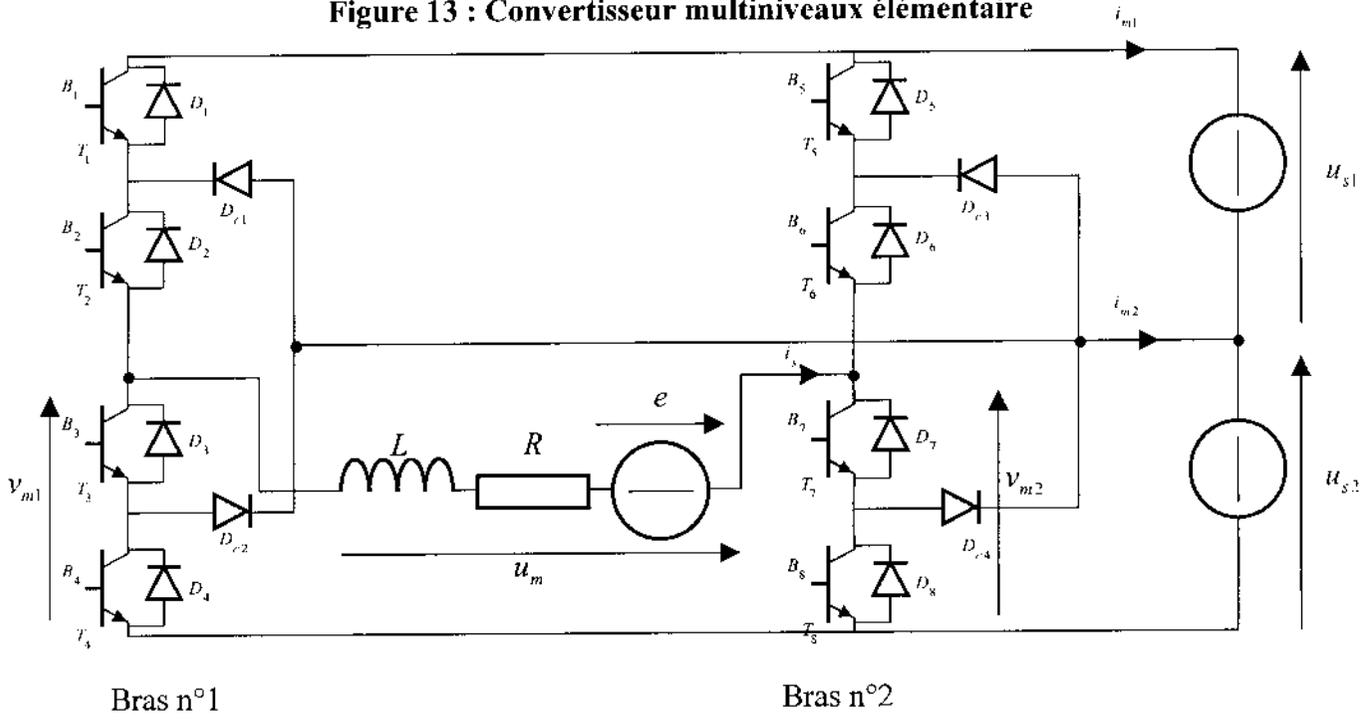
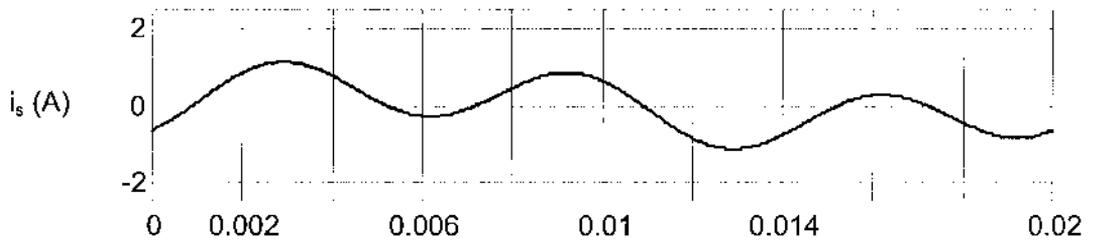
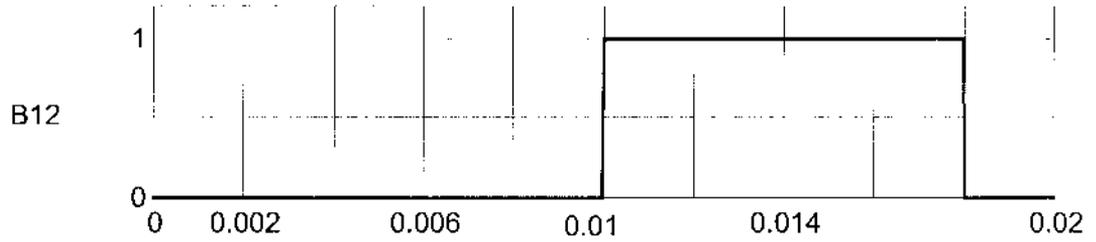
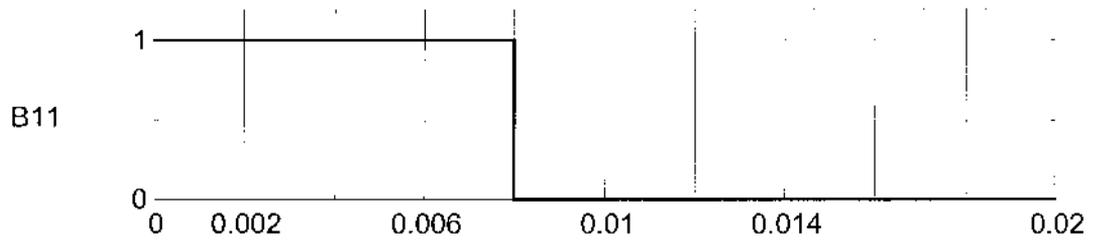


Figure 14 : Association de deux bras de commutation multiniveaux

DOCUMENT REPOSE n°1



composants
en conduction

