



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA

FACULTÉ DES SCIENCES DEPARTEMENT DE L'ÉLECTROTECHNIQUE

MÉMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE Licence

Spécialité :Electrotechnique

Intitulé

Étude d'un moteur à courant continu
avec un Hacheur

Présenté par :Directrice de Mémoire :

BENROUBA AbdElKadous

Dr Zerzouri Nora

HAFFAR ChemessEddine

Membres de Jury : Dr Tourab et Dr Zerzouri Nora

Année universitaire : 2020/2021

Remerciement

Nous remercions vivement notre promotrice Dr : Zerzouri Nora pour son entière disponibilité tout au long de notre travail et nous le remercions encore pour son aide si précieuse sur plan conseil et orientations.

Nous remercions également nos chers parents qui ont toujours là pour nous. Notre reconnaissance va aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger notre travail. Et aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, Nous remercions tous nos Ami(e)s que l'on aime tant pour leur sincère amitié et confiance, et à qui nous devons nos reconnaissances et nos attachements.

1-Généralités sur le moteur à courant continu

1-1 Introduction.....	05
1-2 Rappel sur les machines à courant continu.....	05
1-3 Symbole de la machine à courant continu.....	05
2-Constitution de la machine à courant continu	05
2-1 Parties fixes	06
2-2 Partie mobile	06
3- Types de machines à courant continu	07
3-1 Moteur à excitation série	07
3-2 Moteur à excitation shunt	07
3-3 Moteur à excitation composée	08
3-4 Moteur à excitation indépendante	08
4- Principe de fonctionnement de la machine	09
5- Bilan de puissance	10
6- Rendement de la machine à courant continu	10
7- Les avantages du moteur à courant continu.....	10
8- Quelques considérations pour le moteur à courant continu	11
9- Utilisation des moteurs à courant continu	11
10-Démarrage des moteurs à courant continu	11
11-Réglage de la vitesse	12
-Expression de la vitesse	12
-Réglage par la tension d'induit	12
-Réglage par le flux (défluxage)	12
-Le mode de réglage de la vitesse est à PUISSANCE CONSTANTE	12
12-Freinage du moteur asynchrone	13

II. Etude des hacheurs

I.1 Définition	17
I.2 Symbole de hacheur	17
1.3 Définition des sources et des récepteurs	17
1.4 Les semi-conducteurs disponibles comme fonction interrupteur	18
2. Types des hacheurs	19
2.1 Hacheur série	19
2.1 Principe	19
2.2 Etude d'un hacheur série charge inductive	20
2.3 Etude d'un hacheur série charge R, L et E_c	24
3. Hacheur parallèle ou élévateur de tension	31
1. Principe	31
2. Montage	31
3. Étude d'un hacheur parallèle	32
IV. Conclusion Générale	38
V. Référence Bibliographique	39

1-1 Introduction

Les moteurs à courant continu sont des machines qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. La construction du moteur est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu peut servir indifféremment comme moteur ou comme génératrice. La machine à courant continu est l'une des machines les plus utilisées dans beaucoup de secteurs industriels. En principe, cette machine est à vitesse variable. Parmi le large domaine d'application du moteur à courant continu, on peut citer la traction électrique (locomotive, tramways).

1-2 Rappel sur les machines à courant continu

1-2-1 Symbole de la machine à courant continu

Les symboles de la machine à courant continu sont représentés par la figure (a,b).

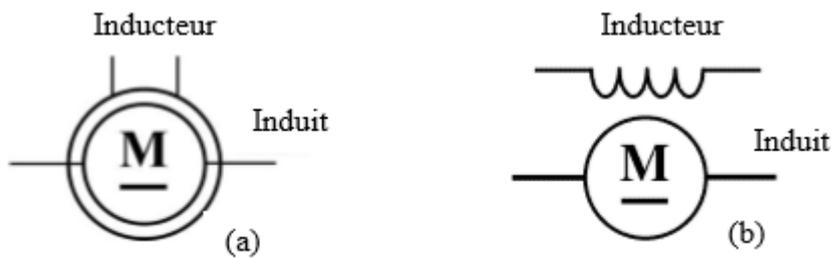


Fig. (a,b): Symboles de la machine à courant continu

1-2-2 Constitution de la machine à courant continu

La figure I.1 représente les différentes parties de la machine à courant continu

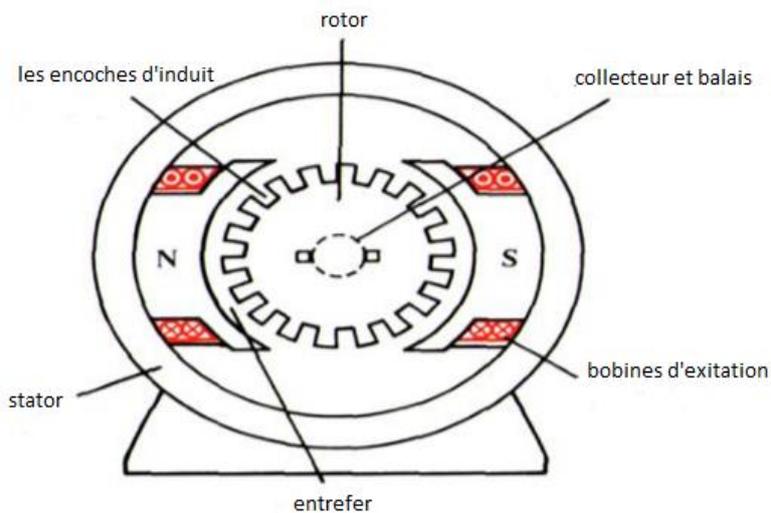


Fig. I.1 : Différentes parties de la machine à courant continu

La machine à courant continu est réversible ; c'est-à-dire que la constitution d'une génératrice est identique à celle d'un moteur.

Elle se compose de deux parties :

Une partie fixe (stator), appelée inducteur, qui produit le flux magnétique nécessaire à la magnétisation de la machine.

Une partie mobile (rotor), appelée induit, qui porte les conducteurs soumis au flux.

1-2-2-1 Parties fixe (inducteur)

La partie fixe se comporte des éléments suivants :

➤ **La carcasse (ou culasse)**

Elle forme la partie extérieure qui supporte les différentes parties de la machine, elle renferme le champ magnétique.

➤ **Les pièces polaires**

Les pièces polaires sont constituées de tôles feuilletées (pour réduire les pertes par courant de Foucault) et permettent de supporter les bobines d'excitation de la machine. Elles permettent donc de produire un champ d'induction [4].

➤ **L'enroulement d'excitation**

L'enroulement d'excitation de la machine à courant continu sert à la création du champ magnétique.

1-2-2-2 Partie mobile (induit)

L'induit entre les pièces polaires, se compose de l'axe du noyau, des enroulements et du collecteur. Sa structure est composée d'un noyau de fer feuilleté pour réduire les pertes par courant de Foucault.

• **LE COLLECTEUR**

Il se compose de lames de cuivre isolées les unes des autres, où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit.

• **LES BALAIS**

Ce sont des tiges conductrices qui frottent sur la surface du collecteur, ils sont faits en graphite ou en charbon.

Le dispositif collecteur/ balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.

1-2-3 Types de la machine à courant continu

On distingue quatre types de machines à courant continu :

1-2-3-1 Moteur à excitation série

Le moteur à excitation série est constitué de deux enroulement induit et inducteur montés en série parcourus par un même courant I_a et sous tension V_a .

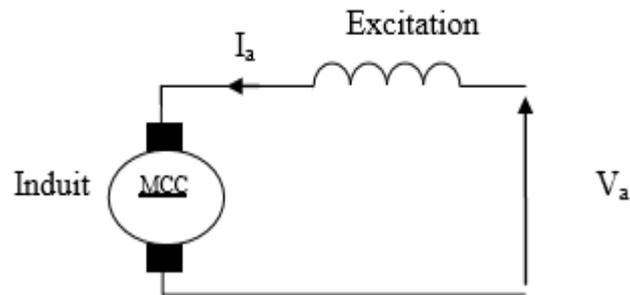


Fig. I.3 : Machine à excitation série

- Caractéristiques** : parmi les caractéristiques du moteur à excitation série, on cite :
- Un couple de démarrage important ;
- Une faible stabilité de vitesse ;
- Un courant d'excitation élevé.

1.2-3-2 Moteur à excitation shunt

On peut utiliser une seule alimentation pour l'induit et l'inducteur. Il suffit de placer l'enroulement inducteur en parallèle avec l'enroulement d'induit.

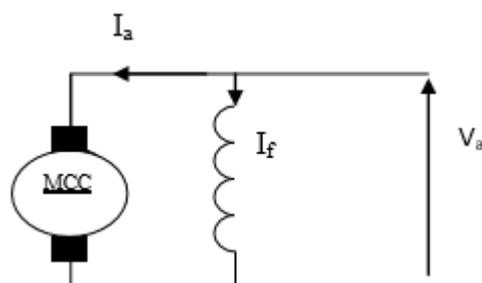


Fig. I.4 : Machine shunt (excitation en dérivation)

- **CARACTERISTIQUES** :

Ce moteur a les caractéristiques suivantes :

- Un fort couple de démarrage et une instabilité de vitesse ;
- L'absence de l'emballement.

1-2-3-3 Moteur à excitation composée

Il porte deux enroulements inducteurs dont l'un est placé en série avec l'induit et l'autre en parallèle.

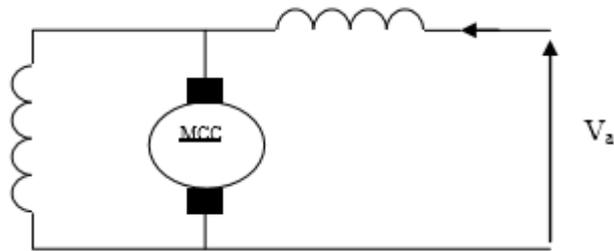


Fig. I.4 Machine compound (excitation composée)

- **CARACTERISTIQUE**

- Un couple de démarrage plus fort ;
- Il a une meilleure stabilité ;
- Il peut fonctionner à faible charge sans risque d'emballement.

1-2-3-4 Moteur à excitation indépendante (séparée)

L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source principale (celle de l'induit),

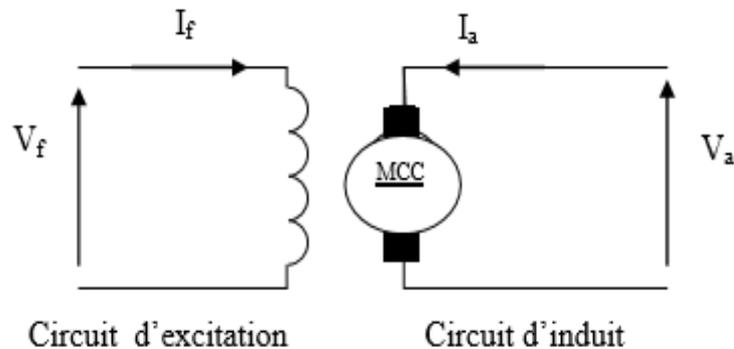


Fig. I.5 : Machine à excitation indépendante

- **CARACTERISTIQUES :**

Ce moteur possède les caractéristiques suivantes :

- Une plage de régulation de vitesse très grande ;
- Une linéarité tension/vitesse, courant/couple.

1-3 Fonctionnement de la machine à courant continu

La machine à courant continu, comme toutes les autres machines électriques, peut fonctionner en moteur ou en générateur.

1-3-1 Fonctionnement en génératrice

Dans le cas d'une génératrice à excitation indépendante. Le rôle d'un générateur est de fournir de l'électricité sous tension continue variable.

Pour cela, il faut lui fournir de l'énergie mécanique sous forme d'un couple qui entraîne la rotation de la machine et également de l'électricité pour alimenter l'excitation, qui crée le champ magnétique. Comme l'enroulement d'excitation est fixe (situé au stator) et parcouru par un courant, le champ qu'il crée est de direction constante. De plus, le couple extérieur fait tourner le rotor.

L'interaction d'un champ fixe et d'un conducteur mobile provoque l'apparition d'une fem induite (E) aux bornes de l'enroulement d'induit. Cette force électromotrice (f.e.m) est recueillie et redressée par les balais qui frottent sur le collecteur.

Selon l'amplitude du champ créé par l'excitation (et donc selon la valeur du courant d'excitation), la tension induite sera d'amplitude variable.

1-3-2 Fonctionnement en moteur

Pour comprendre son principe de fonctionnement, nous allons considérer que l'inducteur et l'induit sont électriquement séparés. Nous sommes donc dans le cas d'un moteur à excitation indépendante.

On alimente l'excitation du moteur. Celui-ci crée un champ d'induction de direction constant. De plus, on fait circuler un courant dans le rotor.

En vertu du principe de Laplace, l'interaction du courant avec un champ qui est lui perpendiculaire crée un couple sur l'enroulement du rotor. Ce couple entraîne la rotation du moteur comme l'indique la formule suivante :

$$f = B \cdot I \cdot L \cdot \sin\alpha \quad (1.1)$$

1-3-3 bilan de puissance

Le bilan des puissances résume toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique.

Les pertes dans la machine à courant continu sont subdivisées en différentes catégories qui sont :

- Les pertes fer.
- Les pertes joules.
- Les pertes mécaniques.
- Les pertes par excitation.

Le bilan, peut être résumé à l'aide du schéma suivant :

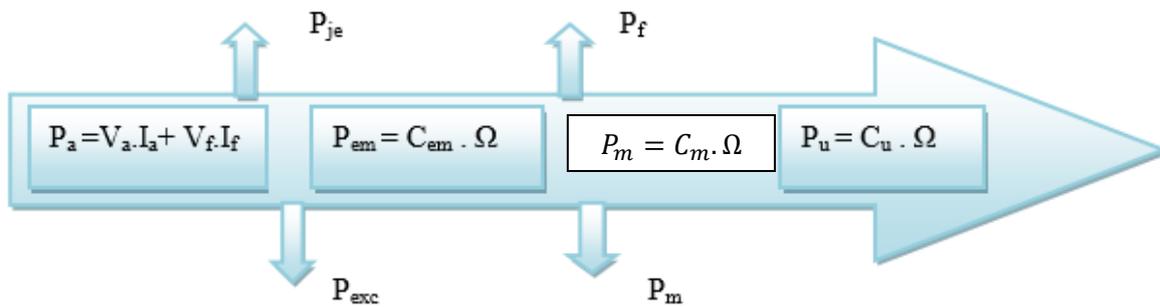


Fig. I.6 : Bilan des puissances

1-3-4 Rendement de la machine à courant continu

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu est la puissance utile divisée par la puissance absorbée,

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (1.2)$$

1-3-5 Avantages de la machine à courant continu

On dit que le moteur industriel par excellence et le moteur asynchrone car, pour une puissance donnée, il est toujours le moins cher, et généralement d'une mise en œuvre simple, à partir du réseau triphasé.

Pourtant, pour l'industriel, le moteur à courant continu reste intéressant dès que la source d'énergie prévue est une batterie d'accumulateur ou, bien entendu, un réseau continu. En effet, avec ce moteur, le réglage de la vitesse est facile.

On rencontre le moteur à courant continu dans les chariots automatiques de transport et dans la plupart des véhicules de traction, c'est-à-dire le contrôle de la vitesse de ce type de moteur est très facile. Avec ce type de moteur le changement du sens de rotation est également très facile.

1-3-4 Quelques considérations pour le moteur à courant continu

Utilisation des moteurs à courant continu Le principal avantage de ces moteurs, c'est qu'il est très facile de faire varier la vitesse de rotation par modification de la tension d'alimentation U en utilisant des ponts redresseurs commandés ou des hacheurs.

1-4 Démarrage des moteurs à courant continu

Nous avons vu que la f.e.m $E = K \cdot n$ Or, au démarrage $n = 0$ d'où $E = 0$.

Pour un moteur à excitation séparée, $U = R \cdot I_D \Rightarrow I_D = \frac{U}{R}$

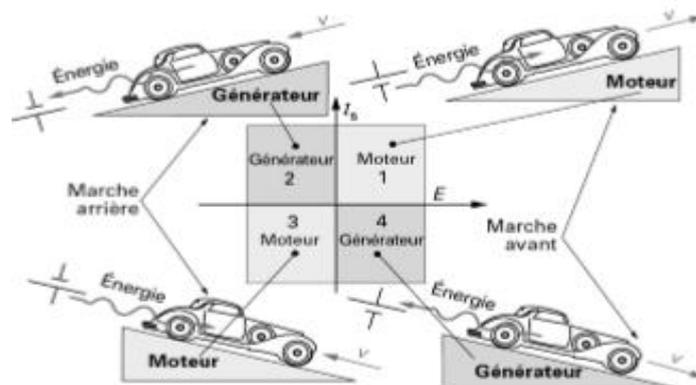
Le courant de démarrage est très important. Ce courant est source de détérioration du moteur, on essaie de limiter ce courant soit par adjonction d'une résistance de démarrage qu'on

diminue progressivement soit par augmentation progressive de la tension d'induit. Dès que le moteur commence à tourner $I_D = \frac{U-E}{R}$ et décroît rapidement jusqu'à sa valeur nominale I . Si le moteur doit démarrer en charge avec une charge qui présente un couple résistant T_R , l'intensité de démarrage doit être $I_D > \frac{T_R}{K\phi}$

Remarque importante : Pour démarrer un moteur à excitation indépendante, on doit commencer par mettre l'induit sous tension et ensuite seulement mettre l'inducteur sous tension. Si le moteur est à vide, il ne faut jamais couper la tension de l'inducteur avant celle de la tension d'induit au risque de voir l'emballement du moteur. Pour un moteur à excitation série, le moteur doit démarrer en charge.

1-5 CONTROLE D'UNE MCC

Les Quadrants de fonctionnement : Conventionnellement lorsque La fem E et le courant d'induit moyen $\langle I_a \rangle$ sont positifs, la machine fonctionnedans le premier quadrant en mode moteur.



L'inversion d'un de ces deux termes permet d'obtenir un mode générateur (Quadrants 2 ou 4).

L'inversion simultanée des 2 termes permet d'obtenir un fonctionnement moteur avec un sens de rotation inversé (Quadrant 3).

Le fonctionnement en mode générateur nécessite une charge mécanique entraînée soit :

- **ponctuellement** par restitution d'énergie cinétique ou potentielle lors respectivement d'un freinage ou de la descente d'une charge mécanique (levage).
- **En permanence** lors d'un entraînement par un couple moteur extérieur (éolienne, turbine...). L'accès à ces différents points de fonctionnements dépend fortement de l'électronique de puissance (hacheur) et de contrôle qui sont associées à la MCC.

1-6 Modes de réglage de la vitesse

- Expression de la vitesse

L'expression de la vitesse du moteur est obtenue à partir de la relation donnant sa f.e.m

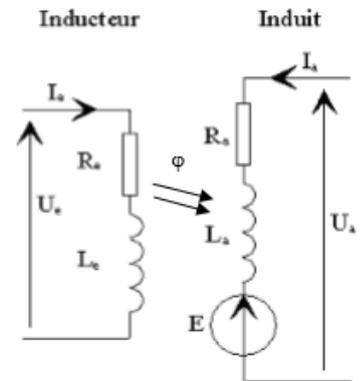
$E = K\Omega_{R/S} \cdot \phi$. Et de la loi des mailles en convention récepteur

$$\Omega_{R/S} = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{K \cdot \phi}$$

Les paramètres agissant sur la vitesse du moteur sont donc :

- La tension d'alimentation de l'induit,
- Le flux d'excitation de la machine,

Le terme $R_a I_a$ étant petit devant U_a , le courant I_a influence peu la vitesse.



1-6-1 Réglage par la tension d'induit

L'action sur la tension U_a n'affecte pas le couple électromagnétique

$$T_E = K \cdot \phi \cdot I_a \quad (1.3)$$

Et si on néglige l'influence le terme $R_a I_a$ devant tU_a , on constate que la vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation de l'induit.

Le mode de réglage de la vitesse est à COUPLE CONSTANT

1-6-2 Réglage par le flux (défluxage)

L'étude des relations donnant le couple ($T_E = K \cdot \phi I_a$) et la vitesse $\Omega_{R/S} = \frac{U_a - R_a I_a}{K \cdot \phi}$ montre que l'augmentation de vitesse (quand ϕ diminue) est obtenue au détriment du couple qui baisse dans les mêmes proportions.

Le mode de réglage de la vitesse est à PUISSANCE CONSTANTE

La machine à courant continu reste commandée par la tension d'induit mais la stratégie de pilotage est déterminée par le courant. Par exemple, pour maintenir le couple constant sur une charge, on mesure le courant de l'induit et on construit une commande qui permet de maintenir cette valeur constante. La commande va élaborer la valeur de la tension d'induit nécessaire à cette stratégie

1-7 Freinage dumoteur à courant continu :

Pour arrêter un moteur à courant continu, on doit appuyer sur le bouton d'arrêt afin de couper l'alimentation. En coupant l'alimentation, la vitesse diminue graduellement sous l'effet des pertes par frottement.

Le moteur prend un certain temps pour s'arrêter.

Dans certaines applications, il faut freiner rapidement le moteur.

Parmi les méthodes de freinage, on distingue :

- le freinage rhéostatique;
- Le freinage par contre-courant ;
- Le freinage par récupération d'énergie.

1-7-1 Freinage rhéostatique:

Le freinage rhéostatique consiste à ouvrir le circuit de l'induit et à le raccorder aux bornes d'une résistance afin que la puissance emmagasinée dans le moteur soit dissipée dans cette résistance.

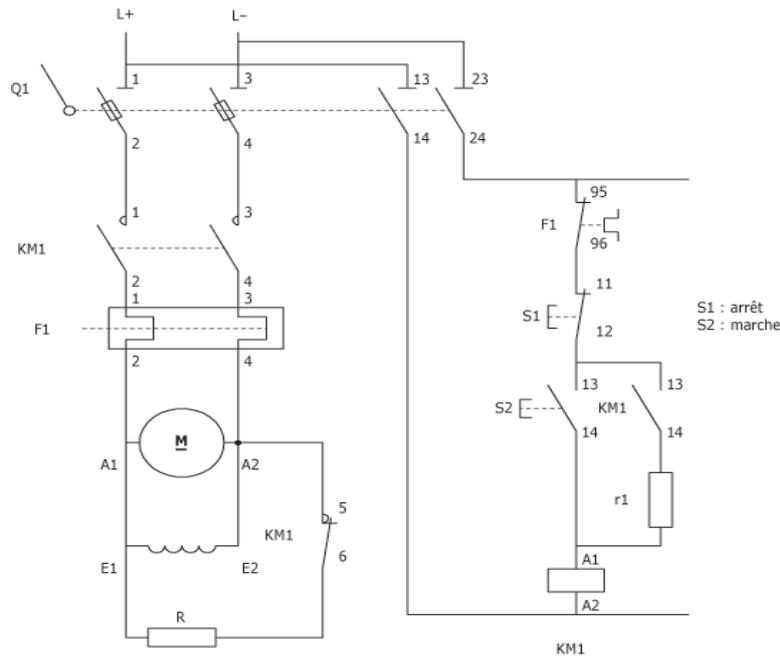
Lorsqu'on coupe l'alimentation de l'induit, le champ étant toujours alimenté, le moteur devient alors une génératrice à excitation séparée qui fonctionne à vide.

En raccordant une résistance R aux bornes de l'induit, la tension induite produit un courant circulant dans le sens inverse dans cette résistance. Il en résulte un couple de freinage d'autant plus grand que ce courant est grand.

En pratique, on choisit la résistance R telle que le courant de freinage, soit environ deux fois le courant nominal. Le moteur fonctionne en quadrant 2 ou 4.

La tension induite diminue progressivement au fur et à mesure que le moteur ralentit. Le courant décroît également. Par conséquent, le couple de freinage diminue et s'annule lorsque le moteur cesse de tourner. Pour un freinage plus rapide, on diminue la résistance de freinage R .

La figure suivante vous montre un schéma du freinage rhéostatique.



En appuyant sur le bouton de marche S2, la bobine du contacteur KM1 enclenche ses contacts de puissance KM1 (1-2 et 3-4), ce qui alimente le moteur.

La résistance de freinage est mise hors-circuit par le contact O de KM1 (5-6) branché en série.

En appuyant sur le bouton d'arrêt, les contacts de puissance KM1 s'ouvrent et le contact O de KM1 se ferme. A ce moment, l'induit débite son courant dans la résistance de freinage R. Le moteur s'arrête lorsque le courant s'annule.

Ce genre de freinage est utilisé dans les montages qui nécessitent des freinages fréquents.

1-7-2 Freinage par contre-courant:

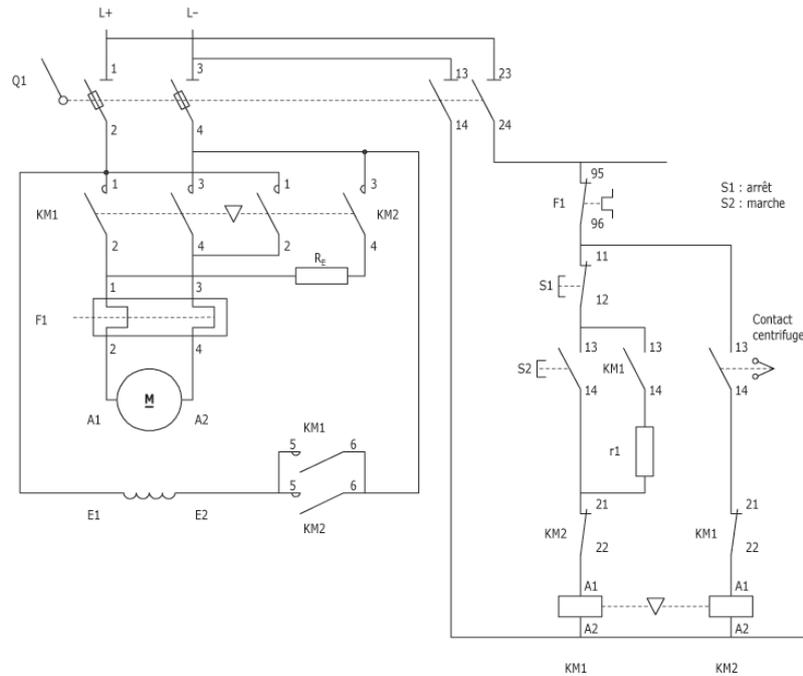
On utilise le freinage par contre-courant pour arrêter un moteur très rapidement. Cette méthode consiste à inverser brutalement le sens du courant dans l'induit.

En inversant le sens du courant de l'induit, la tension du circuit devient égale à la somme de la tension d'alimentation et de la tension induite. Le courant produit dans le sens inverse est très élevé. Pour limiter ce courant, on place une résistance de freinage R en série avec l'induit au moment où l'on inverse le sens du courant.

La valeur de cette résistance est calculée de façon à limiter le courant de freinage à environ deux fois le courant nominal du moteur.

Contrairement au freinage rhéostatique, un couple est développé même à l'arrêt. Dès que le moteur s'arrête, il faut ouvrir immédiatement le circuit afin de l'empêcher de redémarrer dans le sens inverse. Pour cela, on place un interrupteur centrifuge qui détecte le passage de la vitesse par zéro et ouvre le circuit.

La figure suivante vous montre le schéma du freinage par contre-courant.



Lorsqu'on appuie sur le bouton de marche S2, la bobine du contacteur KM1 est excitée, fermant ses contacts de puissance KM1 (1-2 et 3-4) pour l'induit et KM1 (5-6) pour l'inducteur. Le moteur démarre.

En appuyant sur le bouton d'arrêt S1, les contacts principaux de KM1 s'ouvrent et le contact KM1 (21-22) se ferme, ce qui alimente la bobine KM2. Les contacts de puissance KM2 (1-2 et 3-4) pour l'induit et KM2 (5-6) pour l'inducteur se ferment et le sens du courant dans l'induit est inversé. Le moteur ralentit, puis s'arrête pour essayer de redémarrer dans le sens inverse.

Au moment où la vitesse passe par zéro, l'interrupteur centrifuge (13-14) s'ouvre, ce qui coupe l'alimentation de la bobine KM2. Ses contacts de puissance s'ouvrent et le moteur demeure à l'arrêt.

Le freinage par contre-courant est plus efficace du fait qu'il arrête complètement le moteur à un instant où la vitesse par freinage rhéostatique vaut encore 25 % de sa valeur nominale.

1.7.3 Freinage par recuperationd'énergie:

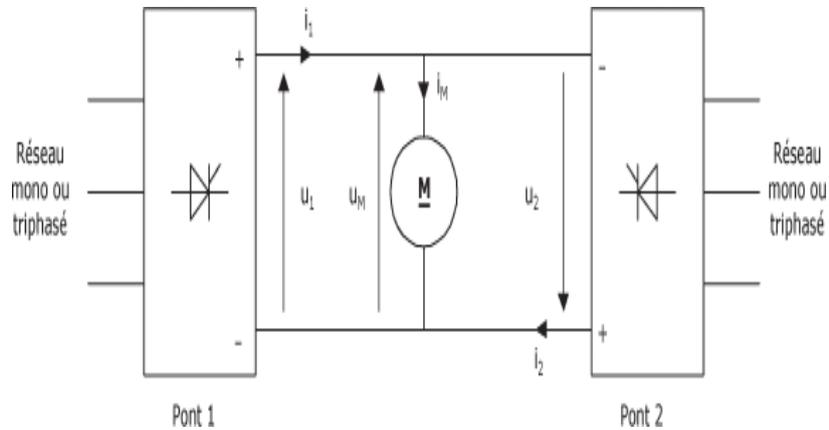
Comme nous l'avons vu pour le freinage rhéostatique, pendant le freinage par récupération d'énergie, le moteur fonctionne en génératrice ; seulement au lieu de perdre l'énergie de freinage dans des résistances, on la récupère sur le réseau d'alimentation.

Cette forme de freinage convient bien à la traction électrique (train, trolley, métro...) où les masses à freiner ou à ralentir sont importantes.

Le point de fonctionnement du moteur doit pouvoir être placé dans n'importe lequel des quatre quadrants du plan couple-vitesse de rotation, car le moteur doit pouvoir tourner dans les deux sens (marche avant et marche arrière), avec un couple moteur ou de freinage.

Pour ce fonctionnement, il est nécessaire d'associer deux ponts complets monophasés ou triphasés tête bêche (figure suivante).

Montage des ponts pour un fonctionnement en moteur et freinage dans les deux sens de rotation :



Chacun des deux ponts 1 ou 2 peut jouer le rôle de redresseur ou d'onduleur assisté. Un redresseur fonctionne en onduleur assisté lorsque l'énergie passe du continu vers l'alternatif. C'est nécessairement un pont tout thyristor et pour des angles d'allumage $> 90^\circ$. Exemple :

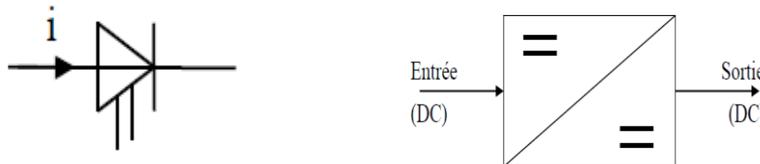
- Avec le pont 1 on peut faire tourner le moteur dans un sens. Le freinage en récupération sera assuré par le pont 2 lorsque la machine fonctionne en génératrice.
- Pour faire tourner le moteur dans l'autre sens, on commandera le pont 2 et pour assurer son freinage le pont 1. On peut donc fonctionner dans les quatre quadrants.

Chapitre 2 : Etude des hacheurs

2.1 Définition

L'hacheur, ou convertisseur continu - continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés, ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Symbole de l'hacheur:



2-2 Définition des sources et des récepteurs :

Pour déterminer si une source ou un récepteur réel doit être considéré comme étant une source de tension ou une source de courant et évaluer dans quelle mesure son comportement se rapproche de celui d'une source ou d'un récepteur parfait, il faut considérer deux échelles de temps :

- La première, qui est, de l'ordre de la microseconde, correspond à la durée des commutations des semi-conducteurs d'un état à l'autre (fermeture ou ouverture).
- La deuxième, qui est, de l'ordre de la centaine de micro seconde, correspond à la durée des cycles d'ouverture – fermeture des semi-conducteurs au sein du variateur. C'est, l'échelle des temps correspondant aux commutations qui fixe la nature des sources et des récepteurs.
- On est en présence d'une source ou d'un récepteur de courant si on ne peut pas interrompre le courant $i(t)$ qui y circule par une commande à l'ouverture d'un semi-conducteur. Cette interruption provoquerait des pics importants dans l'onde de la tension $u(t)$.

Ces pics ($L \cdot di(t)/dt$) apparaissent dès que la source ou le récepteur ont une inductance interne L non négligeable compte tenu de la rapidité de la variation du courant ($di(t)/dt$).



Symbole d'une source de courant

On est en présence d'une source ou d'un récepteur de tension si on ne peut pas faire varier brusquement la tension $u(t)$ à ses bornes par une commande à la fermeture d'un semi-conducteur. Cet enclenchement entraîne des pics importants dans l'onde du courant $i(t)$.

Ces pics ($C \cdot du(t)/dt$) apparaissent dès que la source ou le récepteur ont une capacité d'entrée C non négligeable vu la rapidité de variation de la tension ($du(t)/dt$).



Symbole d'une source de tension

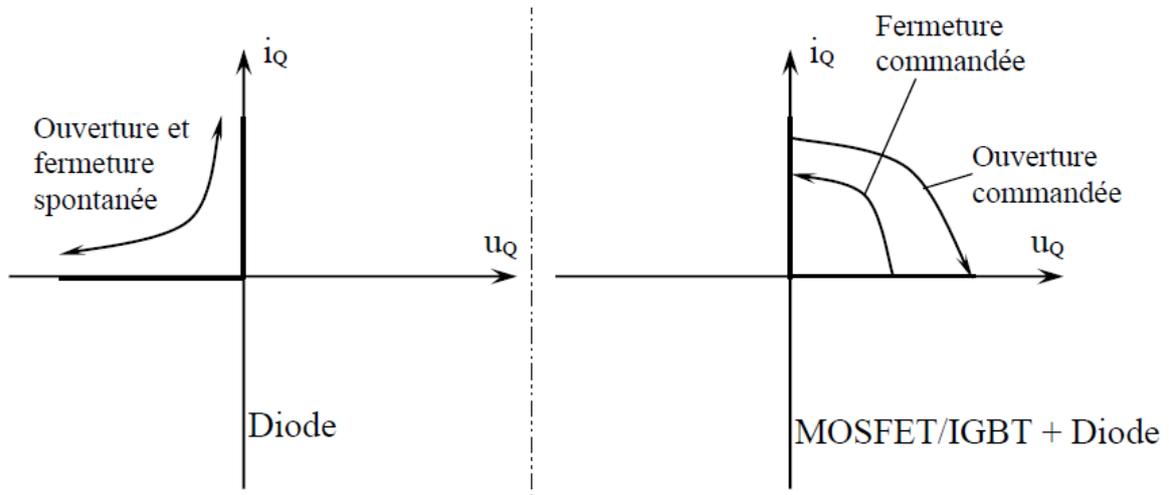
L'échelle des temps liée à la durée des cycles d'ouverture et fermeture des semi-conducteurs au sein du variateur de courant continu à pulsation, c'est-à-dire l'échelle des temps liée à la fréquence de commutation, indique dans quelle mesure on peut considérer une source ou un récepteur comme parfait.

En effet, c'est, la fréquence de commutation du variateur qui fixe :

- La fréquence de la composante parasite présente sur la tension $u(t)$ aux bornes d'une source ou d'un récepteur de courant. Celui-ci est, d'autant plus parfait que son impédance est, plus élevée à cette fréquence,
- La fréquence de la composante parasite présente dans le courant qui traverse une source ou un récepteur de tension. Celui-ci est, d'autant plus parfait que son impédance est, plus faible à cette fréquence.

2-3 Les semi-conducteurs disponibles comme fonction interrupteur :

Les deux types de semi-conducteurs les plus utilisés dans les hacheurs sont la diode et le transistor MOSFET/IGBT associé à une diode de conduction dont les caractéristiques sont représentées



Caractéristique d'une diode

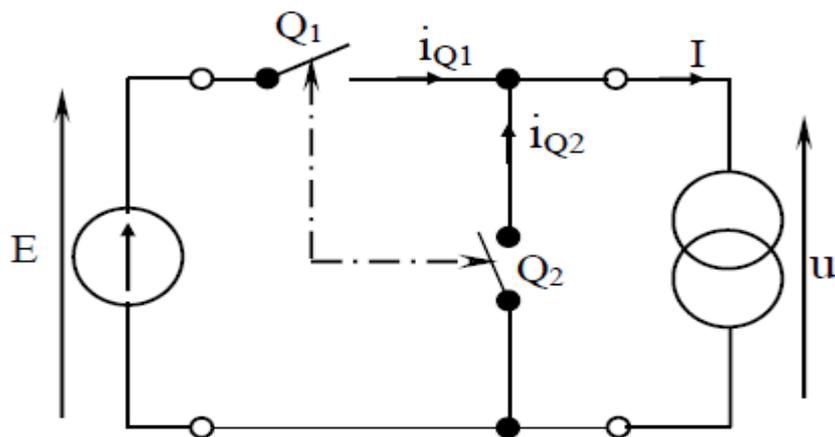
Caractéristique d'une diode+IGBT(ou MOSFET)

2.4 Principe de fonctionnement d'un hacheur

2-4-1 Hacheur série :

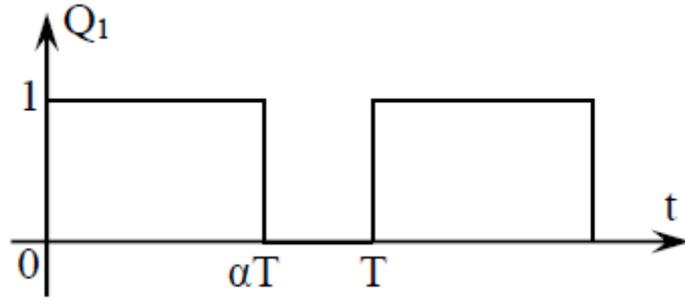
2-4-1-1 Principe

L'Hacheur série commande le débit d'une source de tension continu U dans un récepteur de courant I .



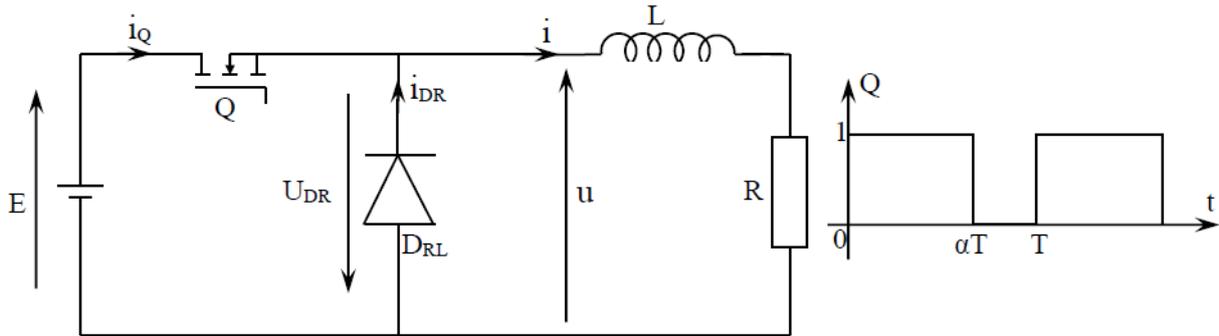
Pour régler le transfert d'énergie, on applique aux interrupteurs une commande périodique.

La période de pulsation T de celle-ci peut être choisie arbitrairement dans la mesure où la source et le récepteur que relie le variateur de courant continu se comportent comme des circuits à fréquence de commutation nulle.



2-4-2-2 Etude d'un hacheur série charge inductive

Montage :



La charge inductive accumule une énergie électromagnétique $W = L.i^2/2$ si Q est, passant. Il serait dangereux de libérer brutalement cette énergie par l'ouverture de Q, il en résulterait une surtension $e = - d\phi/dt$ qui provoquerait des graves dommages. On évite cet inconvénient en utilisant une diode de roue libre (DRL) qui assure le passage du courant si Q est ouvert.

Le fonctionnement est alors continu, le courant évolue entre une limite inférieure $IMIN$ et une limite supérieure $IMAX$

2-4-1-3 Analyse de fonctionnement :

Nous pouvons décomposer cette analyse en deux parties distinctes :

- 1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, DRL ouverte).

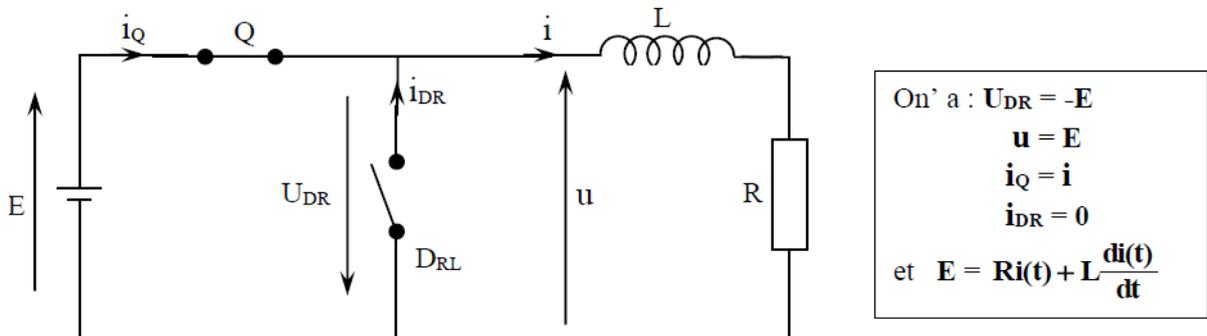


Schéma équivalent d'un Hacheur série pour $t \in [0, \alpha T]$

Déterminons le courant $i(t)$: on a $E = Ri(t) + L.di(t)/dt$ avec $i(0) = IMIN$ et $i(\alpha T) = IMAX$

* Solution sans second membre ($0 = R.i(t) + L.di(t)/dt$)

$$0 = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow Ri(t) = -L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow \frac{di(t)}{i(t)} = -\frac{R}{L} dt \Rightarrow \int \frac{di(t)}{i(t)} = \int -\frac{R}{L} dt$$

$$\text{donc } \log[i(t)] = -\frac{R}{L}t + K \Rightarrow i(t) = A \left[\exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \right]$$

* Solution particulière ($E = Ri(t)$)

$$\text{Donc } i(t) = E/R$$

* Solution générale :

$$i(t) = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t} \text{ on pose } \tau = \frac{L}{R} \text{ donc } i(t) = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

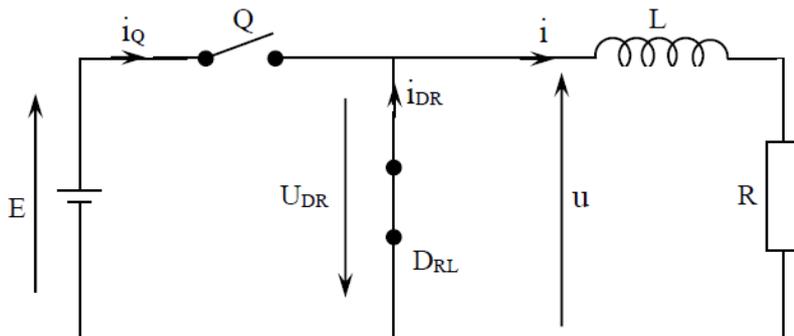
$$\text{à } t=0 \text{ on a } i(0) = I_{MN} = \frac{E}{R} + A \Rightarrow A = I_{MN} - \frac{E}{R}$$

$$\text{donc } i(t) = \frac{E}{R} + \left(I_{MN} - \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Calcul de IMAX ?

$$\text{à } t = \alpha T \text{ on a } i(\alpha T) = I_{MAX} = \frac{E}{R} + \left(I_{MN} - \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \Rightarrow I_{MAX} = I_{MN} e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \right)$$

➤ 2er cas : $\alpha T < t < T$ (Q ouvert, DRL fermée).



<p>On' a : $U_{DR} = 0$ $u = 0$ $i_Q = 0$ $i_{DR} = i$ et $0 = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$</p>

Schéma équivalent d'un Hacheur série pour $t \in [\alpha T, T]$

Déterminon le courant $i(t)$: on a $0 = R.i(t) + L.di(t)/dt$ avec $i(T) = I_{MIN}$ et $i(\alpha T) = I_{MAX}$

$$0 = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow Ri(t) = -L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow \frac{d(t)}{i(t)} = -\frac{R}{L} dt \Rightarrow \int \frac{di(t)}{i(t)} = \int -\frac{R}{L} dt$$

$$\text{donc } \log[i(t)] = -\frac{R}{L}t + K \Rightarrow i(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{avec } \tau = \frac{L}{R}$$

$$t = \alpha T \quad \text{on a } i(\alpha T) = I_{MAX} = Ae^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \Rightarrow A = I_{MAX}e^{\frac{\alpha T}{\tau}}$$

$$\text{donc } i(t) = I_{MAX}e^{-\frac{(t-\alpha T)}{\tau}}$$

Calcul de IMIN ?

$$\text{à } t = T \text{ on a } i(T) = I_{MIN} = I_{MAX}e^{-\frac{(T-\alpha T)}{\tau}} \Rightarrow IMN = I_{MAX}e^{-\frac{T}{\tau}(1-\alpha)}$$

- Relation entre les tensions d'entrée et de sortie

$$\text{On a } u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow u(t)dt = Ri(t)dt + Ldi(t) \Rightarrow \int_0^T u(t)dt = \int_0^T Ri(t)dt + \int_0^T Ldd(t).$$

En régime établi, la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle

$$\text{Donc } U = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt = E \frac{\alpha T}{T} = \alpha E \Rightarrow U = \alpha E \quad \text{et} \quad I = \frac{\alpha E}{R}$$

Hacheur série est équivalent à un transformateur non réversible à courant continu de rapport de transformation α avec $\alpha \leq 1$.

- Ondulation du courant :

Il est important pour un hacheur d'apprécier l'importance de l'ondulation du courant.

$$\text{On a : } I_{MAX} = I_{MN}e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \right) \quad (1)$$

$$I_{MAX} = I_{MN}e^{\frac{T}{\tau}(1-\alpha)}$$

$$\text{donc } (1) - (2) = I_{MN}e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \right) = I_{MN}e^{\frac{T}{\tau}(1-\alpha)} = 0$$

$$\Rightarrow I_{MN}e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \left(1 - e^{\frac{T}{\tau}} \right) = -\frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \right) \Rightarrow I_{MN} = -\frac{E}{R} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \right)}{\left(1 - e^{\frac{T}{\tau}} \right)} e^{\frac{\alpha T}{\tau}} \Rightarrow I_{MN} = \frac{E}{R} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \right)}{\left(1 - e^{\frac{T}{\tau}} \right)}$$

$$\text{donc } I_{MN} = \frac{E}{R} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right)} \quad \text{et} \quad I_{XXX} = I_{MN}e^{\frac{T}{\tau}(1-\alpha)}$$

On considère L très élevée donc $\tau \gg T$ donc les morceaux d'exponentielle sont des segments de droites ce qui permet un calcul simplifié des courant I_{MAX} et I_{MIN} (car $e^\varepsilon = 1 + \varepsilon$ si $\varepsilon \gg 1$).

Ce qui donne :

$$I_{\text{MIN}} = \frac{\alpha E}{R} \quad \text{et} \quad I_{\text{MAX}} = I_{\text{MN}} \left(1 + \frac{T}{\tau} (1 - \alpha) \right)$$

$$\text{Donc} \quad I_{\text{MAX}} = \frac{\alpha E}{R} \left(1 + \frac{T}{\tau} (1 - \alpha) \right)$$

Il est alors facile de calculer l'ondulation ΔI crête à crête :

$$\Delta I = I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}} = \frac{\alpha E}{R} \left(1 + \frac{T}{\tau} (1 - \alpha) \right) - \frac{\alpha E}{R} \Rightarrow \Delta I = \frac{\alpha E T}{R \tau} (1 - \alpha)$$

Calcul de ΔI_{MAX} :

$$\text{Donc } \Delta I \text{ est maximum pour } \alpha = 0,5 \Rightarrow \Delta I_{\text{MAX}} = \frac{TE}{4L} = \frac{E}{4Lf}$$

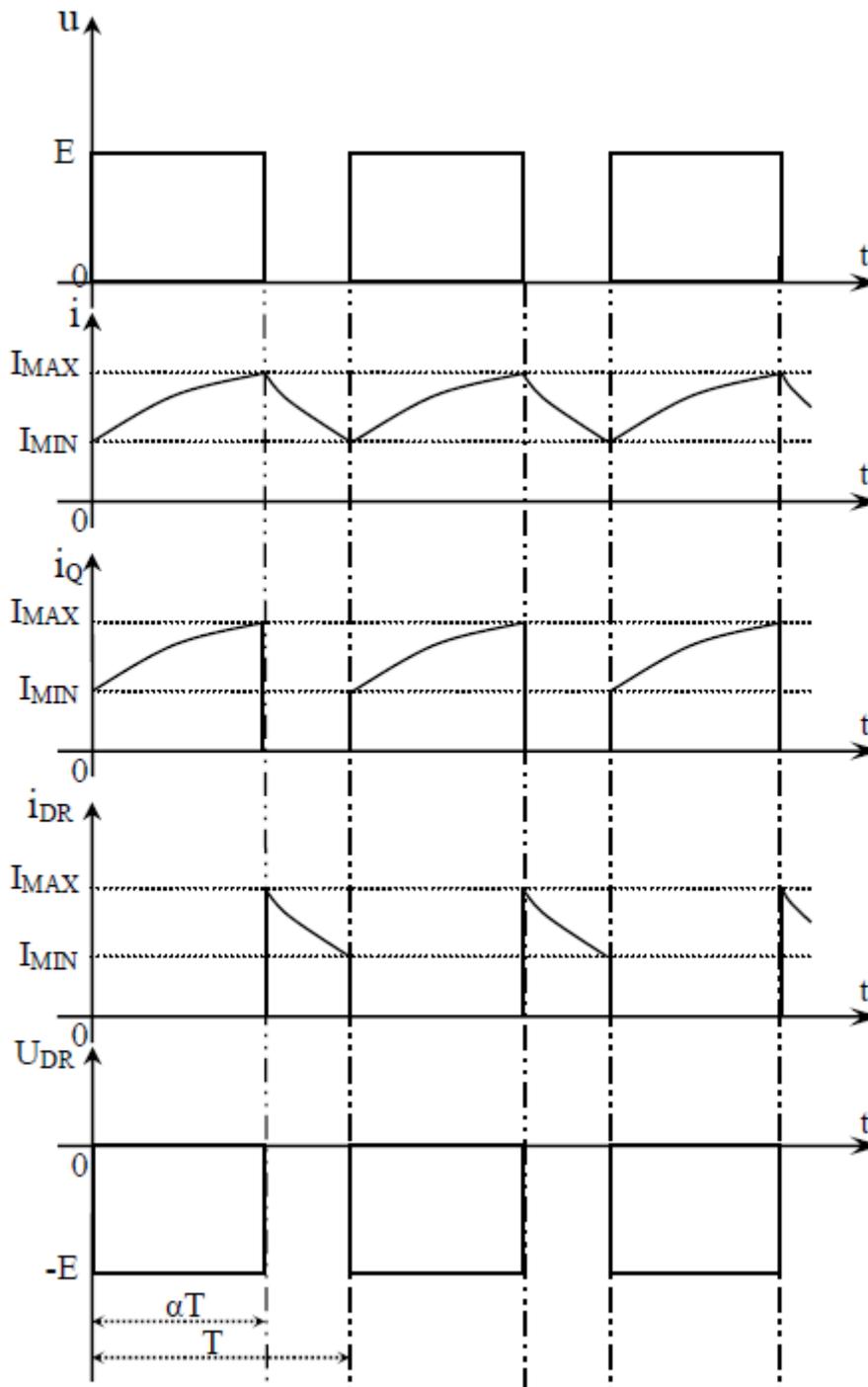
$$\text{on a } \tau = \frac{L}{R} \Rightarrow \Delta I = \frac{TE}{L} \alpha (1 - \alpha) \Rightarrow \Delta I' = \frac{TE}{L} (1 - 2\alpha) = 0$$

Ainsi, pour réduire l'ondulation du courant doit-on agir sur les paramètres suivants :

- Augmentation de la fréquence de hachage f.
- Augmentation de la constante de temps τ du récepteur.
- Réduction de la durée relative des intervalles de coupure.

Enfin, dans le cas particulier où l'inductance est infinie on a $I_C = I_{\text{MIN}} = I_{\text{MAX}}$.

- **Forme d'ondes des principales grandeurs :**



Forme d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur série pour une charge R-L

2-4-2-3 Etude d'un hacheur série charge R, L et Ec

Quand on alimente un récepteur qui comporte une f.c.e.m (EC) la conduction peut être soit continue, soit discontinue.

a) Conduction continue :

Montage :

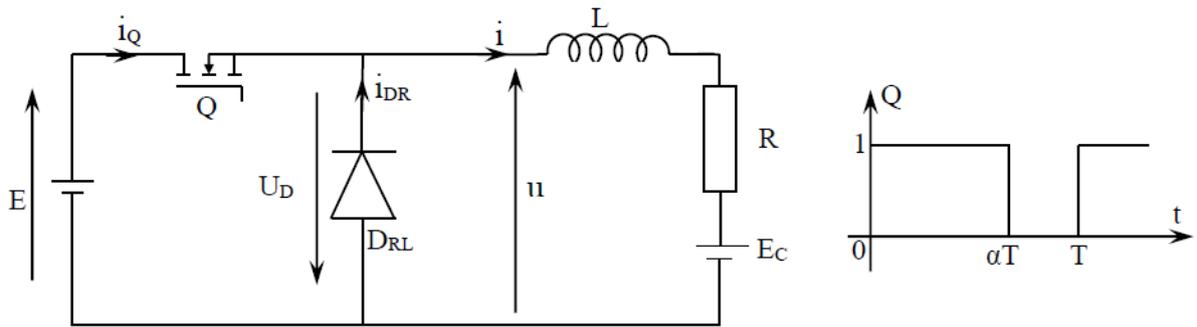


Schéma d'un Hacheur série charge R-L-EC

• **Analyse de fonctionnement :**

Généralement l'inductance L de la source de courant à une valeur suffisamment élevée pour que la valeur moyenne I du courant $i(t)$, au-dessous de laquelle la conduction devient discontinue, soit telle qu'elle rend RI négligeable par rapport à U.

Nous pouvons décomposer cette analyse en deux parties distinctes :

➤ 1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, DRL ouverte).

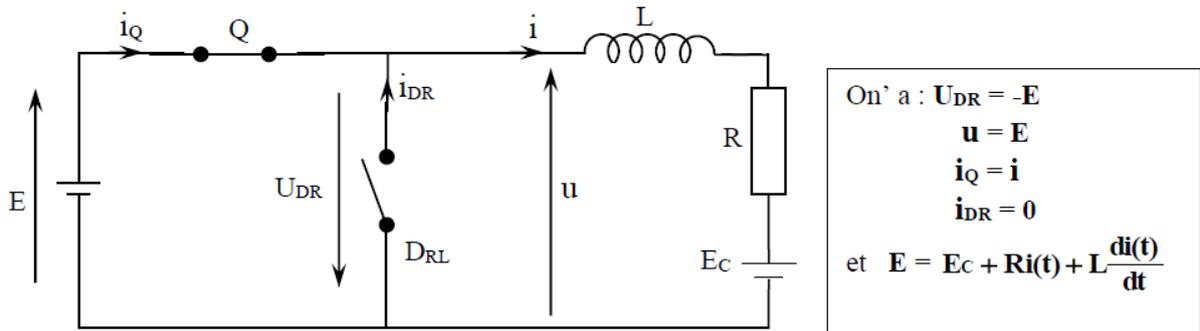


Schéma équivalent d'un Hacheur série (charge R-L-EC) pour $t \in [0, \alpha T]$

Déterminons le courant $i(t)$: on a $E \gg R \cdot i(t)$ donc $E = E_c + L \cdot di(t)/dt$ avec $i(0) = I_{MIN}$ et $i(\alpha T) = I_{MAX}$

$$E = E_c + L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow E - E_c = L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow d(t) = \frac{E - E_c}{L} dt \Rightarrow \int di(t) = \int \frac{E - E_c}{L} dt$$

$$\text{donc } i(t) = \frac{E - E_c}{L} t + K \text{ à } t = 0 \text{ on a } i(0) = I_{MN} = K$$

$$\text{donc } i(t) = \frac{E - E_c}{L} t + I_{MN}$$

Calcul de I_{MAX} ?

$$\text{à } t = \alpha T \text{ on a } i(\alpha T) = I_{MAX} = \frac{E - EC}{L} \alpha T + IMN \Rightarrow IMAX = \frac{E - EC}{L} \alpha T + IMN$$

➤ 2eme cas : $\alpha T < t < T$ (Q ouvert, DRL fermée).

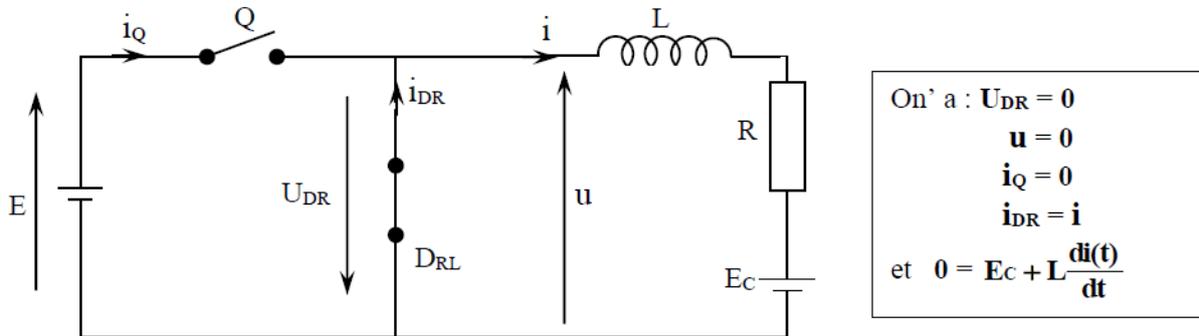


Schéma équivalent d'un Hacheur série (charge R-L-EC) pour $t \in [\alpha T, T]$

Déterminons le courant $i(t)$: on a $0 = Ec + L \cdot di(t)/dt$ avec $i(T) = IMIN$ et $i(\alpha T) = IMAX$

$$0 = Ec + L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow Ec = -L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow di(t) = -\frac{Ec}{L} dt \Rightarrow \int di(t) = \int -\frac{Ec}{L} dt$$

$$\text{donc } i(t) = -\frac{EC}{L} t + K$$

$$t = \alpha T \quad \text{on a} \quad i(\alpha T) = I_{MAX} = -\frac{EC}{L} \alpha T + K \Rightarrow K = ImAX + \frac{EC}{L} \alpha T$$

$$\text{à donc } i(t) = -\frac{Ec}{L} t + ImAX + \frac{EC}{L} \alpha T \Rightarrow i(t) = -\frac{EC}{L} t + ImAX + \frac{Ec}{L} \alpha T .$$

$$i(t) = -\frac{EC}{L} (t - \alpha T) + I_{MAX}$$

Calcul de $IMIN$?

$$\text{à } t = T \text{ on a } i(T) = I_{MN} = -\frac{EC}{L} T(1 - \alpha) + IMAX \Rightarrow IMIN = -\frac{EC}{L} T(1 - \alpha) + IMAX$$

- Relation entre les tensions d'entrée et de sortie :

Si $u(t)$ désigne la tension aux bornes de la charge qui comporte une résistance R , une inductance L et Ec (f.c.é.m) on a :

$$u(t) = Ec + Ri(t) + L \frac{d(t)}{dt} \Rightarrow u(t)dt = (Ec + Ri(t))dt + Ldi(t) \Rightarrow \int_0^T u(t)dt = \int_0^T (Ec + R(t))dt + \int_0^T Ld(t)En$$

Régime établi, la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle

Donc $U = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt = E \frac{\alpha T}{T} = \alpha E \Rightarrow U = \alpha E$ et $I = \frac{\alpha E - E_c}{R}$

- Ondulation du courant :

Il est important pour un hacheur d'apprécier l'importance de l'ondulation du courant

On a: $\Rightarrow I_{MAX} = \frac{E - E_c}{L} \alpha T + I_{MN}$ $I_{MIN} = -\frac{E_c}{L} T(1 - \alpha) + I_{max}$

Donc on a $\frac{E - E_c}{L} \alpha T = \frac{E_c}{L} T(1 - \alpha) \Rightarrow \alpha E - \alpha E_c = E_c - \alpha E_c \Rightarrow E_c = \alpha E$

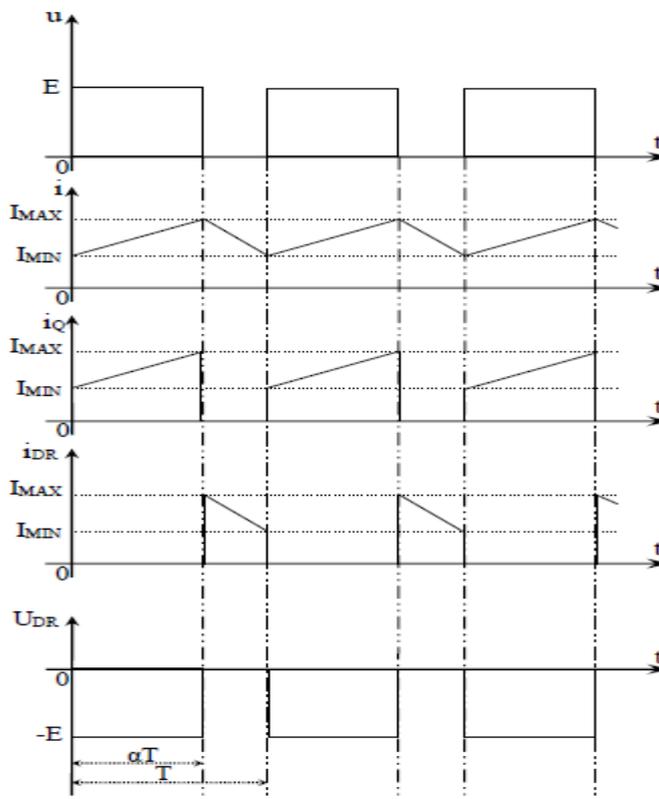
donc $\Delta I = I_{MAX} - I_{MIN} = \frac{E}{L} T \alpha(1 - \alpha) \Rightarrow \Delta I = \frac{E}{L f} \alpha(1 - \alpha)$

Comme on l'a montré, cette ondulation est, maximale pour $\alpha = 0,5$

$$\Rightarrow \Delta I_{MAX} = \frac{TE}{4L} = \frac{E}{4Lf}$$

Ainsi, pour réduire l'ondulation du courant doit-on agir sur la fréquence de hachage f.

- Forme d'ondes des principales grandeurs



Forme d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur série pour une charge R-L-Ec

b) Conduction discontinue :

La conduction est discontinue si la valeur minimale I_{MIN} du courant s'annule à chaque période à $t = \beta T$ pour $\beta T \in [\alpha T, T]$; soit $i(\beta T) = 0$.

2-4-2-4 Analyse de fonctionnement

➤ 1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, DRL ouverte).

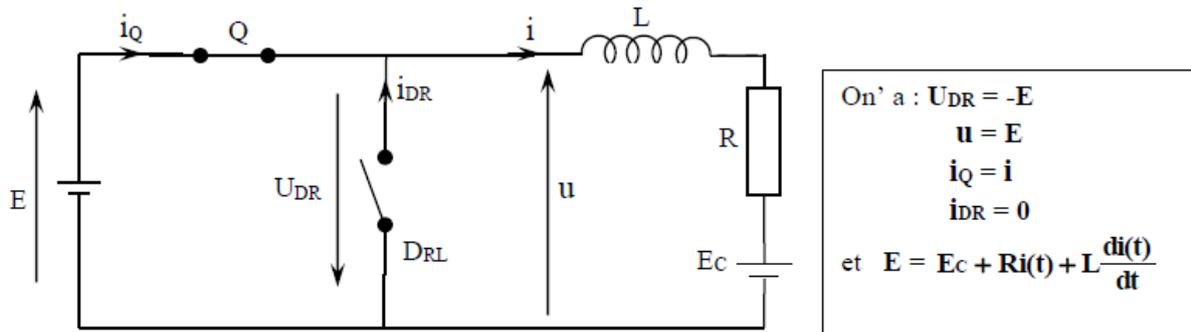


Schéma équivalent d'un Hacheur série (charge R-L-Ec) pour $t \in [0, \alpha T]$

Déterminons le courant $i(t)$: on a $E \gg R \cdot i(t)$ donc $E = E_c + L \cdot di(t)/dt$ avec $i(0) = 0$ et $i(\alpha T) =$

$$E = E_c + L \frac{d[i(t)]}{dt} \Rightarrow E - E_c = L \frac{d[i(t)]}{dt} \Rightarrow d[i(t)] = \frac{E - E_c}{L} dt \Rightarrow \int d[i(t)] = \int \frac{E - E_c}{L} dt$$

IMAX donc $i(t) = \frac{E - E_c}{L} t + K$ à $t = 0$ on a $i(0) = 0 = K$

$$\text{donc } i(t) = \frac{E - E_c}{L} t$$

Calcul de IMAX ?

$$\text{à } t = \alpha T \text{ on a } i(\alpha T) = I_{MAX} = \frac{E - E_c}{L} \alpha T \Rightarrow I_{MAX} = \frac{E - E_c}{L} \alpha T$$

➤ 2eme cas : $\alpha T < t < \beta T$ (Q ouvert, DRL fermée).

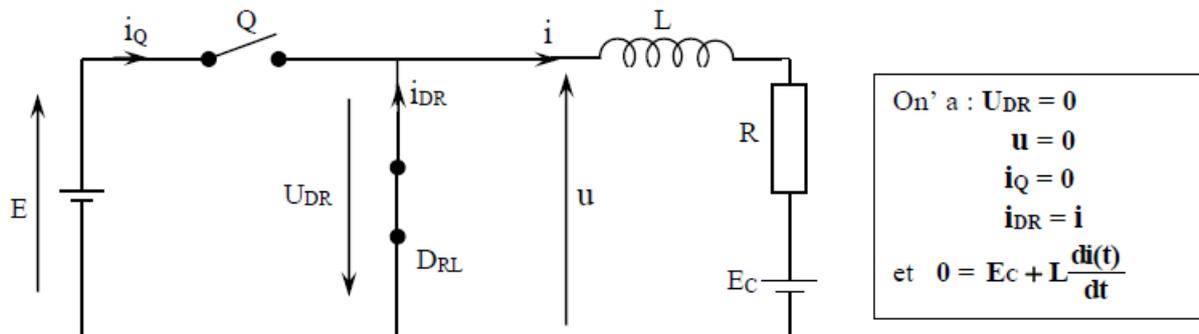


Schéma équivalent d'un Hacheur série (charge R-L-Ec) pour $t \in [\alpha T, \beta T]$

Déterminons le courant $i(t)$: on a $0 = E_c + L \cdot di(t)/dt$ avec $i(T) = I_{MIN}$ et $i(\alpha T) = I_{MAX}$

$$0 = E_c + L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow E_c = -L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow di(t) = -\frac{E_c}{L} dt \Rightarrow \int di(t) = \int -\frac{E_c}{L} dt$$

$$\text{donc } i(t) = -\frac{E_c}{L} t + K$$

Calcul de IMIN ?

$$t = \beta T \text{ on a } i(\beta T) = 0 = -\frac{E_c}{L} T(\beta - \alpha) + I_{MAX}$$

$$\Rightarrow I_{MAX} = \frac{E_c}{L} T(\beta - \alpha)$$

➤ 3eme cas : $\beta T < t < T$ (Q ouvert, DRL fermée).

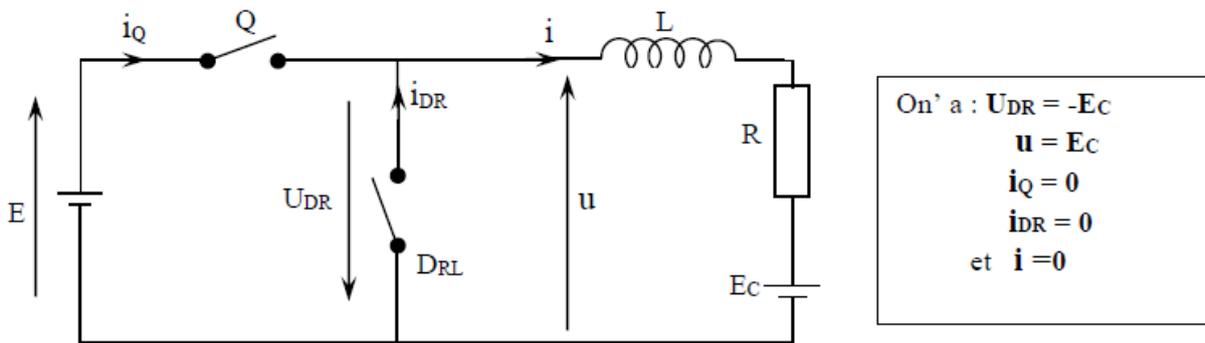


Schéma équivalent d'un Hacheur série (charge R-L-Ec) pour $t \in [\beta T, T]$

• Ondulation du courant :

Il est important pour un hacheur d'apprécier l'importance de l'ondulation du courant.

$$\text{On a : } I_{MAX} = \frac{E_c}{L} T(\beta - \alpha) = \frac{(E - E_c)}{L} \alpha T \quad \text{et} \quad I_{MIN} = 0$$

• Relation entre les tensions d'entrée et de sortie

$$\text{On a } I_{MAX} = \frac{E_c}{L} T(\beta - \alpha) = \frac{(E - E_c)}{L} \alpha T \Rightarrow E_c \beta - E_c \alpha = E \alpha - E_c \alpha \Rightarrow E_c \beta = E \alpha$$

$$\text{Donc } \beta = \alpha \frac{E}{E_c}$$

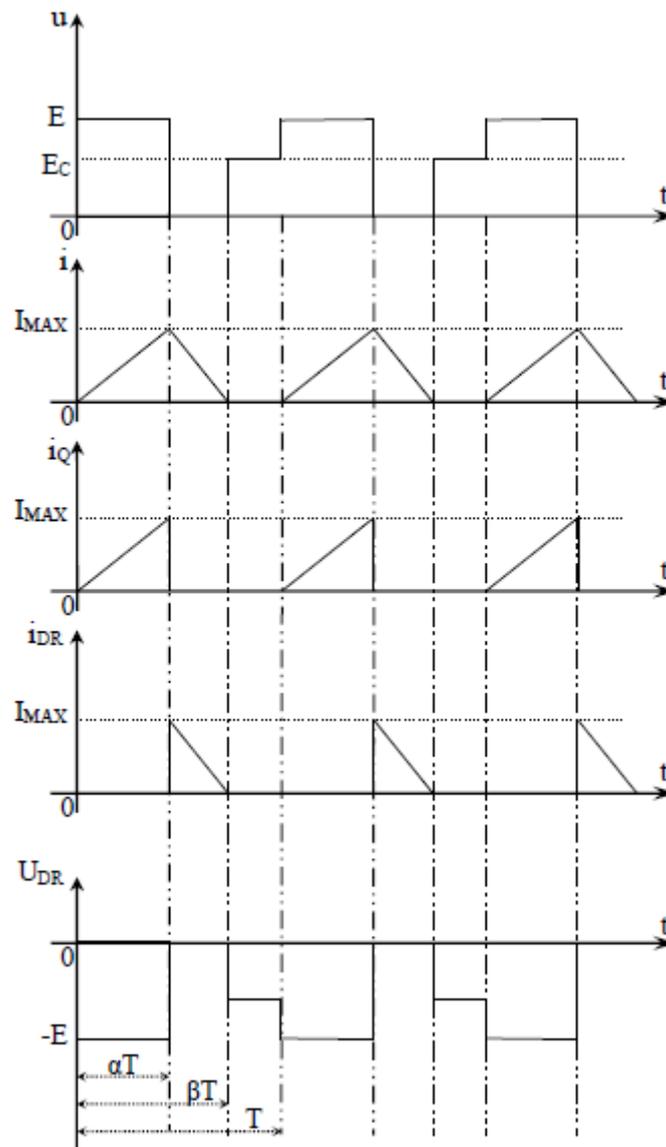
Il est alors possible de calculer la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge on a

$$U_T = E \alpha T + (T - \beta T) E_c \Rightarrow U = E \alpha + (1 - \beta) E_c \text{ on a } \beta = \alpha \frac{E}{E_c}$$

$$\text{donc } U = E \alpha + \left(1 - \alpha \frac{E}{E_c}\right) E_c = E \alpha + E_c - E \alpha$$

$$\Rightarrow U = E_c$$

- Forme d'ondes des principales grandeurs



Forme d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur série pour une charge R-L-Ec conduction discontinue

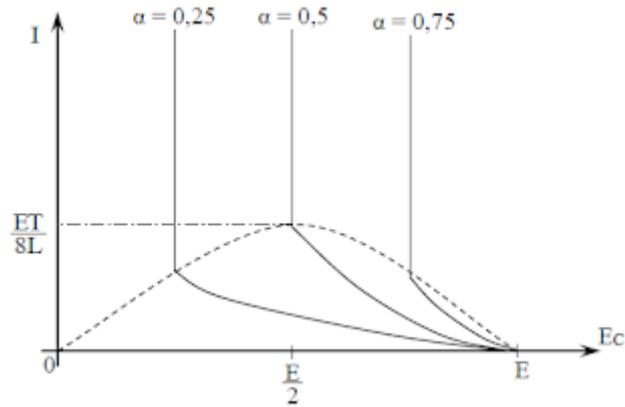
- Valeur moyenne du courant $i(t)$:

On peut également calculer la valeur moyenne du courant puisque le graphe est un triangle on a :

$$IT = ImAX \frac{\beta}{2} T \text{ avec } ImAX = \frac{E - Ec}{L} \alpha T \Rightarrow I = \frac{(E - Ec)}{2L} \alpha \beta T \quad \text{de plus on a } \beta = \alpha \frac{E}{Ec}$$

$$\Rightarrow I = \frac{\alpha^2}{2L} ET \left(\frac{E}{Ec} - 1 \right)$$

Il est alors intéressant de représenter le graphe de $I = f(Ec)$ pour différentes valeurs de α



Graphique de $I = f(Ec)$ pour différentes valeurs de α

En régime discontinu, la courbe représentative est une hyperbole qui passe par le point : $I = 0; Ec = E$.

Le régime passe de l'état discontinu à l'état continu pour $\beta T = T$, soit $Ec = \alpha E$.

Dans ces conditions le courant I a pour valeur limite :

$$I = \frac{\alpha^2}{2L} ET \left(\frac{E}{Ec} - 1 \right) = \frac{EcT}{2L} \left(1 - \frac{Ec}{E} \right)$$

La courbe de ce courant limite est une parabole qui est représentée en pointillé. Cette parabole qui passe par les points $Ec = E$ et $E = 0$ a pour valeur maximale $Ec = E/2$ (soit $\alpha = 0,5$) et $IM = E.T/8L$.

2.4.2 Hacheur parallèle :

2.4.2.1 Principe :

L'hacheur parallèle permet de varier le courant fourni par une source de courant I dans un récepteur de tension U . Cet hacheur est constitué d'un interrupteur à ouverture commandée en parallèle avec le récepteur et d'un interrupteur à fermeture et ouverture spontanée entre la source et le récepteur.

Montage :

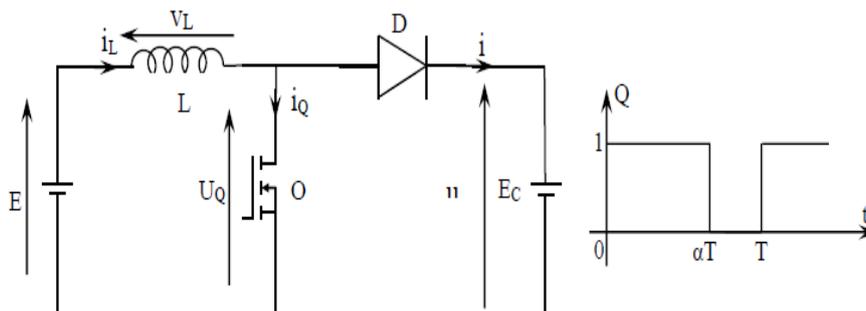


Schéma d'un Hacheur parallèle

Dans ce cas E est une fém comme dans le cas précédent mais elle est à présent en série avec une inductance L (dans un premier temps on néglige sa résistance propre R) donc une source de courant qui débitent dans une source de tension E_c et que la diode D empêche tout retour de courant vers la source.

2.4.2.2 Etude d'un hacheur parallèle :

a) Conduction continue :

Généralement l'inductance L de la source de courant à une valeur suffisamment élevée pour que la valeur moyenne I_L du courant $i_L(t)$, au-dessous de laquelle la conduction devient discontinu, soit telle qu'elle rend $R I_L$ négligeable par rapport à E.

- **Analyse de fonctionnement**

Nous pouvons décomposer cette analyse en deux parties distinctes :

➤ 1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, D ouverte).

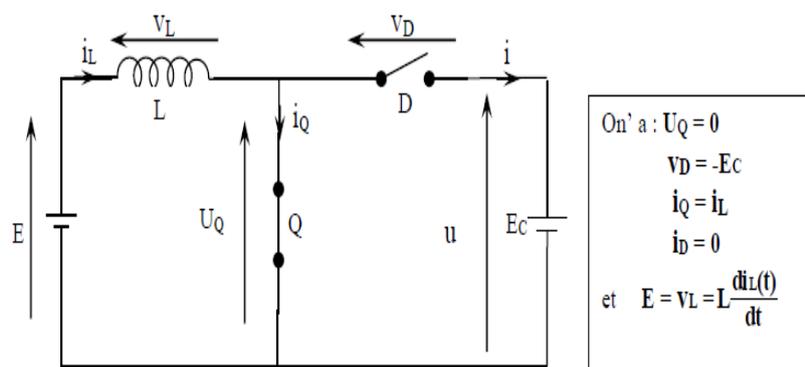


Schéma équivalent d'un Hacheur parallèle pour $t \in [0, \alpha T]$

Déterminons le courant $i_L(t)$: on a $E \gg R \cdot i_L(t)$ donc $E = L \cdot di_L(t)/dt$ avec $i_L(0) = I_{LMIN}$ et $i_L(\alpha T) = I_{LMAX}$

$$E = L \frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow di_L(t) = \frac{E}{L} dt \Rightarrow \int di_L(t) = \int \frac{E}{L} dt$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E}{L} t + K \quad \text{à } t = 0 \quad \text{on a } i_L(0) = I_{LMN} = K$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E}{L} t + I_{LMN}$$

Calcul de I_{LMAX}

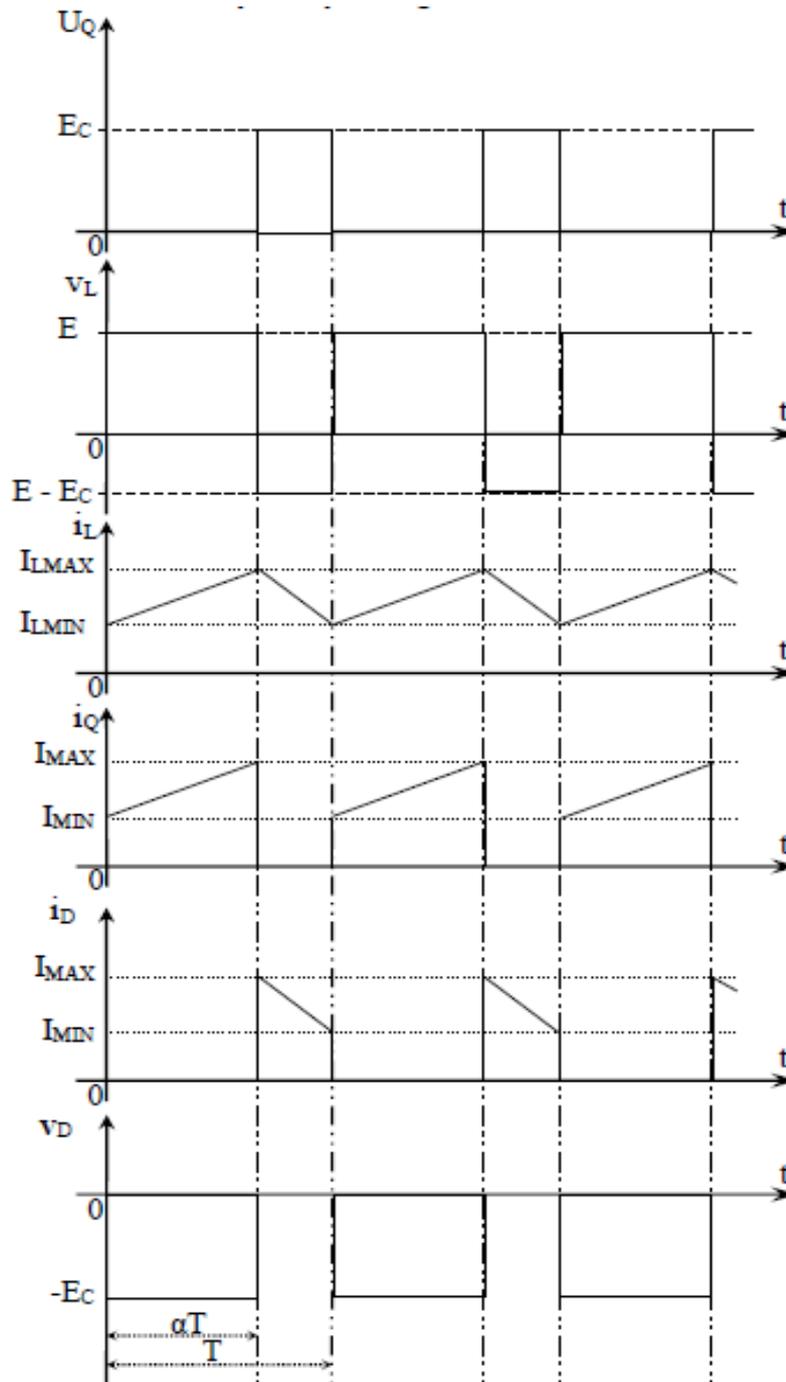
$$\text{à } t = \alpha T \quad \text{on a } i(\alpha T) = I_{LMAX} = \frac{E}{L} \alpha T + I_{LMN} \quad I_{LMAX} = \frac{E}{L} \alpha T + I_{LMN}$$

- **Ondulation du courant dans l'inductance**

Il est important pour un hacheur parallèle d'apprécier l'importance de l'ondulation du courant dans l'inductance

On a: $ILMAX = \frac{E}{L} \alpha T + I_{LMN}$ Donc on a $ILMAX - ILMN = \frac{E}{L} \alpha T$
 $\Rightarrow \Delta I_L = ILMAX - ILMN = \frac{E}{L} \alpha T \Rightarrow \Delta I_L = \frac{E}{Lf} \alpha$

- **Forme d'ondes des principales grandeurs**



Forme d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur parallèle (conduction continue)

- Relation entre les tensions d'entrée et de sortie :

En régime établi la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Donc :

$$U_L = \frac{1}{T} \int_0^T u_L(t) dt = 0 = \frac{1}{T} [(E\alpha T) + (T - \alpha T)(E - E_c)] = (E\alpha) + (1 - \alpha)(E - E_c) = E\alpha + E - E_c - \alpha E + \alpha E_c = 0$$

$$E - E_c + \alpha E_c = 0 \Rightarrow E_c(1 - \alpha) = E \Rightarrow E_c = \frac{E}{(1 - \alpha)}$$

Caractéristique statique réelle en conduction continue

Si on se place en conduction continu il est possible de voir théoriquement du moins que la tension de sortie tend vers 1. Cela pose un problème sur le plan physique : comment la tension peut-elle augmenter ainsi indéfiniment ? Il faut à ce stade tenir compte des éléments dissipatifs que l'on avait négligés jusqu'à présent.

Si on tient compte de la résistance série RL (de l'inductance) avec la résistance interne de la charge Rc on peut écrire en valeur moyenne :

$$E = R_L I + (E_c(1 - \alpha)) \text{ avec } I = \frac{E_c}{R_c(1 - \alpha)}$$

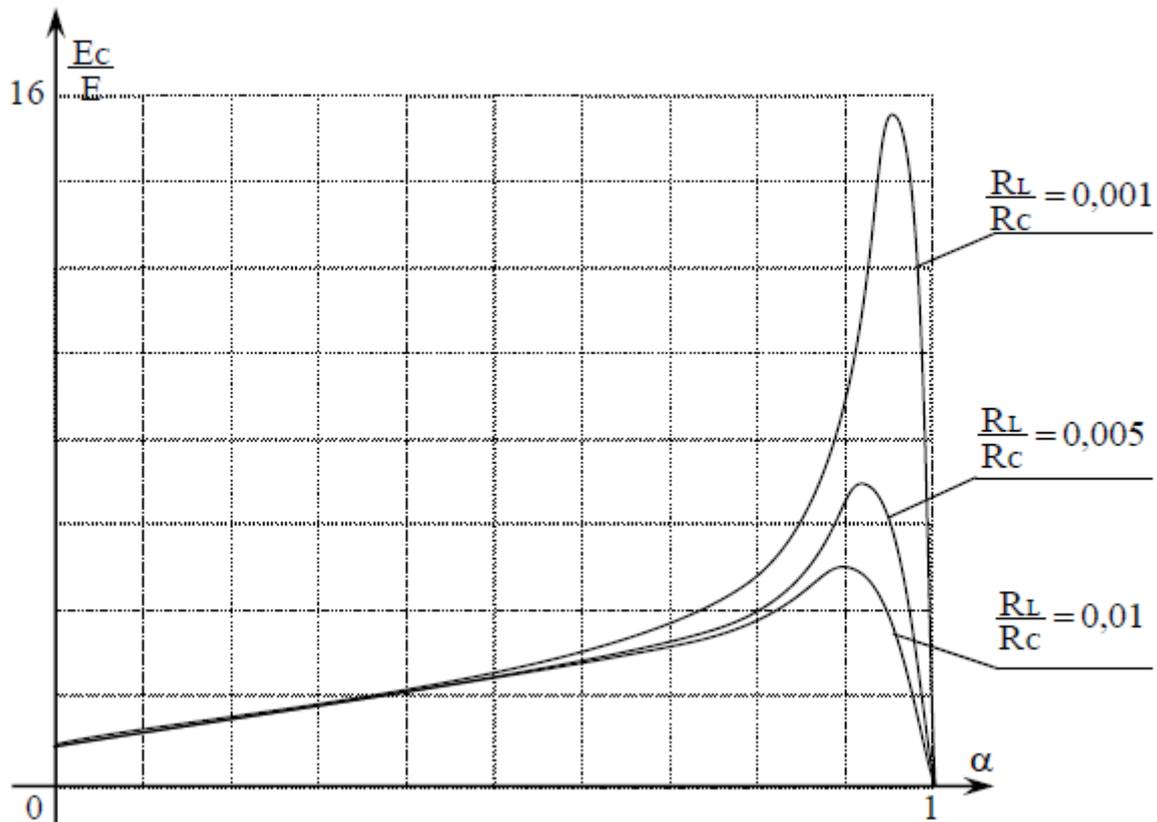
$$\text{donc: } E = \frac{R_L}{R_c(1 - \alpha)} E_c + (1 - \alpha) E_c$$

$$\text{par suit : } \frac{E_c}{E} = \frac{1}{(1 - \alpha) \left[1 + \frac{R_L}{R_c} \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \right]}$$

La fonction présente un maximum pour :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_c}{R_L}} \quad \text{et} \quad E_{cMAX} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_c}{R_L}}$$

On voit donc que la limitation en tension intervient par les imperfections du système. On obtient la caractéristique statique réelle en conduction continue suivante :



Caractéristique statique réelle en conduction continue d'un Hacheur parallèle

La charge est notée comme une $f_{cm}E_c$ mais cette charge peut ne pas être une charge active et être réalisée avec une résistance R_c en parallèle avec un condensateur de capacité C . Si la valeur de C est suffisamment grande, il sera possible de considérer la tension aux bornes de E_c comme constante.

- **Frontière entre le mode continu et discontinu :**

Lorsque le courant moyen I_L dans l'inductance L est, égal à la moitié de l'ondulation Δi_L on atteint la limite de la conduction continue.

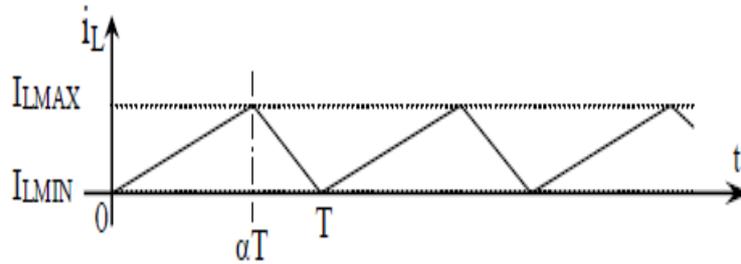
On peut écrire pour le courant limite moyen dans L

$$I_{LM} = \frac{1}{2} \Delta I_L = \frac{1ET}{2L} \alpha \quad \text{donc} \quad i_L(0) = i_L(T) = I_{LMN} = 0$$

Sachant que le courant dans l'inductance est identique au courant d'entrée il est possible de calculer la valeur moyenne de sortie I_{LM} à la limite de la conduction continue :

$$\text{on a } I_{LM} = \frac{1}{2}(1-\alpha)I_{MAX} \text{ et } I_{MAX} = \frac{E}{L} \alpha T \Rightarrow I_{LM} = \frac{ET}{2L} \alpha(1-\alpha)$$

On peut calculer $I_{LM}(MAX)$ pour $\alpha = 0.5$ donc $\Rightarrow I_{LM}(MAX) = E.T/8L$



c) Conduction discontinue :

La conduction est discontinue si la valeur minimale I_{LMIN} du courant s'annule à chaque période à $t = \beta T$ pour $\beta T \in [\alpha T, T]$; soit $i(\beta T) = 0$.

Analyse de fonctionnement :

Nous pouvons décomposer cette analyse en 3 parties distinctes :

■ 1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, D ouverte) :

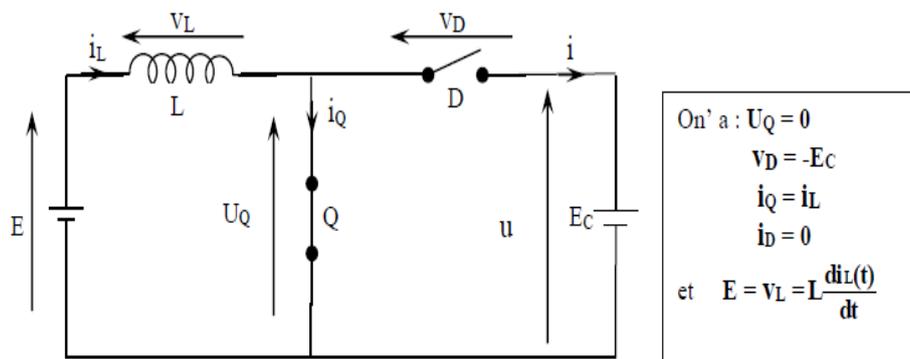


Schéma équivalent d'un Hacheur parallèle pour $t \in [0, \alpha T]$

Déterminons le courant $i_L(t)$: on a $E \gg R \cdot i_L(t)$ donc $E = L \cdot di_L(t)/dt$ avec $i_L(0) = I_{LMIN}$ et $i_L(\alpha T) = I_{LMAX}$

$$E = L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow di_L(t) = \frac{E}{L} dt \Rightarrow \int di_L(t) = \int \frac{E}{L} dt$$

$$i_L(t) = \frac{E}{L} t + K \text{ à } t = 0 \quad \text{on a } i_L(0) = I_{LMIN} = K = 0$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E}{L} t$$

Calcul de I_{LMAX} ?

$$\text{à } t = \alpha T \text{ on a } i(\alpha T) = I_{LMAX} = \frac{E}{L} \alpha T \quad I_{LMA} = \frac{E}{L} \alpha T$$

➤ **2er cas : $\alpha T < t < \beta T$ (Q ouvert, D fermée).**

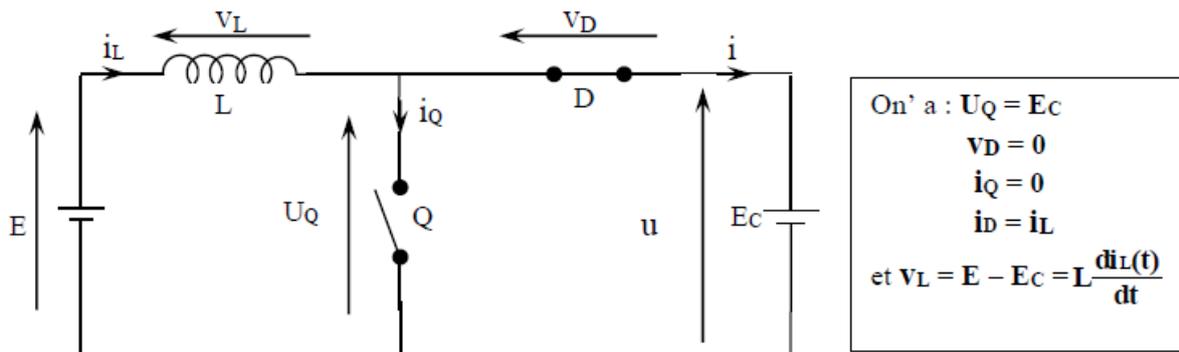


Schéma équivalent d'un Hacheur parallèle pour $t \in [\alpha T, \beta T]$

Déterminons le courant $i_L(t)$: on a $E = E_c + L \cdot di_L(t)/dt$ avec $i_L(\alpha T) = I_{LMAX}$ et $i_L(\beta T) = 0$

$$E = E_c + L \frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow E - E_c = L \frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow di_L(t) = \frac{E - E_c}{L} dt \Rightarrow \int di_L(t) = \int \frac{E - E_c}{L} dt$$

$$\text{donc } i(t) = \frac{E - E_c}{L} t + K$$

$$\text{à } t = \alpha T \quad \text{on a } i_L(\alpha T) = I_{LMAX} = \frac{E - E_c}{L} \alpha T + K \Rightarrow K = I_{LMAX} - \frac{E - E_c}{L} \alpha T$$

$$\text{donc } i(t) = \frac{E - E_c}{L} t + I_{LMAX} - \frac{E - E_c}{L} \alpha T \Rightarrow i(t) = \frac{E - E_c}{L} (t - \alpha T) + I_{LMAX}$$

Calcul de I_{LMAX} ?

$$\text{à } t = \beta T \quad \text{on a } i_L(\beta T) = 0 = \frac{E - E_c}{L} T(\beta - \alpha) + I_{LMAX} \Rightarrow I_{LMAX} = \frac{E_c - E}{L} T(\beta - \alpha)$$

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous nous sommes consacrés à l'étude du comportement d'un courant électrique à l'aide d'un hacheur.

Afin d'aborder cet objectif, nous avons présenté la structure et le mode de fonctionnement des machines de courant continu.

Le premier objectif de notre travail est de mieux connaître les machines à courant continu en étudiant leur principe de fonctionnement, leur constitution, leur type et ces avantages.

Le deuxième objectif consiste à l'étude de différents types des hacheurs (hacheur série, hacheur parallèle ...etc).

ReferencesBibliographies:

1. A.Cunière, G.Feld, M.Lavabre :(2012) : Electronique de Puissance (Casteilla)
2. Jacques Laroche :(2005) : Electronique de Puissance Convertisseur (Dunod)
3. Lavabre.M (2001) : Electronique de puissance conversion de l'énergie (Casteilla)
4. -Gy .Seguier : (1999) : Electronique de puissance 7
5. emédition (Dunod)
6. -Alain Hebert, Claude Naudet et Michel Pinard (1997) : Machines Electriques
Electronique
7. de Puissance (DUNOD)
8. -Gy.Chateiger, Michel Boês, Daniel Bouix, Jaque Vaillant (2006) : Manuel de Génie
Electrique(Dunod)
9. -Gy.Seguier : (1995) : Les convertisseurs de l'électronique de puissance Tom 3
(TEC&DOC)
10. -Gy.Seguier : (1995) : Les convertisseurs de l'électronique de puissance Tom 4
(TEC&DOC)
11. -Francis Milsant (1995) : Machines synchrones et asynchrones Commande
électronique (ellipses)
12. -Jean Louis DALMASSO : Electronique de puissance - commutation. (DIA-BELIN)