

CHAPITRE III

Méthodes de conception des convertisseurs statiques à commutation naturelle

III.1. Introduction

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif-continu. On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin de continu alors que l'énergie électrique est disponible en alternatif. Comme c'est sous cette seconde forme que l'énergie électrique est presque toujours générée et distribuée, les redresseurs ont un très vaste domaine d'applications. Les redresseurs à diodes, ou redresseurs non contrôlés, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la tension ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.

III.2. Cellule de commutation

III.2.1. Définitions

La structure, constituée d'interrupteurs dipôles ayant une borne commune reliée à une source de courant et les deux autres bornes connectées à des sources de tension, porte le nom de cellule de commutation ; c'est en fait l'élément de base de tout convertisseur statique d'énergie électrique.

On rappelle les définitions (duales) des sources idéales respectivement de tension et de courant :

- ❖ Une source idéale de tension (S_v) est un dipôle dont la tension aux bornes est indépendante du courant qui le traverse.

Propriétés

- L'impédance interne est nulle,
 - Les bornes peuvent rester déconnectées de tout circuit électrique,
 - La mise en court-circuit provoque une **surintensité** (danger) si la tension n'est pas nulle.
- ❖ Une source idéale de courant (S_i) est un dipôle dont le courant est indépendant de la tension aux bornes.

Propriétés

- L'impédance interne est infinie,
- Les bornes doivent rester raccordées à un circuit électrique fermé assurant ainsi la circulation du courant (non nul),
- L'ouverture du circuit provoque une **surtension** (danger) si le courant n'est pas nul.

Le convertisseur à deux diodes est une cellule de commutation, le point commun aux cathodes est relié à une source réactive de courant (bobine) et les deux anodes à une source idéale de tension, le courant I sortant des cathodes ne peut être que positif (voire nul) et il en est de même pour la tension U_m .

Le signe (-) pour i et U_m est obtenu en retournant borne pour borne les diodes ; une anode prenant la place d'une cathode et inversement.

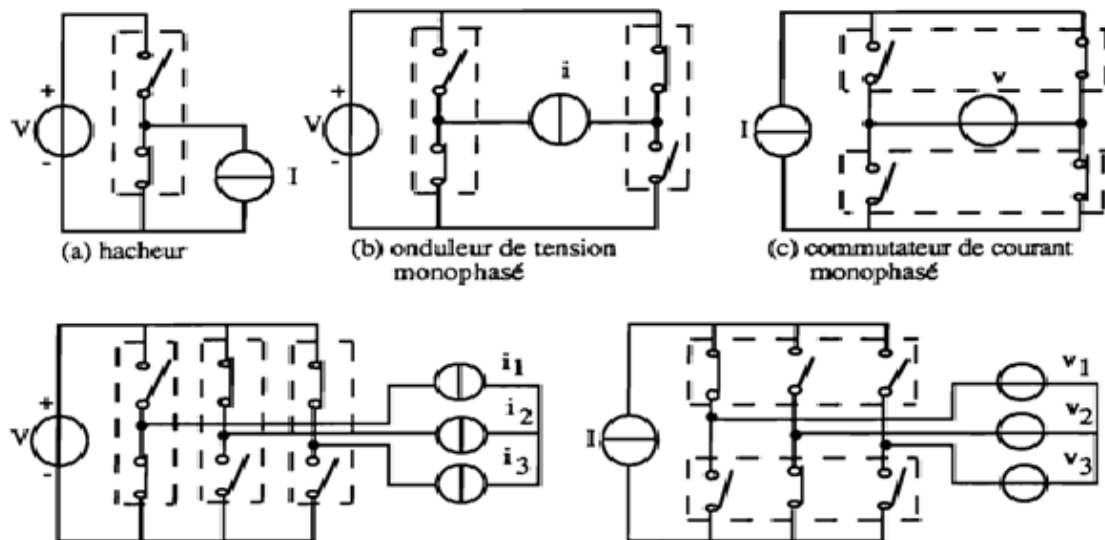


Fig 3.1. Structure faisant apparaître des cellules de commutation

III.2.2. Description fonctionnelle de la cellule de commutation à diodes

L'aspect local de la commutation se limite à l'étude des caractéristiques propres d'un interrupteur à l'amorçage et au blocage.

La cellule constituée de deux diodes présente en pratique trois configurations

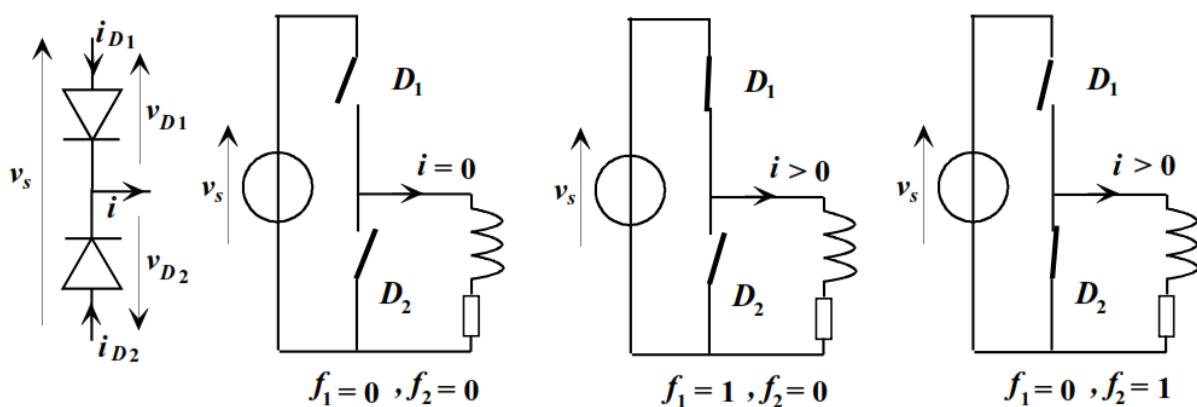


Fig 3.2. Notation et configurations

Quelle que soit la configuration, les grandeurs courant, tension des diodes vérifient d'une part la loi des nœuds :

$$i_{D1} + i_{D2} = i \quad (3.1)$$

Et, d'autre part, la loi des mailles :

$$v_{D1} - v_{D2} = v_s \quad (3.2)$$

Les conditions de commutation des cellules sont :

- ✓ D1 conduit : $v_{D1} = 0$, $i_{D1} = i$, $f_1 = 1$ tant que $i > 0$;
- ✓ D2 bloquée : $v_{D1} = -v_s < 0$, $i_{D2} = 0$, $f_2 = 0$ tant que $v_s < 0$;
- ✓ D1 bloquée : $v_{D1} = -v_s < 0$, $i_{D1} = 0$, $f_1 = 0$ tant que $v_s < 0$;
- ✓ D2 conduit : $v_{D2} = 0$, $i_{D2} = i$, $f_2 = 1$ tant que $i > 0$;

III.3.Fonctions réalisées

III.3.1. Conversion AC-DC : les redresseurs

Les redresseurs permettent d'obtenir une tension de valeur moyenne non nulle à partir d'une tension alternative (monophasée ou triphasée) de valeur moyenne nulle. Les redresseurs commandés permettent de régler la valeur moyenne de la tension redressée.

Pour obtenir une tension continue, on redresse un ensemble de q tensions alternatives, formant un système polyphasé équilibré (nombre de phases q). Ces tensions peuvent être les tensions aux bornes d'un alternateur. Généralement, elles sont fournies par le réseau monophasé ou, plus souvent, par le réseau triphasé, d'ordinaire par l'intermédiaire d'un transformateur. On distingue trois types de montages :

- ✓ **Pq**: Montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance"
- ✓ **PDq**: Montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source étoilée ;
- ✓ **Sq** : Montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source polygonale.

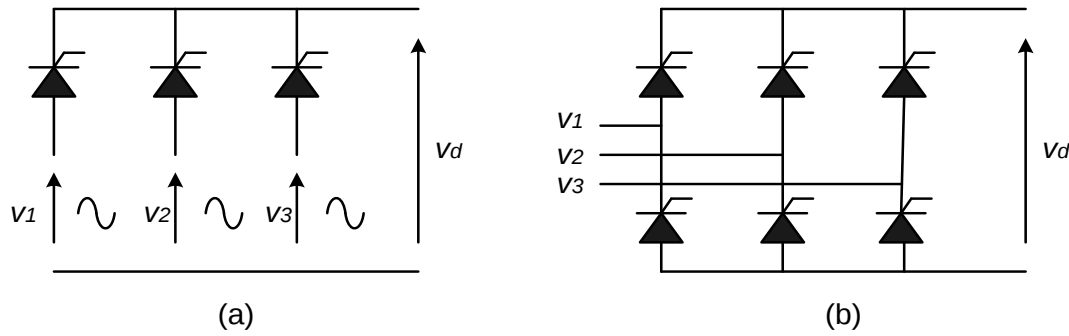


Fig 3.3 : Redresseurs triphasés. (a) P3. (b) PD3.

III.3.2. Étude des tensions

La tension redressée v_d est périodique de période T/p entre 0 et T/p , cette tension a pour expression :

$$v_d(t) = V_m \cos(\omega t) \quad (3.3)$$

Avec : $V_m = U\sqrt{2}$, U est étant la valeur efficace des tensions composées.

Tableau (3.1) : Étude des tensions redressées pour les deux cas commandés et non commandé

Redresseur non commandé	Montages Pq (p=q)	Montages PDq (p=2q)
Tension moyenne	$V_{dc} = \frac{p}{T} \int_{-\frac{T}{2p}}^{\frac{T}{2p}} v_d dt = V_m \frac{p}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right)$	
Tension efficace	$V_{reff} = \sqrt{\frac{p}{T} \int_{-\frac{T}{2p}}^{\frac{T}{2p}} v_d^2 dt} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{p}\right)}{\left(\frac{2\pi}{p}\right)}}$	
Redresseur commandé	Montages Pq (p=q)	Montages PDq (p=2q)
Tension moyenne	$V_{dc} = \frac{p}{T} \int_{-\frac{T}{2p} + \alpha}^{\frac{T}{2p} + \alpha} v_d dt = V_m \frac{p}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \cos(\alpha)$	
Tension efficace	$V_{reff} = \sqrt{\frac{p}{T} \int_{-\frac{T}{2p} + \alpha}^{\frac{T}{2p} + \alpha} v_d^2 dt} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{p}\right)}{\left(\frac{2\pi}{p}\right)} \cos(2\alpha)}$	
Tension inverse maximale aux bornes d'une diode	Pour q impaire	$U_{inv} = 2V\sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{2q}\right)$
	Pour q paire	$U_{inv} = 2V\sqrt{2}$

III.3.3. Étude des courants

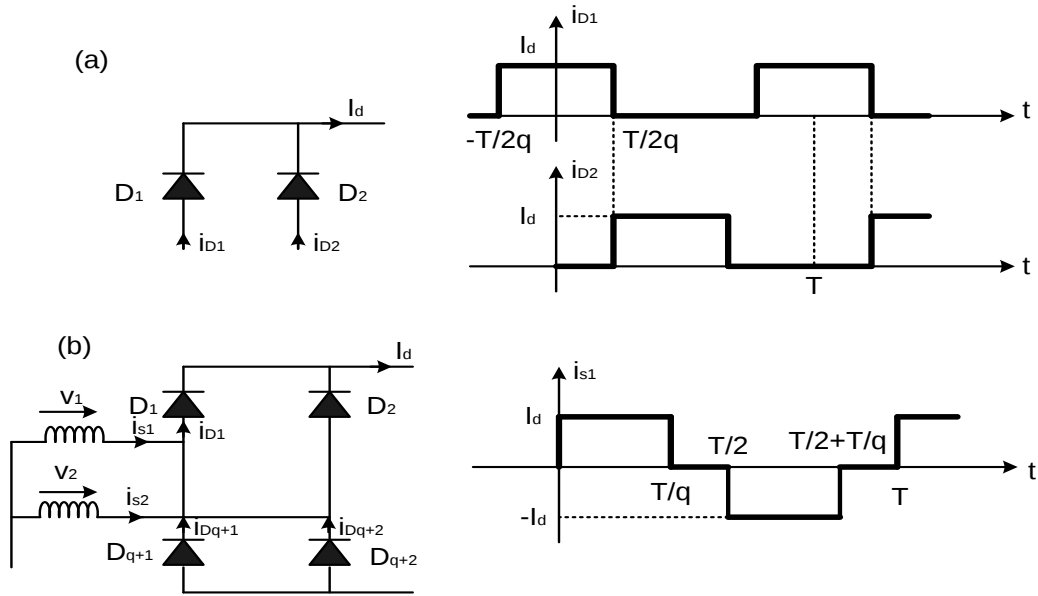


Fig 3.4 : Forme du courant

(a) d'une diode pour montages Pq (b) au secondaire du transformateur pour montages PDq

Tableau (3.2) ; étude des courants dans le redresseur

Courant	Montages Pq (p=q)	Montages PDq (p=2q)
Courant moyen dans la diode ou dans le thyristor	$i_{Dm} = \frac{1}{T} \int_{-T/2q}^{T/2q} I_d dt = \frac{I_d}{q}$ $i_{Thm} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2q}+\alpha}^{\frac{T}{2q}+\alpha} I_d dt = \frac{I_d}{q}$	$i_{Dm} = \frac{I_d}{q}$ $i_{Thm} = \frac{I_d}{q}$
Courant moyen dans les enroulements secondaires du transformateur dans la diode ou dans le thyristor	$i_{sm} = \frac{I_d}{q}$	$i_{sm} = 0$
Courant efficace dans les enroulements secondaires du transformateur dans la diode ou dans le thyristor	$i_{seff} = \frac{I_d}{\sqrt{q}}$	$i_{seff} = I_d \sqrt{\frac{2}{q}}$

III.4. Paramètres de performance

Les performances d'un circuit redresseur sont normalement évaluées en termes de paramètres suivants :

- ✓ Valeur moyenne de tension de sortie, V_{dc} .
- ✓ Valeur moyenne du courant, I_d .
- ✓ Puissance de sortie continue, $P_{DC} = V_{dc} I_{dc}$.
- ✓ Valeur efficace de la tension de sortie, V_{eff} .
- ✓ Valeur efficace du courant de sortie, I_{eff} .
- ✓ Puissance de sortie alternative, $P_{AC} = V_{eff} I_{eff}$

a) Rendement du redresseur :

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{AC}} \quad (3.4)$$

La tension de sortie est composée de deux composants :

- ✓ Composant continu V_{dc}
- ✓ Composant alternatif V_{ac} (ondulation)

b) La valeur effective de la composante AC de tension de sortie est :

$$V_{ac} = \sqrt{V_{eff}^2 - V_{dc}^2} \quad (3.5)$$

c) Facteur de forme (qui est une tension de la forme d'onde de tension de sortie) est :

$$FF = \frac{V_{eff}}{V_{dc}} \quad (3.6)$$

d) Facteur d'ondulation (qui est la mesure d'ondulation contenue) est :

$$FR = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \sqrt{\left(\frac{V_{eff}}{V_{dc}}\right)^2 - 1} = \sqrt{FF^2 - 1} \quad (3.7)$$

e) Si ϕ est l'angle entre le fondamental du courant d'entrée et la tension, ϕ est appelée angle de déplacement. Le facteur de déplacement est défini :

$$DF = \cos(\phi) \quad (3.8)$$

f) Le facteur d'harmonique du courant d'entrée est définit :

$$HF = \sqrt{\left(\frac{I_{seff}^2 - I_1^2}{I_1^2}\right)} = \sqrt{\left(\frac{I_{seff}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (3.9)$$

Où $I_1 \rightarrow$ fondamental du courant d'entrée, I_{seff} courant du secondaire du transformateur.

g) Le facteur de puissance d'entrée est défini comme :

$$PF = \frac{V_s I_1}{V_s I_s} \cos \phi = \frac{I_1}{I_s} \cos \phi \quad (3.10)$$

Si le courant est purement sinusoïdal $\rightarrow PF=DF$

Un redresseur idéal : $\eta = 100\%$; $V_{ac}=0$; $FF=1$; $RF=0$; $HF=0$; $PF=1$.

III.5. Transport de puissance en courant continu

Deux redresseurs triphasés tête-bêche utilisant des thyristors Figure 3.5. Chacun des deux convertisseurs est connectés à un réseau triphasé de tensions et de fréquences différentes. Une inductance placée entre les 2 ponts permet de respecter les règles d'association des sources.

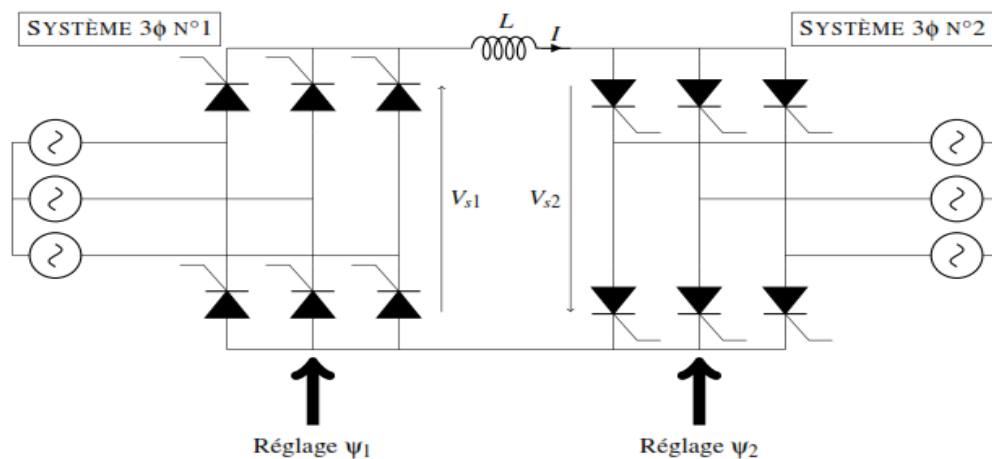


Fig 3.5. Transport de puissance en courant continu – HVDC

Soit P_1 la puissance transitant par le pont redresseur 1 et P_2 la puissance transitant par le deuxième pont :

$$P_1 = V_{dc1} I = -V_{dc2} I = -P_2 \quad (3.11)$$

Ainsi, le réglage des angles de conduction des thyristors permet de fixer la puissance transitant entre les 2 systèmes de tensions triphasées. Le système étant bidirectionnel, la puissance peut transiter dans les deux sens. Les 2 ponts fonctionneront en configuration redresseur ou onduleur selon le réglage de ψ_1 et ψ_2 .

III.6. Principe Généraux De la Synthèse des convertisseurs Statiques.

La synthèse des convertisseurs statiques' représente en réalité une démarche permettant de déterminer successivement la structure, les natures des commutateurs et leurs caractéristiques, et ce pour un circuit dont on ne connaît au départ que l'utilité globale et quelques valeurs limites.

- **Identification des sources et des réversibilités**

Qu'on s'intéresse à un convertisseur statique, il est facile d'identifier les sources principales qui le concernent, à savoir la source d'entrée et celle de sortie. En effet, la nature même de ces deux sources est un élément extrêmement important du cahier des charges du dispositif. Par ailleurs, les réversibilités associées à ces sources constituent également des éléments importants.

- **Nombre de cellules de commutation**

Dès lors que les sources d'un convertisseur sont identifiées, il est nécessaire de déterminer à partir de quel nombre de cellules de commutation sa structure va être élaborée.

Tableau 3.1. Nombre de cellules de commutation

Source de départ	Source d'arrivée	Nombre de cellules de commutation
Sans réversibilité de tension	Sans réversibilité de tension	1
Sans réversibilité de tension	Avec réversibilité de tension + Source alternative	2
Avec réversibilité de tension + Source alternative	Sans réversibilité de tension	2
Triphasée	Quelconque	3
Quelconque	Triphasée	3

- **Éléments d'interposition**

Sachant que les convertisseurs statiques sont réalisés à partir de composants agissant comme des interrupteurs, il est nécessaire de respecter les règles d'interconnexion des sources, si une structure fait apparaître de part et d'autre d'une cellule de commutation deux sources de mêmes natures, il se révèle impératif d'introduire un « élément tampon » permettant

l'association. On fera alors toujours apparaître une **inductance** (source de courant) interposée entre deux sources de tension, ou de la même manière, un **condensateur** interposé entre deux sources de courant.

- **Nature et choix des commutateurs**

Lorsqu'on connaît la structure d'un convertisseur et également les allures précises des tensions et courants qui y apparaissent, il est naturel de pouvoir déterminer les caractéristiques des commutateurs qui le constituent. De façon plus claire connaître les courbes 'courant/tension' des commutateurs d'un montage permet de déterminer la nature précise de ses composants.

III.7. EXEMPLE : SYNTHESE D'UN CONVERTISSEUR DC/DC

L'objectif est ainsi de déterminer la structure d'un convertisseur DC/DC dont on résume le cahier de charge ci-dessous :

- ✓ Type : Convertisseur DC/DC à découpage
- ✓ Entrée : Batterie d'accumulateurs 12V, 50A
- ✓ Sortie : Tension continue régulée 5V, 2A, 10W
- ✓ Ondulations maximales en tension et courant 5% max
- ✓ Fréquence de découpage de l'ordre de 20KHz
- ✓ Rendement maximal 85%
- ✓ Encombrement réduit.

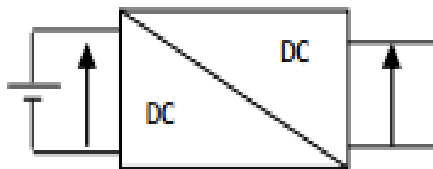


Fig .3.6. Convertisseur statique DC / DC

- **Sources et réversibilités**

Une source d'entrée non réversible en tension est de 12V continue

La source de sortie continue est également non réversible de 5V.

- **Nombre de cellules de commutation**

En basant sur Tableau 3.1. Une seule cellule de commutation.

- **Éléments d'interposition**

Source de sortie « source de tension » donc un condensateur à la sortie disposé en parallèles.

Source d'entrée « source de tension ». Il sera impossible de les relier directement les deux sources de tension par commutation. Donc inductance série s'avère donc nécessaire.

Cette inductance doit forcément être placée après la cellule de commutation pour éviter le court-circuit à la sortie.

❖ Détermination des valeurs des composants L et C

En réalité, l'inductance et le condensateur placés dans cette structure participent au filtrage des ondulations dues au découpage. Pour le calcul on a :

$$\Delta i_{L\max} = 5\% \cdot 2 = 0.1A, \text{ Alors } L = \frac{12}{4 \times 0.1 \times 20 \times 10^3} \text{ donc } L = 1.5 \text{ mH}$$

$$\Delta V_{C\max} = 5\% \cdot 5 = 0.25V, \text{ Alors } C = \frac{12}{(20 \times 10^3)^2 \times 0.25 \times 8\pi \times 1.5 \times 10^{-3}}, \text{ donc } C = 3.2\mu F$$

On retiendra donc 'inductance de stockage L : 1.5 mH/3A et 'condensateur chimique'. $C = 3.3 \mu F$. Finalement le schéma équivalent

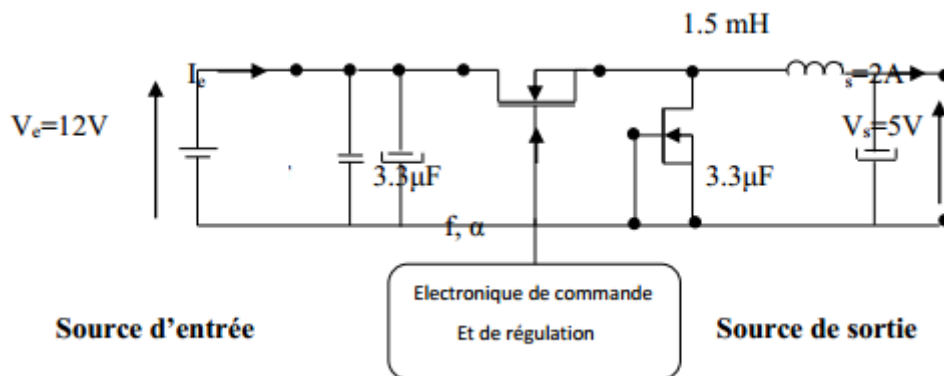


Fig. 3.7. Montage complet du convertisseur DC/DC 12V/ (5V – 2A).

REFERENCES

1. Cuniere, G. Feld, M. Lavabre, « Électronique de puissance, de la cellule de Commutation aux applications industrielles » Cours et exercices' Edition Casteilla, 2012
2. F. Nacerie « Électronique de puissance avancée » support de cours université de Batna.

