

GENIE ELECTRIQUE

Conversion statique d'énergie

Michel Piou

**Conversion DC → DC (hacheurs et alimentations à découpage)
Convertisseurs à liaison directe et
Convertisseurs à liaison indirecte.
Chapitre II**

Edition 24/11/2010

Extrait de la ressource en ligne *PowerElecPro* sur le site Internet iutenligne.net

Table des matières

1 POURQUOI ET COMMENT ?	1
2 FONCTION INTERRUPTEUR.....	2
2.1 Les interrupteurs.....	2
2.2 Exemples de fonctions interrupteur :	3
3 LES SOURCES, LES CHARGES, ET LEURS ASSOCIATIONS.....	4
3.1 Eléments "courant" et éléments "tension".....	4
3.2 Convertisseur à liaison directe.	6
3.3 Convertisseur à liaison directe à un seul interrupteur.	6
3.4 Convertisseur à liaison directe à deux interrupteurs.	7
3.5 Cellule de commutation.	8
4 CONVERTISSEURS A LIAISON DIRECTE GENERALISES.....	8
5 CONVERTISSEUR A LIAISON INDIRECTE	11
5.1 Convertisseur tension \leftrightarrow tension	11
5.2 Convertisseur courant \leftrightarrow courant	13
6 PROBLEMES ET EXERCICES.....	14
Chap 2. Exercice 1 : Structure d'un hacheur réversible en courant.....	14
Chap 2. Exercice 2 : Structure N°1 d'un hacheur en pont.....	15
Chap 2. Exercice 3 : Structure N°2 d'un hacheur en pont.....	16
Chap 2. Exercice 4 : Hacheur en pont avec différentes lois de commande.....	17
Chap 2. Exercice 5 : Comportement d'une alimentation à découpage boost.....	18
Chap 2. Exercice 6 : Alimentation boost en prenant en compte la résistance interne de la bobine.....	20
Chap 2. Exercice 7 : Convertisseur tension \leftrightarrow tension généralisé.....	21
Chap 2. Exercice 8 : Convertisseur DC \leftrightarrow DC, tension \leftrightarrow tension, non réversible.....	21
Chap 2. Exercice 9 : Comparaison des trois convertisseurs tension \leftrightarrow tension : alimentations à découpage non réversibles.....	22
Chap 2. Exercice 10 : Convertisseur DC \leftrightarrow DC, courant \leftrightarrow courant, non réversible.....	23
7 CE QUE J'AI RETENU DE CE CHAPITRE.....	24
8 REPONSES AUX QUESTIONS DU COURS	25

Copyright : droits et obligations des utilisateurs

Ce document est extrait de la ressource *PowerElecPro* qui est disponible en version numérique sur le site Internet *IUT en ligne*

Je ne renonce pas à ma qualité d'auteur et aux droits moraux qui s'y rapportent du fait de la publication de mon document.

Les utilisateurs sont autorisés à faire un usage non commercial, personnel ou collectif, de ce document et de la ressource *PowerElecPro*, notamment dans les activités d'enseignement, de formation ou de loisirs. Tout ou partie de cette ressource ne doit pas faire l'objet d'une vente - en tout état de cause, une copie ne peut pas être facturée à un montant supérieur à celui de son support.

Pour tout extrait de ce document, l'utilisateur doit maintenir de façon lisible le nom de l'auteur *Michel Piou*, la référence à *PowerElecPro* et au site Internet *IUT en ligne*.

Michel PIOU - Agrégé de génie électrique – IUT de Nantes - FRANCE

1 POURQUOI ET COMMENT ?

Ces quarante dernières années, les chercheurs ont imaginé une profusion de principes de convertisseurs en électronique de puissance.

Une équipe d'enseignants de l'ENSEEIH (Toulouse) a proposé une « **Méthodes d'études des convertisseurs statiques** » ⁽¹⁾ qui permet d'aborder avec les mêmes outils les convertisseurs les plus divers.

Prérequis :

Le premier chapitre « introduction à l'électronique de puissance ».

Objectifs :

Dans le chapitre « introduction à l'électronique de puissance » nous avons élaboré, de façon plus ou moins intuitive, un convertisseur constitué avec des interrupteurs.

L'objectif de ce chapitre est de décrire une approche systématique conduisant, à partir d'un cahier des charges, au choix d'une structure de convertisseur (nombre et position des interrupteurs), dans la classe des « **convertisseurs à liaison directe** » puis des « **convertisseurs à liaison indirecte** ».

Notre objectif n'est pas de concevoir des convertisseurs jusqu'à leur phase industrielle. Il s'agit plutôt d'être capable de reconnaître les fonctions réalisées par les différents convertisseurs du marché et de pouvoir les mettre en œuvre.

Travail en autonomie :

Pour permettre une étude du cours de façon autonome, les réponses aux questions du cours sont données en fin de document.

On trouvera des compléments dans la ressource en ligne « PowerElecPro »

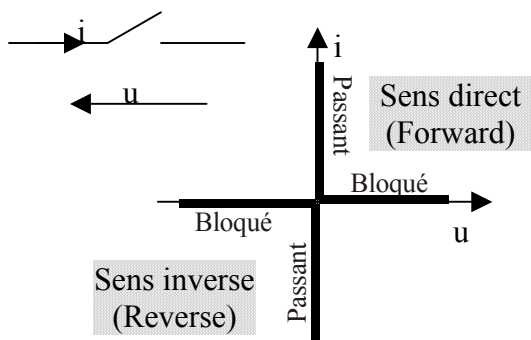
Temps de travail estimé pour un apprentissage de ce chapitre en autonomie : 15h

(1) Disponible sur [Hhttp://www.iufmrese.cict.fr/H](http://www.iufmrese.cict.fr/H)

STRUCTURE D'UN CONVERTISSEUR A LIAISON DIRECTE.

2 FONCTION INTERRUPTEUR.

2.1 Les interrupteurs.



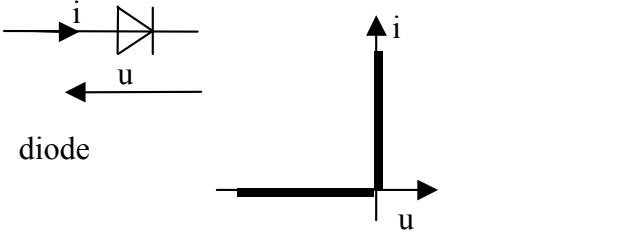
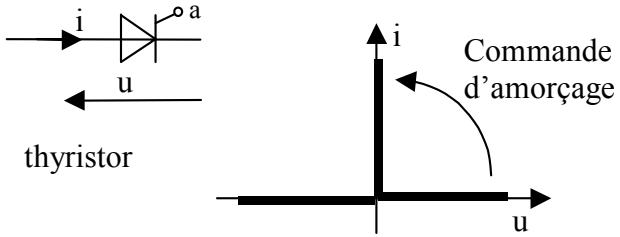
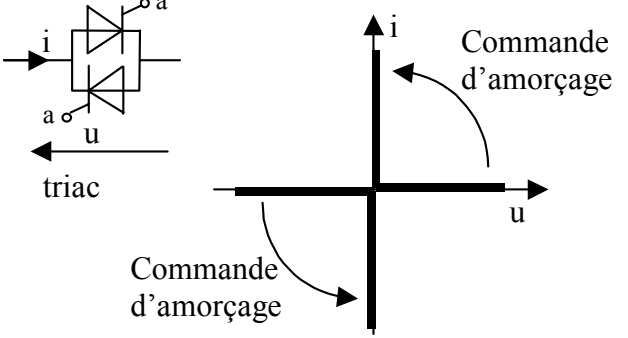
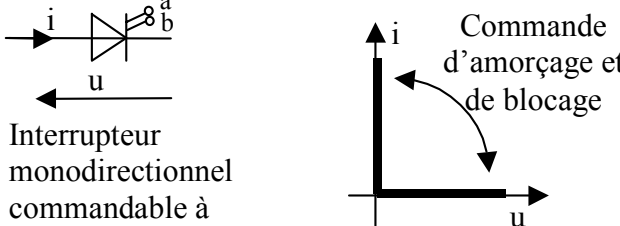
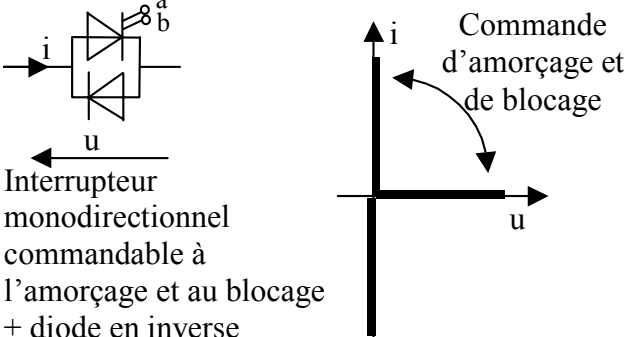
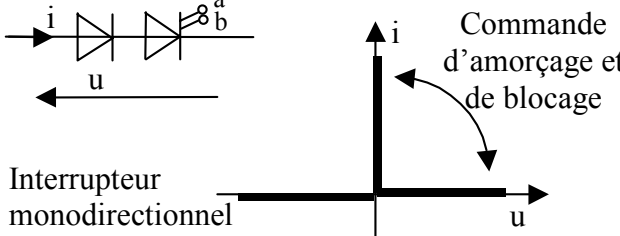
Dans les convertisseurs statiques, les composants électroniques travaillent en commutation.

Compte tenu des ordres de grandeur des tensions et des courants mis en œuvre dans ces convertisseurs statiques, on peut généralement négliger leur tension de seuil (à l'état passant) et leur courant de fuite (à l'état bloqué).

Le graphe ci-contre représente les zones de fonctionnement possibles d'un interrupteur électronique à l'état passant ($u = 0, i \neq 0$) ou à l'état bloqué ($u \neq 0, i = 0$).

Les fabricants de composants désignent le **sens direct** par la lettre « F » (pour « **forward** ») et le **sens inverse** par la lettre « R » (pour « **reverse** »).

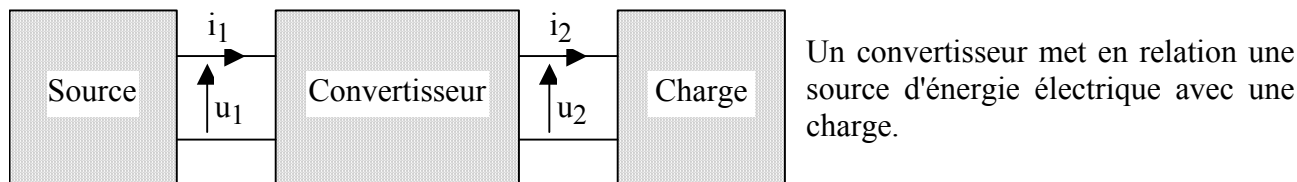
2.2 Exemples de fonctions interrupteur :

 <p>diode</p> <p>Blocage spontané lors du passage par zéro du courant décroissant. Amorçage spontané lors du passage par zéro de la tension croissante.</p>	 <p>thyristor</p> <p>Blocage spontané lors du passage par zéro du courant décroissant. Amorçage commandé dans le sens direct.</p>
 <p>triac</p> <p>Blocage spontané lors du passage par zéro du courant décroissant. Amorçage commandé dans les deux sens.</p>	 <p>Interrupteur monodirectionnel commandable à l'amorçage et au blocage</p> <p>Pas de polarisation inverse autorisée. Amorçage et blocage commandé dans le sens direct. Cette fonction peut être réalisée avec un transistor, un GTO ou un IGBT.</p>
 <p>Interrupteur monodirectionnel commandable à l'amorçage et au blocage + diode en inverse</p> <p>Toujours passant en polarisation inverse</p> <p>Cette fonction peut être réalisée avec un transistor, un GTO ou un IGBT plus une diode tête bêche.</p>	 <p>Interrupteur monodirectionnel commandable à l'amorçage et au blocage + diode série</p> <p>Toujours bloqué en polarisation inverse.</p> <p>Cette fonction peut être réalisée avec un transistor, un GTO ou un IGBT plus une diode en série.</p>

On peut imaginer d'autres associations...

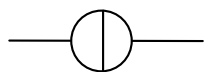
3 LES SOURCES, LES CHARGES, ET LEURS ASSOCIATIONS

3.1 Eléments "courant" et éléments "tension"



Le sens de l'échange d'énergie n'est pas toujours imposé au départ. Lorsque les rôles de « source » et de « charge » peuvent être inversés au cours du temps, on ne parle plus de source et de charge, mais simplement de « sources » qui échangent de l'énergie électrique au moyen d'un convertisseur.

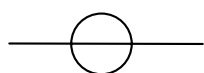
Dans la source, la charge et parfois le convertisseur lui-même, on qualifie les éléments par leur comportement vis-à-vis des contraintes imposées par les commutations:



Elément courant

- Dans un "**élément courant**" (2), le courant ne peut pas varier brutalement sous la contrainte des autres éléments du montage. Par contre les discontinuités de tension aux bornes sont possibles. (Un élément courant ne subit pas de discontinuité de courant lorsqu'on le soumet à un échelon de tension).

Un élément "courant" **peut être court-circuité** pendant un certain temps sans danger; mais il ne doit **pas être ouvert** lorsque le courant n'est pas nul (sous peine de créer une surtension).

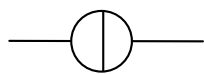


Elément tension

- Aux bornes d'un "**élément tension**", la tension ne peut pas varier brutalement sous la contrainte des autres éléments du montage. Par contre les discontinuités de courant sont possibles. (Un élément tension ne subit pas de discontinuité de tension lorsqu'on le soumet à un échelon de courant).

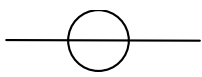
Un élément "tension" **peut être ouvert** sans danger; mais il ne doit **pas être court-circuité** lorsque la tension à ses bornes n'est pas nulle (sous peine de créer une surintensité).

- Parmi les éléments "courant" et les éléments "tension", on peut opérer quelques distinctions:



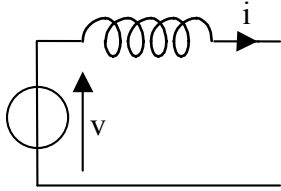
Elément (ou source) de courant **permanent**: le courant ne dépend pas des autres éléments du montage. Un court-circuit permanent à ses bornes est possible.

(2) Le mot "source" est parfois préféré au mot "élément".



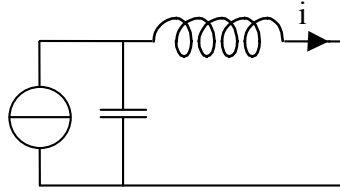
Elément (ou source) de tension **permanent**: la tension ne dépend pas des autres éléments du montage. Il peut être en circuit ouvert permanent.

- Elément (ou source) de courant **instantané** (le courant i peut varier progressivement sous l'influence des autres éléments du montage):



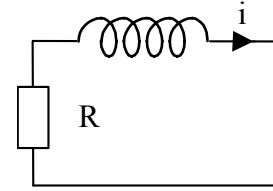
Cet élément courant peut être ouvert lorsque $i = 0$.

(Il faut éviter un court-circuit permanent si $\overline{V} \neq 0$)



Cet élément courant peut être temporairement ouvert lorsque $i = 0$.

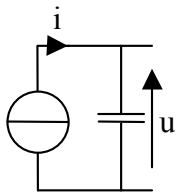
(Le court-circuit permanent est possible)
(Attention aux oscillations)



Cet élément courant ne peut être ouvert que lorsque $i = 0$.

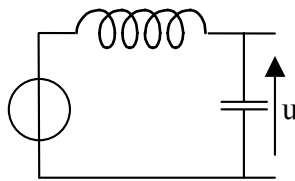
(L'ouverture permanente et le court-circuit permanent sont possibles)

- Elément (ou source) de tension **instantané** (la tension u peut varier progressivement sous l'influence des autres éléments du montage):



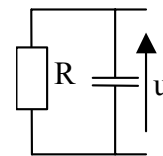
Cet élément tension peut être court-circuité lorsque $u = 0$.

(Il faut éviter un circuit ouvert permanent si $\overline{I} \neq 0$)



Cet élément tension peut être temporairement court-circuité lorsque $u = 0$.

(Le circuit ouvert permanent est possible)
(Attention aux oscillations)



Cet élément tension ne peut être court-circuité que lorsque $u = 0$.

(L'ouverture permanente et le court-circuit permanent sont possibles)

- A l'échelle des temps de commutation, il est rare qu'un dipôle puisse être considéré purement ohmique. (Il est le plus souvent inductif du fait des fils de liaison).

3.2 Convertisseur à liaison directe.

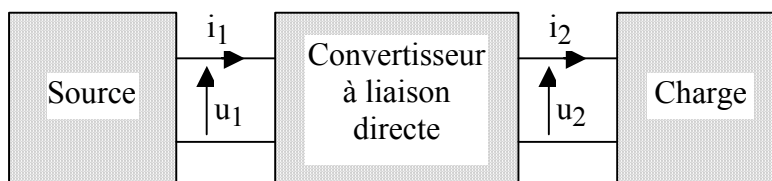
Lorsqu'on veut régler l'échange d'énergie entre une source et une charge sans utiliser d'éléments dissipatifs, la solution la plus simple consiste à ne mettre que des interrupteurs dans le convertisseur.

Dans ce cas, le convertisseur ne comporte aucun élément de stockage d'énergie (tel qu'un condensateur ou une inductance). Il n'y a donc le choix qu'entre deux situations :

- Echange d'énergie entre la source et la charge par liaison directe entre ces deux éléments.
- Non-échange d'énergie : La source et la charge ne sont pas reliées.

L'action périodique sur le ou les interrupteurs permet de régler le temps d'échange par rapport au temps de non-échange et d'agir ainsi sur la puissance moyenne échangée.

Ce type de convertisseur est appelé « **convertisseur à liaison directe** ».



Remarque :

Sur un intervalle de temps infiniment petit « dt », l'énergie fournie par la source est $dw_1 = u_1 \cdot i_1 \cdot dt$; l'énergie reçue par la charge est $dw_2 = u_2 \cdot i_2 \cdot dt$.

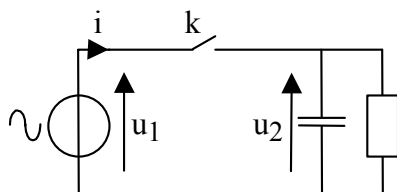
Le convertisseur n'ayant accumulé ou dissipé aucune énergie, on en déduit par la loi de conservation de l'énergie que $dw_1 = dw_2$.

$$\Leftrightarrow u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2$$

Un convertisseur à liaison directe est un convertisseur qui ne comporte aucun élément susceptible d'accumuler, de produire ou de dissiper de l'énergie électrique. La puissance électrique instantanée est la même sur son entrée et sur sa sortie. On dit qu'il « conserve la puissance instantanée ».

3.3 Convertisseur à liaison directe à un seul interrupteur.

Association entre deux éléments tension.

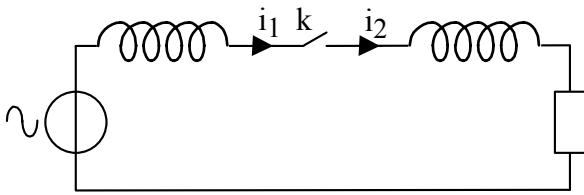


Le blocage de k peut intervenir à n'importe quel instant. Il est commandable. Cela ne crée pas de discontinuité des tensions u_1 et u_2 .

L'amorçage de k n'est possible que si $u_1 = u_2$.

Un des éléments tension est uniquement instantané (pour pouvoir suivre l'autre).

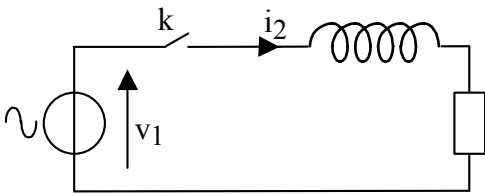
Association entre deux éléments courant.



L'amorçage de k peut intervenir à n'importe quel instant. Il est commandable. Cela ne crée pas de discontinuité de courants (puisque'il se fait à $i_1 = i_2 = 0$).

Le blocage de k n'est possible que si $i_1 = i_2 = 0$...

Association entre un élément tension et un élément courant.



L'amorçage de k peut intervenir à n'importe quel instant. Il est commandable. Cela ne crée pas de discontinuité de courants (puisque'il se fait à $i_1 = i_2 = 0$).

Le blocage de k n'est possible que si $i_1 = i_2 = 0$...

Dans chacun des cas précédents, une commutation est commandable, alors que l'autre doit se faire spontanément lorsque les conditions en sont réunies.

Cette seconde commutation impose des contraintes sur les courants ou les tensions (et donc sur la nature des sources) qui ne sont pas toujours faciles à satisfaire.

3.4 Convertisseur à liaison directe à deux interrupteurs.

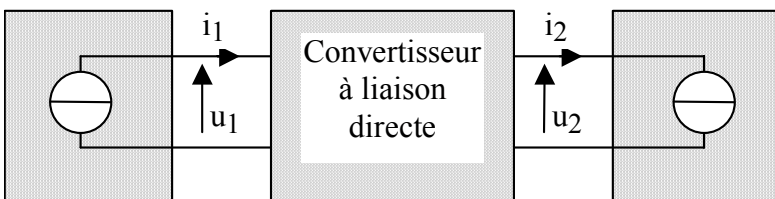
On veut associer deux éléments par un convertisseur à liaison directe **sans contrainte sur les instants de commutation** :

Association de deux éléments « tension ».



Cette structure **ne fonctionne pas**, car, pendant la phase d'échange d'énergie (par liaison directe), elle impose $u_1 = u_2$. La liaison directe entre les deux sources n'est pas possible pour des éléments tension quelconques.

Association de deux éléments « courant ».



Cette structure **ne fonctionne pas**, car, pendant la phase d'échange d'énergie (par liaison directe), elle impose $i_1 = i_2$. La liaison directe entre les deux sources n'est pas possible pour des éléments courant quelconques.

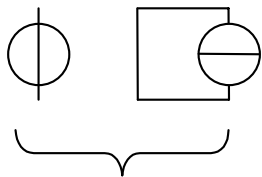
Association d'un élément « tension » et d'un élément « courant ».



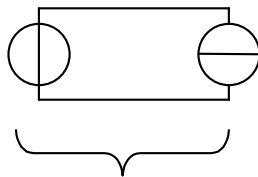
La mise en relation directe des deux sources est toujours possible. Par contre le courant de la source courant ne doit pas être interrompu pendant la phase de non-échange.

La version minimum de ce convertisseur est appelée « **cellule de commutation** ».

3.5 Cellule de commutation.



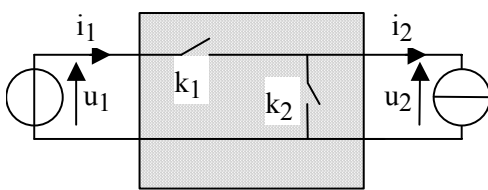
Pas d'échange d'énergie



Echange d'énergie

Les deux situations sont réalisables à tout moment quelles que soient les valeurs de i et de u .

Pour les mettre en œuvre, il faut un minimum de 2 interrupteurs...



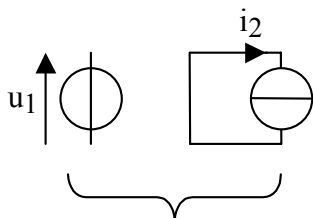
L'ensemble k_1, k_2 constitue un convertisseur élémentaire appelé "**cellule de commutation**".

Si $u_1 \neq 0$, k_1 et k_2 ne doivent pas être fermés en même temps. Si $i_2 \neq 0$, ils ne doivent pas être ouverts en même temps donc: $k_2 = \overline{k_1}$

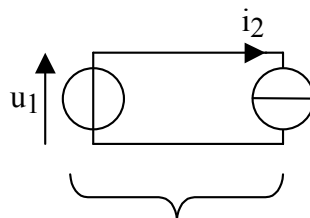
Cette solution présente l'avantage de n'imposer a priori aucune contrainte sur le comportement de l'association d'un élément tension et d'un élément courant.

4 CONVERTISSEURS A LIAISON DIRECTE GENERALISES.

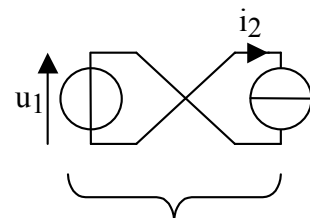
Lorsqu'on associe un élément "courant" et un élément "tension" avec un convertisseur à liaison directe, trois situations sont possibles (Précédemment nous n'en avons envisagé que deux):



Pas d'échange d'énergie situation N°1



Echange d'énergie situation N°2

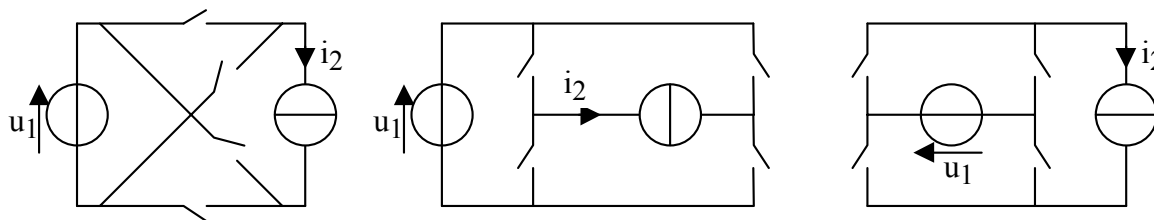


Echange d'énergie situation N°3

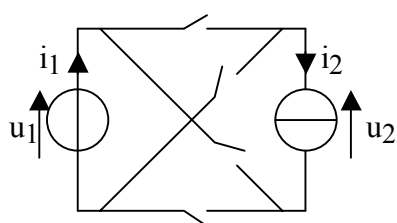
La tension et le courant qui s'établissent dans la maille constituée par l'élément tension et l'élément courant lors de la phase d'échange d'énergie (N°2 ou N°3) doivent être compatibles avec les

caractéristiques de ces deux éléments (et en particulier avec leurs **réversibilités** ⁽³⁾). Si cela est vérifié, les trois situations sont réalisables quelles que soient les valeurs de u et de i .

Un convertisseur qui permet de réaliser les trois situations précédentes est constitué au minimum de 4 interrupteurs. On peut le représenter de différentes façons:



Cette structure dite "**convertisseur en pont**" est la structure la plus générale d'un convertisseur à liaison directe entre un élément tension et un élément courant.



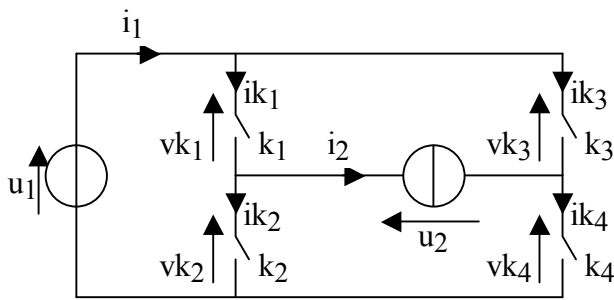
Si $i_2 \neq 0$, il y a obligatoirement deux interrupteurs et deux seuls de fermés. En déduire les trois seules valeurs que peut prendre u_2 et les trois seules valeurs que peut prendre i_1 .

(Réponse 1:)

⁽³⁾ On emploie le terme de réversibilité pour qualifier l'aptitude des éléments à accepter une tension ou un courant positif ou négatif.

Par exemple, une batterie est un élément tension non réversible en tension mais réversible en courant: la tension à ses bornes ne peut pas changer de sens, alors que le courant qui la traverse peut changer de sens.

L'induit d'une machine à courant continu est un dipôle inductif (c'est donc un élément courant). Si on le fait fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple vitesse, il est réversible en tension et en courant.



K1 et K2 ne peuvent pas être fermés en même temps si $u_1 \neq 0$. Ils ne peuvent pas être ouverts en même temps si $i_2 \neq 0$. Ils constituent une cellule de commutation.

Dans le cas général, ils sont donc complémentaires: $K_2 = \overline{K_1}$.

Pour les mêmes raisons: $K_4 = \overline{K_3}$.

lorsque $\left\{ \begin{array}{l} K_1 \text{ et } K_3 \text{ sont ouverts} \\ K_2 \text{ et } K_4 \text{ sont fermés} \end{array} \right\}$ ou lorsque $\left\{ \begin{array}{l} K_2 \text{ et } K_4 \text{ sont ouverts} \\ K_1 \text{ et } K_3 \text{ sont fermés} \end{array} \right\}$: Il n'y a pas d'échange d'énergie (situation N°1)

lorsque $\left\{ \begin{array}{l} K_1 \text{ et } K_4 \text{ sont fermés} \\ K_2 \text{ et } K_3 \text{ sont ouverts} \end{array} \right\}$: Il y a échange d'énergie (situation N°2)

lorsque $\left\{ \begin{array}{l} K_2 \text{ et } K_3 \text{ sont fermés} \\ K_1 \text{ et } K_4 \text{ sont ouverts} \end{array} \right\}$: Il y a échange d'énergie (situation N°3)

Les interrupteurs ne consommant pas d'énergie s'ils sont idéaux, l'ensemble des quatre interrupteurs constitue un convertisseur à liaison directe. Il y a donc conservation de la puissance instantanée entre les deux sources.

Compte tenu des orientations choisies sur le schéma :

$$u_1(t) \cdot i_1(t) = u_2(t) \cdot i_2(t)$$

A partir de la conservation de la puissance instantanée, on retrouve bien que si $u_1(t) \neq 0$ et $i_2(t) \neq 0$:

$$u_2(t) = 0 \Leftrightarrow i_1(t) = 0$$

$$u_2(t) = u_1(t) \Leftrightarrow i_1(t) = i_2(t)$$

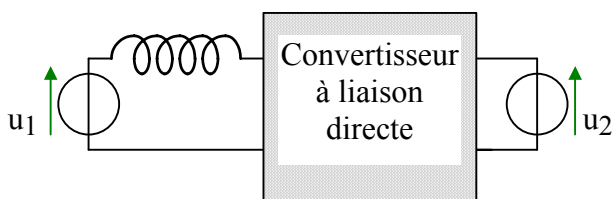
$$u_2(t) = -u_1(t) \Leftrightarrow i_1(t) = -i_2(t)$$

5 CONVERTISSEUR A LIAISON INDIRECTE

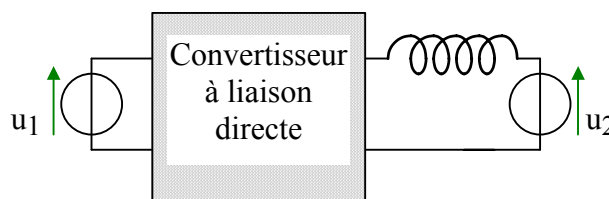
Lorsque les deux éléments à mettre en relation sont de même nature (tension ou courant), il n'est pas possible d'effectuer un transfert d'énergie direct de l'un à l'autre sauf dans quelques cas très particuliers.

5.1 Convertisseur tension ↔ tension

Pour effectuer cette conversion, trois méthodes sont possibles:



Première méthode : Changement de l'élément tension « u_1 » en élément courant (par l'adjonction d'une inductance).

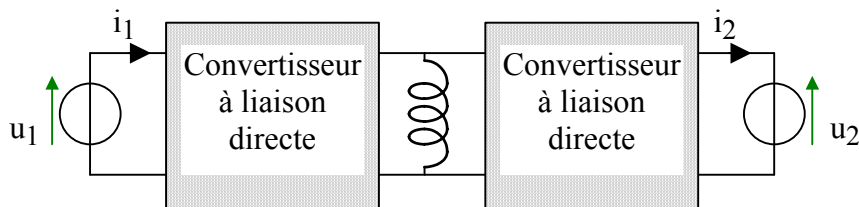


Deuxième méthode : Changement de l'élément tension « u_2 » en élément courant (par l'adjonction d'une inductance).

Ces deux solutions conduisent à des « convertisseurs à liaison directe ».

La troisième solution consiste à associer un convertisseur tension ↔ courant avec un convertisseur courant ↔ tension .

Troisième méthode :



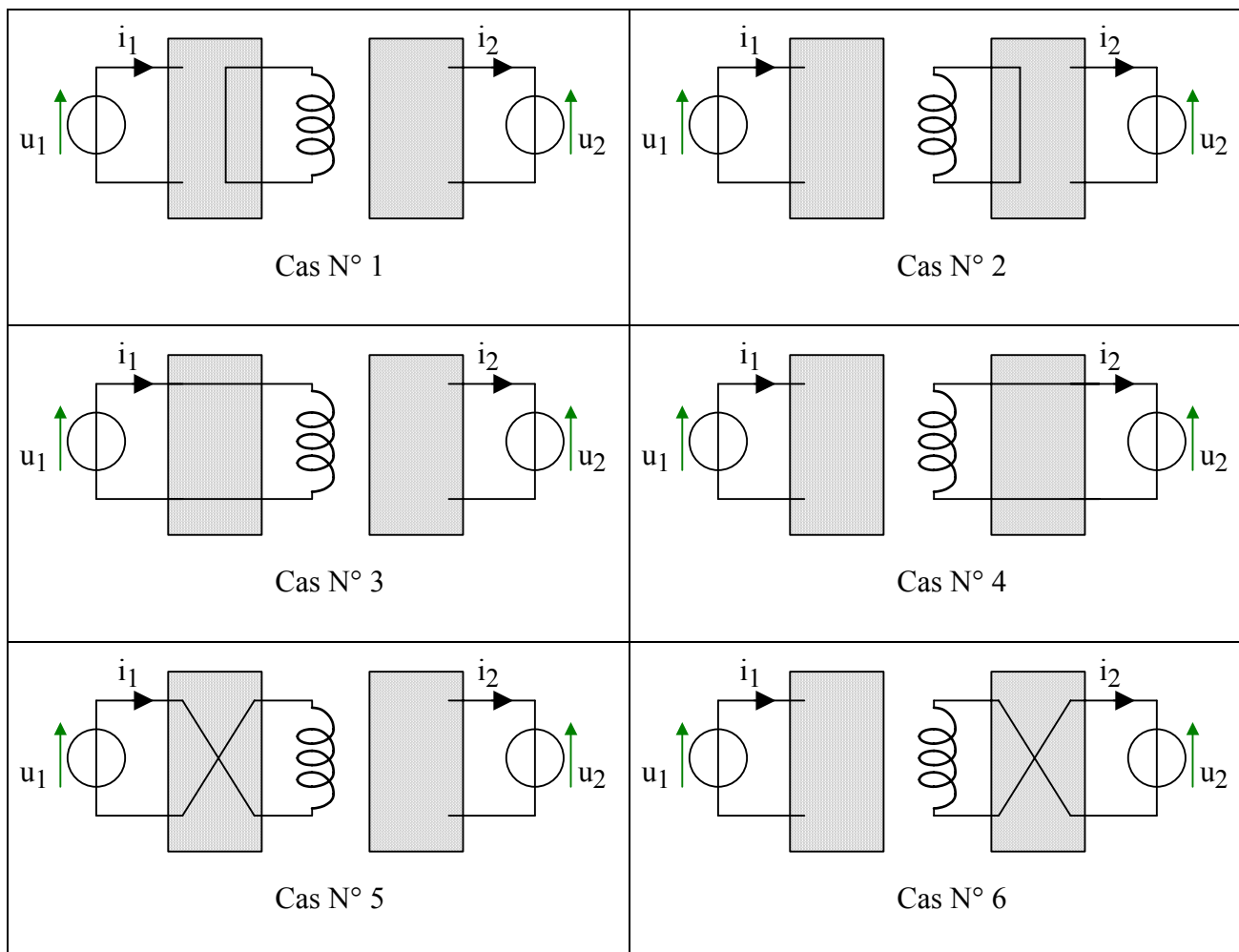
Association en cascade de deux convertisseurs à liaison directe avec un élément courant intermédiaire (une inductance).

Il n'est pas possible de relier simultanément l'inductance avec les deux éléments tension u_1 et u_2 , car si $u_1 \neq u_2$, cela engendre une discontinuité de ces tensions.

Chaque convertisseur à liaison directe (dans sa version la plus générale) offre trois possibilités : « pas de liaison » ou « liaison directe » ou « liaison en croisant les conducteurs ».

Faisons l'inventaire de toutes les possibilités d'interconnexion entre les éléments tension u_1 , u_2 et l'inductance offertes par cette nouvelle association.

Ensuite, afin de simplifier la structure du convertisseur résultant, nous pourrions éliminer les interconnexions qui ne sont pas indispensables.



Il n'est pas nécessaire de retenir toutes les configurations proposées dans le tableau précédent pour avoir toutes les possibilités d'échange d'énergie entre les éléments tension et courant:

Les configurations des cas N°1 et N°2 conduisent au même résultat.

La succession des configurations N°5 et N°6 donne le même résultat que la succession N°3 et N°4

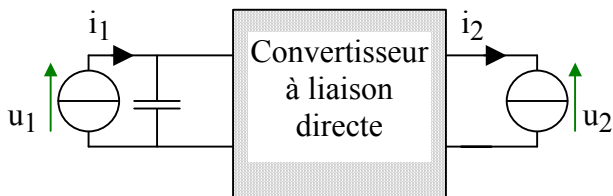
La succession des configurations N°5 et N°4 donne le même résultat que la succession N°3 et N°6

Pour limiter le nombre d'interrupteurs nécessaires, nous pouvons par exemple retenir uniquement les configurations 2, 3, 4 et 6. Toutes les possibilités d'échange d'énergie entre les éléments tension sont ainsi réalisables.

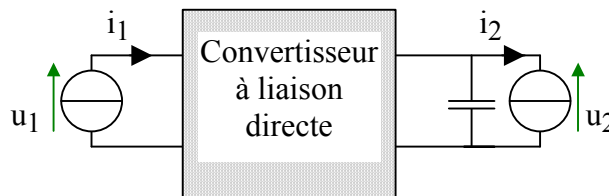
Etablir la structure du convertisseur généralisé tension ↔ tension permettant de réaliser les quatre configurations retenues avec le minimum d'interrupteurs. (Réponse 2:)

5.2 Convertisseur courant ↔ courant

Pour effectuer cette conversion, trois méthodes sont possibles:



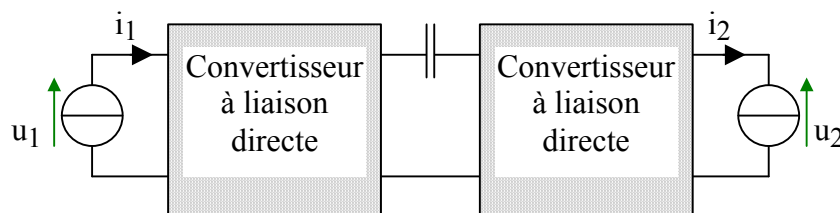
Changement de l'élément courant « i_1 » en élément tension (par l'adjonction d'un condensateur).



Changement de l'élément courant « i_2 » en élément tension (par l'adjonction d'un condensateur).

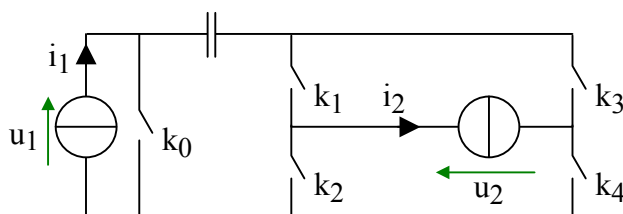
Ces deux solutions conduisent à des « convertisseurs à liaison directe » (puisque'il s'agit de l'association d'un élément tension et d'un élément courant).

La troisième solution consiste à associer un convertisseur courant ↔ tension avec un convertisseur tension ↔ courant.



Association en cascade de deux convertisseurs à liaison directe avec un élément tension intermédiaire (un condensateur).

Le même type de démarche que précédemment conduit au convertisseur généralisé courant ↔ courant suivant :



6 PROBLEMES ET EXERCICES

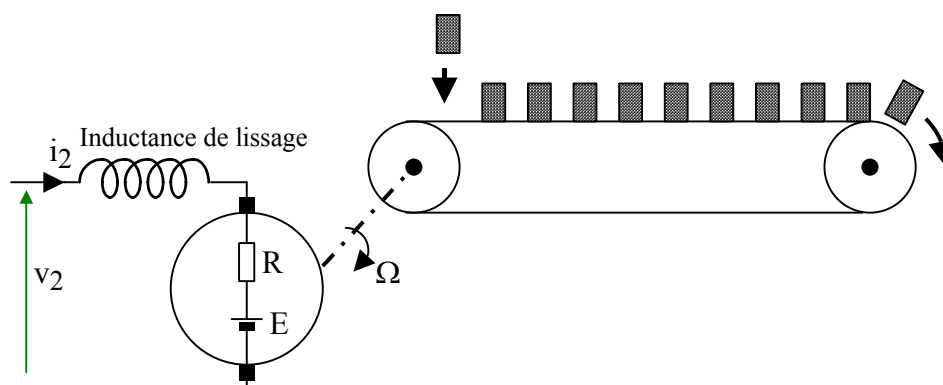
Chap 2. Exercice 1 : Structure d'un hacheur réversible en courant.

Contexte (cahier des charges):

A partir d'une **source de tension constante V_1** réversible en courant mais non-réversible en tension, on veut alimenter une machine à courant continu à flux constant.

La machine entraîne un tapis transporteur sans inversion du sens de déplacement, mais avec une possibilité de freinage.

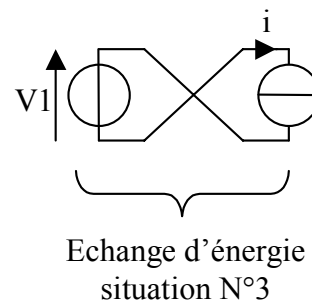
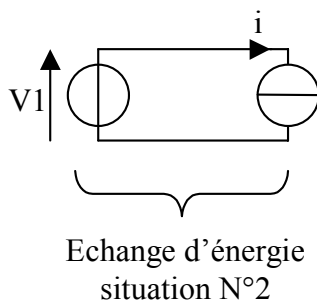
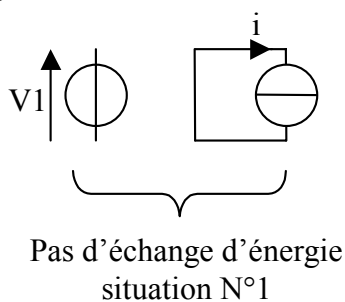
Une inductance de lissage est mise en série avec la machine constituant ainsi un élément courant.



Dans ces conditions, le couple électromagnétique de la machine doit pouvoir s'inverser et donc que le signe de son courant i_2 .

La tension v_2 à ses bornes varie en amplitude en fonction de la vitesse de rotation, mais elle est de signe constant car, le sens de rotation étant constant, il n'est pas indispensable de l'inverser.

Sélectionner parmi les trois possibilités suivantes celles qui sont nécessaires. En déduire le schéma (avec le minimum d'interrupteurs) du convertisseur à liaison directe répondant au cahier des charges.



Ce convertisseur est appelé « hacheur direct réversible en courant ».

Chap 2. Exercice 2 : Structure N°1 d'un hacheur en pont.

Contexte (cahier des charges):

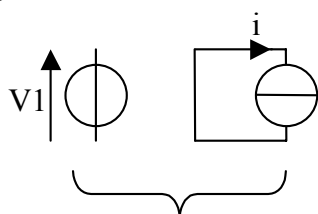
A partir d'une **source de tension constante** V_1 réversible en courant mais non-réversible en tension, on veut alimenter une machine à courant continu à flux constant.

La machine actionne un treuil effectuant des opérations de levage. Dans ces conditions, son couple électromagnétique est de sens constant et par conséquent **le signe de son courant est constant**.

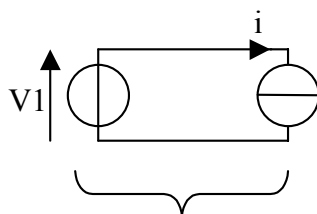
Pour effectuer les opérations de montée et de descente de la charge, la machine doit pouvoir tourner dans les deux sens de rotation. Par conséquent **le signe de la tension à ses bornes doit pouvoir s'inverser**.

Une inductance de lissage est mise en série avec la machine constituant ainsi un élément courant.

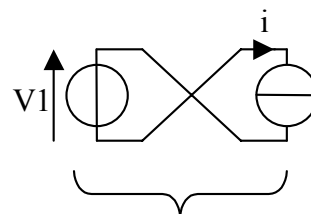
Sélectionner parmi les trois possibilités suivantes celles qui sont nécessaires. En déduire le schéma (avec le minimum d'interrupteurs) du convertisseur à liaison directe répondant au cahier des charges.



Pas d'échange d'énergie
situation N°1



Echange d'énergie
situation N°2

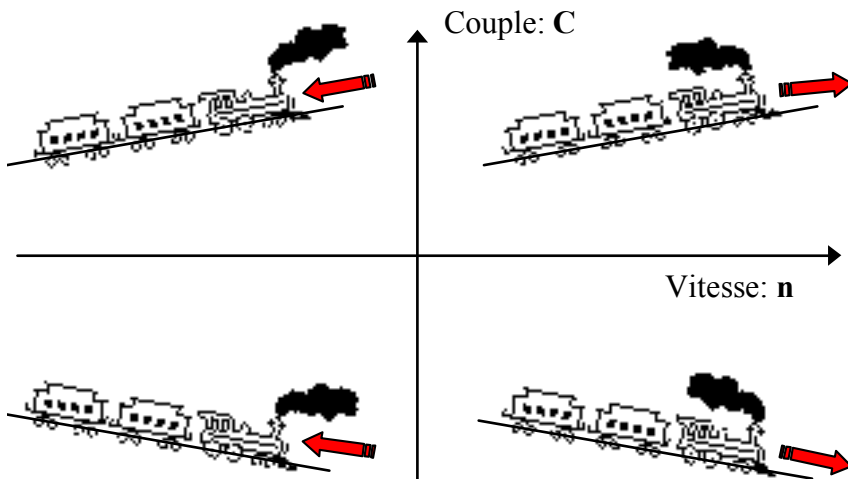


Echange d'énergie
situation N°3

Chap 2. Exercice 3 : Structure N°2 d'un hacheur en pont.

Contexte (cahier des charges):

A partir d'une **source de tension constante V_1** réversible en courant mais non-réversible en tension, on veut alimenter une machine à courant continu à flux constant de façon à la faire fonctionner dans les **quatre quadrants** du plan couple vitesse.

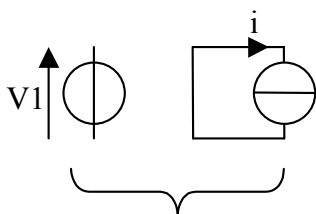


La machine doit donc pouvoir fonctionner avec une vitesse positive ou négative, et avec un couple positif ou négatif. Ce qui donne donc quatre possibilités (les quatre quadrants représentés ci-contre de manière imagée).

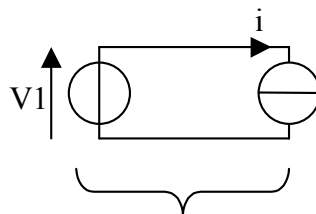
Pour obtenir ces quatre possibilités, la machine doit pouvoir être alimentée sous une **tension moyenne positive ou négative**, avec un **courant moyen positif ou négatif**.

La machine (nécessairement accompagnée de son inductance de lissage) constitue donc une charge "courant" réversible en courant et réversible en tension.

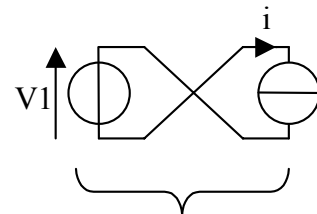
Sélectionner parmi les trois possibilités suivantes celles qui sont nécessaires. En déduire le schéma (avec le minimum d'interrupteurs) du convertisseur à liaison directe répondant au cahier des charges.



Pas d'échange d'énergie
situation N°1

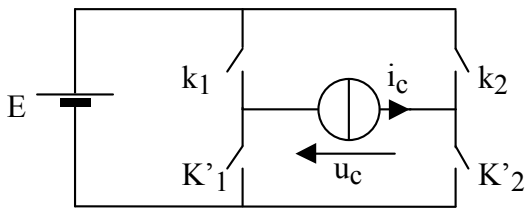


Echange d'énergie
situation N°2



Echange d'énergie
situation N°3

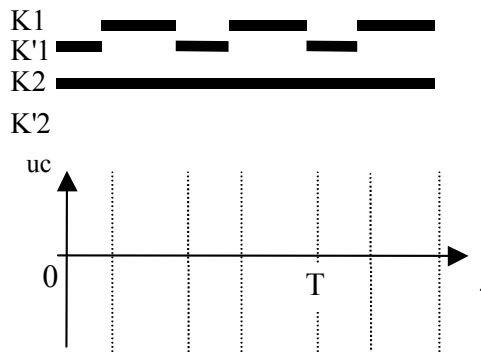
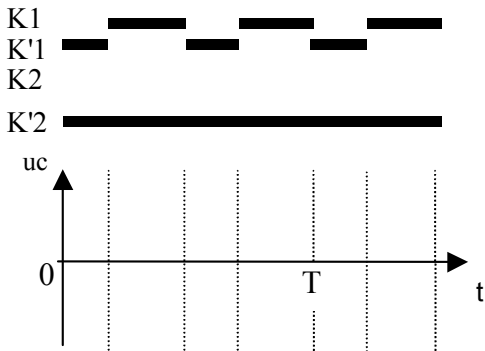
Chap 2. Exercice 4 : Hacheur en pont avec différentes lois de commande.



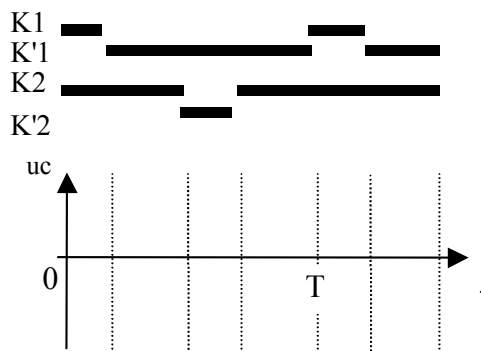
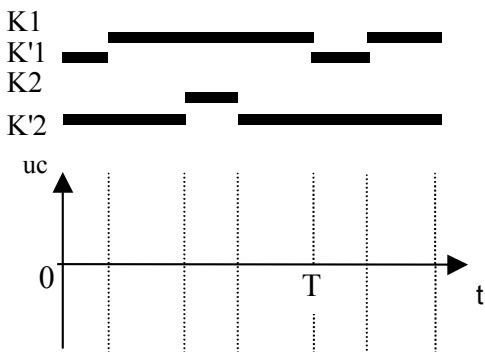
Pour éviter tout court-circuit de la source "tension" E et pour éviter d'interrompre le courant i_c dans la charge "courant": $K'1 = \overline{K1}$ et $K'2 = \overline{K2}$.

Dans les six cas de commande proposés ci dessous, déterminer $u_c(t)$ à partir des intervalles de fermeture des interrupteurs indiqués par des traits forts. Représenter dans chaque cas sa valeur moyenne. Conclure sur l'intérêt de chaque loi de commande en ce qui concerne sa facilité de mise en œuvre et le nombre de commutation (et donc les pertes par commutation) des interrupteurs.

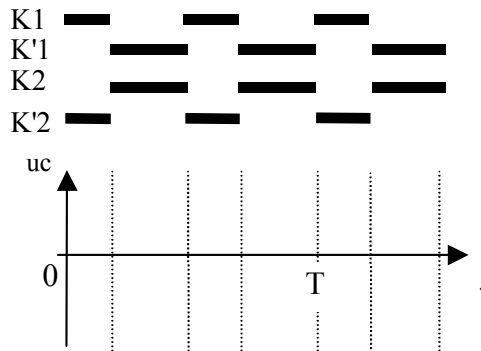
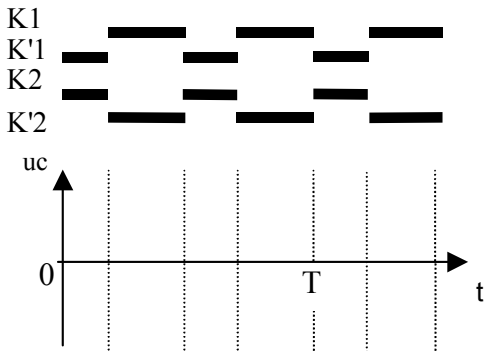
Loi de commande N°1 :



Loi de commande N°2 :



Loi de commande N°3 :



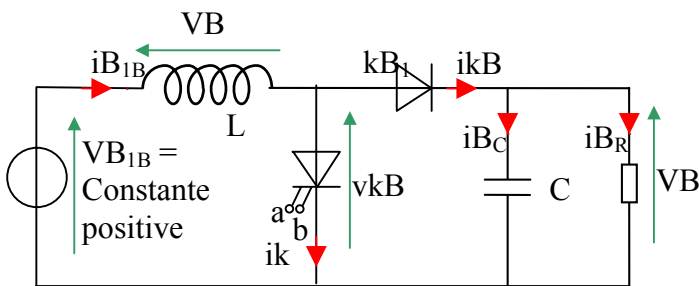
Chap 2. Exercice 5 : Comportement d'une alimentation à découpage boost.

L'objectif est d'obtenir une tension continue d'amplitude variable à partir d'une source de tension continue d'amplitude fixe V_1 (par exemple une batterie d'accumulateur)

La charge sera supposée équivalente à une résistance R .

De façon à obtenir une tension la plus continue possible en sortie, Il est judicieux de placer un condensateur en parallèle avec la charge R , ce qui en fait une charge « tension ».

Ne pouvant pas associer deux éléments tension avec un convertisseur à liaison directe, on a choisi de transformer l'élément tension d'entrée V_1 en un élément courant (au moyen d'une inductance en série).



Si $i_l \neq 0$, pourquoi, les deux interrupteurs sont-ils nécessairement complémentaires ?

L'interrupteur k_1 est une diode. L'interrupteur k_2 est un interrupteur commandable à l'amorçage et au blocage dans le sens direct. Il n'est jamais polarisé dans le sens inverse. Il peut être réalisé avec un transistor

La constante de temps RC de la charge est très grande par rapport à la période du hacheur.

On considérera donc V_R quasiment constant et positif en régime permanent.

La fréquence propre du circuit RLC (quand k_1 conduit) est prise très inférieure à la fréquence de hachage, de façon à éviter toute surtension.

Les composants sont supposés idéaux.

On appelle rapport cyclique la valeur: $a = \frac{\text{temps de conduction de } k_2}{\text{période "T" du convertisseur}}$.

On prendra l'instant de fermeture de k_2 pour instant origine « $t = 0$ ».

A - Etude en régime permanent (périodique) en conduction continue dans L.

- Exprimer $\frac{di_l}{dt}$ en fonction de V_1 , V_R et L lorsque K_2 conduit, puis lorsque K_2 est bloqué.
- Représenter l'allure de $i_l(t)$, $i_{k1}(t)$, $i_{k2}(t)$ et $v_{k2}(t)$ pour un rapport cyclique a quelconque ($0 < a < 1$). (La période sera notée « T », l'intervalle de conduction de chaque interrupteur sera représenté).
- Exprimer V_{k2moy} en fonction de V_R et a , puis en fonction de V_1 . En déduire, en conduction continue dans L , la relation entre V_R/V_1 et a .

d) Exprimer $I_{kI_{moy}}$ en fonction de $I_{I_{moy}}$ et a .

e) Montrer que $I_{kI_{moy}} = \frac{V_R}{R}$.

f) Dédire des résultats précédents l'expression de $I_{I_{moy}}$ en fonction de V_R , R et a ; puis exprimer $I_{I_{moy}}$ en fonction de V_I , R et a .

Vérifier ce dernier résultat en raisonnant sur la puissance reçue par la charge et la puissance fournie par la source.

g) Exprimer $i_{I_{minimum}}$ en fonction de a , T et des éléments du montage.

B - Etude de la limite de conduction continue dans L.

En limite de conduction continue dans L : $i_I(0) = i_I(T) = 0$.

a) Pour $a = \frac{2}{3}$, représenter $i_I(t)$ et $i_{kI}(t)$, si le fonctionnement est à la limite de conduction continue.

b) En utilisant les résultats de l'étude en conduction continue, déterminer en fonction de V_I , L , a et T , la condition sur R qui assure la conduction continue dans L .

C - Etude en conduction discontinue dans L.

Hypothèse: la conduction dans L cesse à l'instant $t_I < T$. (Les conditions de conduction continue ne sont plus remplies)

a) Représenter l'allure de $i_I(t)$, $i_{kI}(t)$, $i_{k2}(t)$ et $v_{k2}(t)$ pour $a = \frac{2}{3}$ et $t_I = \frac{5.T}{6}$.

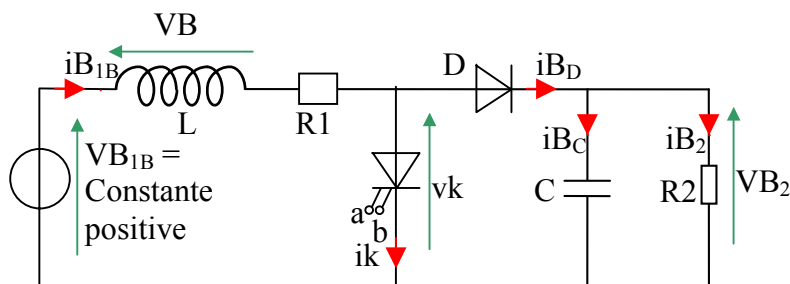
b) Montrer que, pour un même rapport cyclique et des valeurs de L , V_I et T identiques (seule R change), V_R / V_I est plus grand en conduction discontinue qu'en conduction continue. (Comparer $i_I(t)$ en limite de conduction continue et en conduction discontinue.

c) Exprimer t_I en fonction de a , T , V_R et V_I .

Après avoir déterminé la relation entre la puissance fournie par la source est $(v_I \cdot i_I)_{moy}$, et la

puissance reçue par la charge $\frac{V_R^2}{R}$, établir l'expression de V_R / V_I en conduction discontinue en fonction de a , T , R et L .

Chap 2. Exercice 6 : Alimentation boost en prenant en compte la résistance interne de la bobine.



Rapport cyclique:

$$a = \frac{\text{temps de fermeture de K}}{\text{période du hacheur}}$$

Hypothèses:

- Les composants sont supposés idéaux sauf la bobine qui est modélisée par une inductance L en série avec une résistance R_1 .
- $R_2 \cdot C \gg T$ donc $V_2 \approx cte$.
- $L/R_1 \gg T$ donc $i_1(t)$ peut être confondu avec son développement limité au 1^o ordre. $i_1(t)$ sera donc représenté sous forme de segments de droites.
- $\sqrt{L \cdot C} \gg T$. Il n'y a donc pas d'oscillations lorsque D est passante.
- Le régime est **permanent** (périodique). La **conduction** est supposée **continue** dans l'inductance.

a) Exprimer $v_k(t)$ en fonction de V_1 , L , R_1 et $i_1(t)$ quel que soit t . En déduire une expression de $V_{k_{moy}}$ en fonction de V_1 , L , R_1 et $I_{1_{moy}}$.

b) Sachant que $V_1 = cte$, $V_2 \approx cte$ et $i_1(t) \approx$ segments de droites, représenter l'allure de $i_1(t)$ pour $a = 2/3$ (sans préciser son échelle mais en précisant ses asymptotes en fonction de V_1 , V_2 et des composants).

Sous $i_1(t)$, représenter $v_k(t)$ et $i_D(t)$.

En déduire $V_{k_{moy}}$ en fonction de V_2 , a , et des composants; ainsi que $I_{D_{moy}}$ en fonction de $I_{1_{moy}}$ et a .

c) Montrer que $V_2/R_2 = I_2$ est égal à $I_{D_{moy}}$.

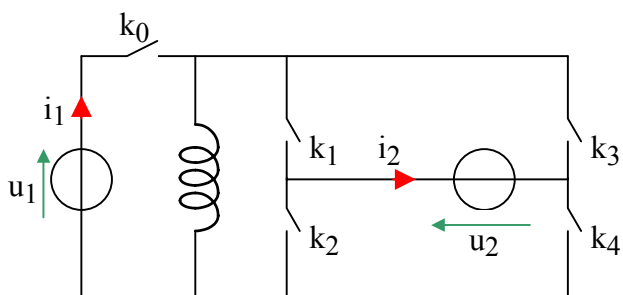
d) Déduire des relations précédentes la relation donnant $I_{1_{moy}}$ en fonction de I_2 et a ; et la relation donnant V_2 en fonction de V_1 , a et des composants.

e) Pour V_1 et les composants donnés, déterminer la valeur de a pour laquelle V_2 est maximum. Déterminer l'expression de V_2 maximum.

Application numérique: $V_1 = 12 \text{ V}$, $R_1 = 3 \text{ } \Omega$, $R_2 = 61 \text{ } \Omega$. Calculer $V_{2_{maximum}}$.

f) Calculer $I_{1_{moy}}$ en fonction de a .

Chap 2. Exercice 7 : Convertisseur tension ↔ tension généralisé.



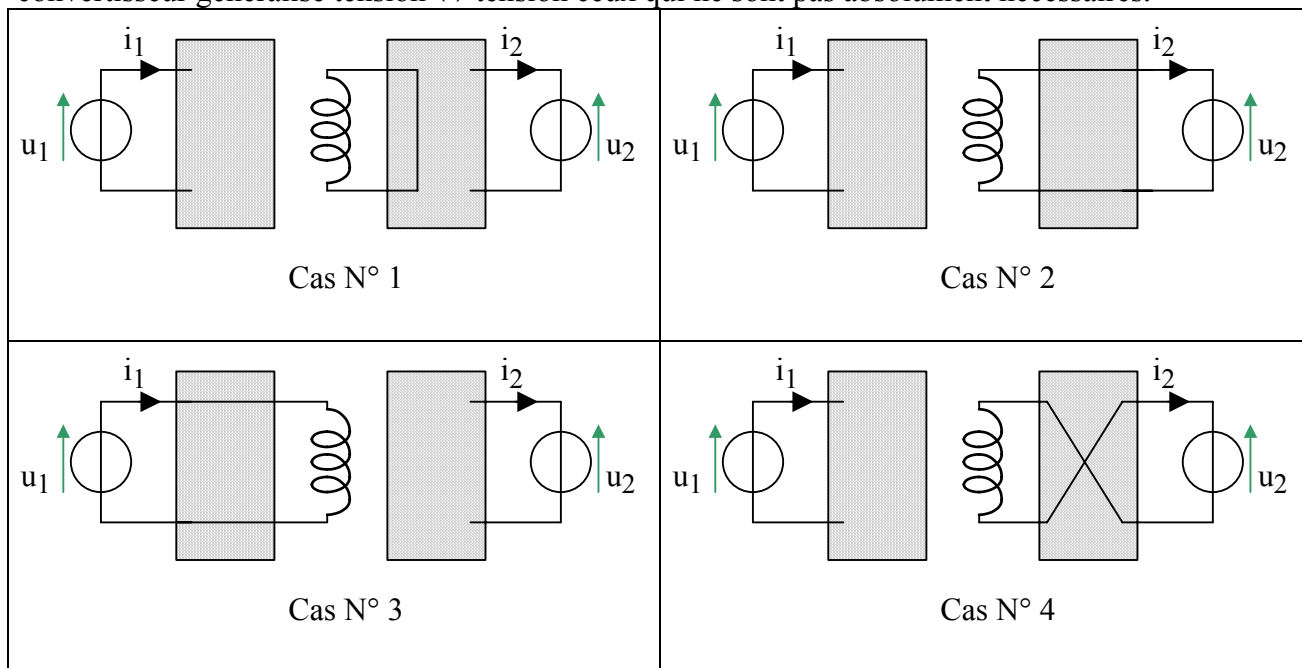
Cette structure impose des incompatibilités entre les différents états (ouvert ou fermé) des interrupteurs.

Etablir la liste de toutes les incompatibilités entre les états (ouverts ou fermés) des interrupteurs k_1 , k_2 , k_3 et k_4 lorsque l'interrupteur k_0 est fermé, puis lorsque l'interrupteur k_0 est ouvert. (u_1 et u_2 sont quelconques)

Chap 2. Exercice 8 : Convertisseur DC ↔ DC, tension ↔ tension, non réversible.

Un élément tension **générateur** u_1 **non réversible** (avec $u_1 > 0$ et $i_1 \geq 0$) à mettre en relation avec un élément tension u_2 **récepteur non réversible** (avec $u_2 > 0$ et $i_2 \geq 0$).

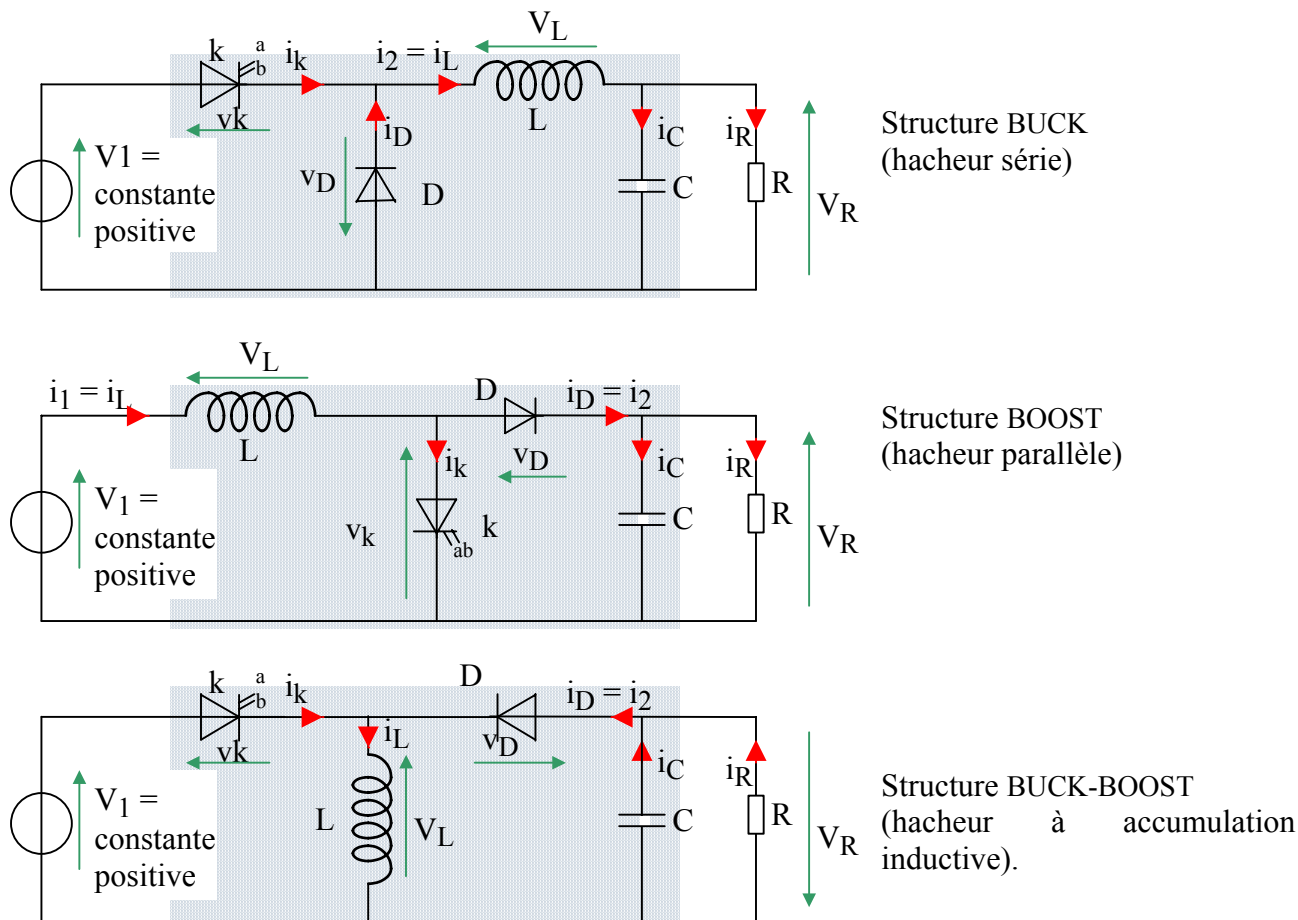
De façon à minimiser le nombre d'interrupteurs à mettre en œuvre, éliminer parmi les quatre cas du convertisseur généralisé tension ↔ tension ceux qui ne sont pas absolument nécessaires.



Déterminer la structure nécessitant le minimum d'interrupteurs. Représenter le schéma simplifié en mettant en évidence la position des interrupteurs.

Chap 2. Exercice 9 : Comparaison des trois convertisseurs tension ↔ tension : alimentations à découpage non réversibles.

L'objectif est de comparer les trois montages suivants en régime périodique et en conduction continue dans l'inductance :

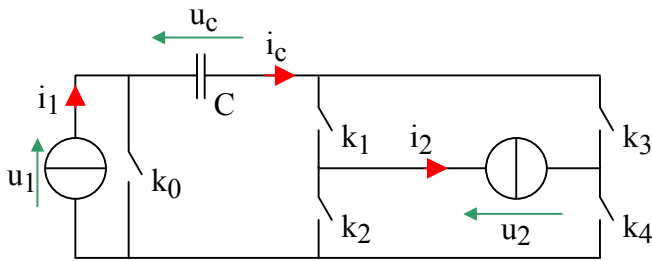


On suppose par hypothèse que $i_L > 0$ et V_R quasiment constant.

Soit le rapport cyclique $a = \frac{\text{temps de fermeture de K}}{\text{période}}$

- Quel est le signe de V_R ?
- Dans chaque cas, représenter l'allure de $V_L(t)$ pour un rapport cyclique « a » donné et en déduire les rapports $\frac{V_R}{V_1}$ en fonction de « a ». Que se passe-t-il si $a \rightarrow 1$?
- Dans chaque cas, représenter l'allure de $V_k(t)$ pour un rapport cyclique « a » donné. Commenter les contraintes de tension maximum sur l'interrupteur « K ».

Chap 2. Exercice 10 : Convertisseur DC ↔ DC, courant ↔ courant, non réversible.



Par hypothèse, la source courant « i_1 » est génératrice avec $u_1 \geq 0$ et $i_1 \geq 0$. Elle comporte une inductance de lissage, on considèrera $i_1 \approx cte \geq 0$.

Par hypothèse, la source courant « i_2 » est réceptrice avec $u_2 \geq 0$ et $i_2 \geq 0$. Elle comporte également une inductance, on considèrera $i_2 \approx cte \geq 0$.

Le fonctionnement du convertisseur comporte deux phases :

- Charge du condensateur par la source « i_1 » pendant l'intervalle « $a.T$ ».
- Décharge du condensateur dans la charge « i_2 » pendant l'intervalle « $(1 - a).T$ ».

On étudiera uniquement le régime permanent.

- a) Pourquoi ce convertisseur est-il « à liaison indirecte » ?
- b) Sur les schémas ci-dessous, en utilisant deux couleurs différentes, choisir un chemin pour le courant « i_1 » et un chemin pour le courant « i_2 », pendant l'intervalle « $a.T$ » (*sur la figure 1*) et pendant l'intervalle « $(1 - a).T$ » (*sur la figure 2*).

En déduire la structure du convertisseur comportant le minimum (*soit deux*) d'interrupteurs.

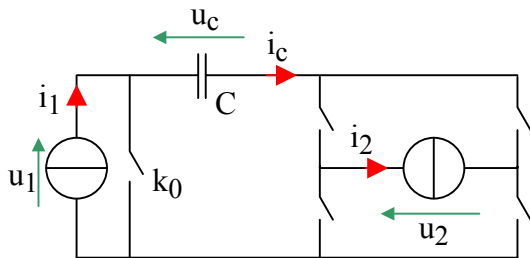


Figure 1

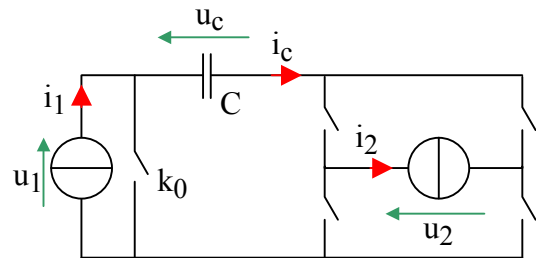


Figure 2

- c) En supposant $\forall t : u_c(t) > 0$, représenter l'allure de $u_c(t)$ en précisant l'expression de $\frac{d(u_c(t))}{dt}$ sur chaque intervalle. En considérant l'ondulation Δu_c , en déduire le rapport $\frac{i_2}{i_1}$.

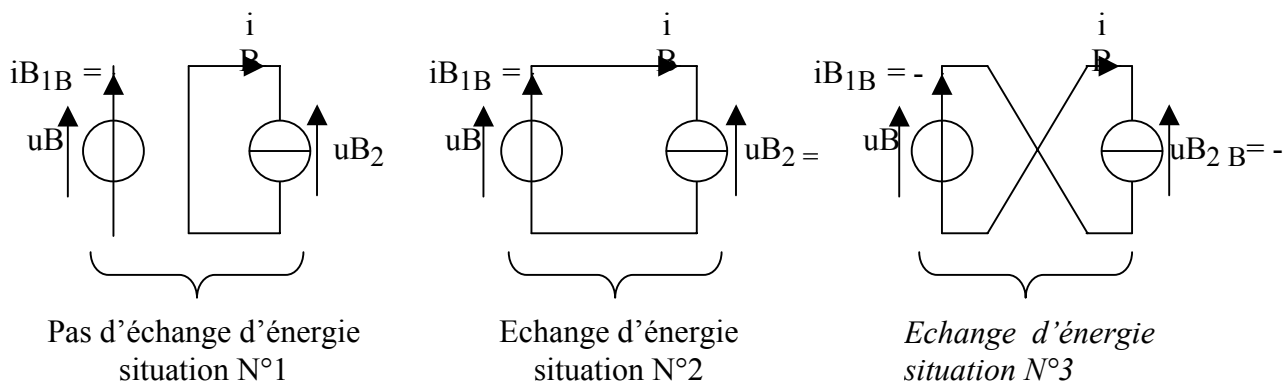
7 CE QUE J'AI RETENU DE CE CHAPITRE.

- a)** Un convertisseur met en relation des éléments dit « tension » ou « courant »
Peut-on imposer une variation brutale de la tension aux bornes d'un élément tension ?
Peut-on imposer une variation brutale du courant dans un élément tension ?
Peut-on imposer une variation brutale de la tension aux bornes d'un élément courant ?
Peut-on imposer une variation brutale du courant dans un élément courant ?
- b)** Qu'est-ce qu'un « convertisseur à liaison directe » ? Quelle est la propriété caractéristique des convertisseurs à liaison directe en ce qui concerne la puissance ?
- c)** Qu'est-ce qu'une « cellule de commutation » ? Quels types d'éléments met-elle en relation ?
- d)** Pourquoi les interrupteurs d'une cellule de commutation sont-ils nécessairement complémentaires ?
- e)** Un « convertisseur en pont » est-il un convertisseur à liaison directe ?
- f)** Un convertisseur en pont met en relation une source de tension $u_1 \neq 0$ et une source de courant $i_2 \neq 0$. Quelles sont les trois possibilités pour la valeur de la tension aux bornes de l'élément courant et quelles sont les trois possibilités pour le courant dans l'élément tension ?

8 REPONSES AUX QUESTIONS DU COURS

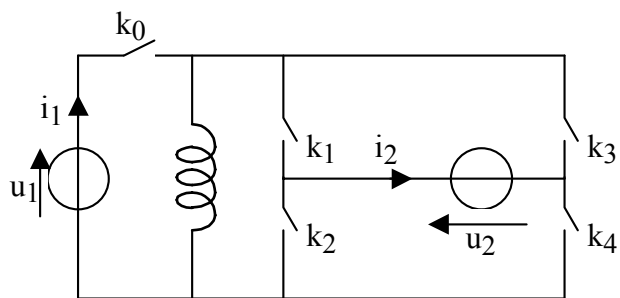
Réponse 1:

Le convertisseur en pont ne permet de réaliser que les trois situations suivantes :



Il y a donc trois valeurs possibles pour u_2 et trois valeurs possibles pour i_1 . [Retour](#)

Réponse 2:



[RetourT](#)