

Niveau : Troisième année

Parcours : Licence électronique

Polycopié de Travaux Dirigés

Matière

Electronique de Puissance

Préparée par : Docteur S. REZINI
Maître de conférences classe « A »

Expertisé par :

- Prof. Dr. BENTOUNES Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
- Prof. Dr. CHAOUCH Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem



Niveau : Troisième année

Parcours : Licence électronique

Polycopié de Travaux Dirigés

Matière

Electronique de Puissance

Préparée par : Docteur S. REZINI

Maître de conférences classe « A »

Résumé :

Ce polycopié de travaux dirigés de la matière « Electronique de Puissance » est conçu pour les étudiants en licence et école d'ingénieur en génie électrique. Son objectif est de leur permettre d'acquérir une autonomie dans la conception de convertisseurs statiques. Il apporte un aperçu des principes fondamentaux de l'électronique de puissance et des différents convertisseurs, présente les semi-conducteurs utilisés ainsi que leurs caractéristiques, et analyse le fonctionnement des principaux convertisseurs en étudiant leurs formes d'ondes, calculs de rendement et applications.

Le polycopié est divisé en deux parties complémentaires. La première rassemble des rappels théoriques concis sur les fonctions trigonométriques, la résolution d'équations différentielles, les lois de l'électricité, les calculs de puissances/rendement, ainsi qu'un résumé sur les convertisseurs statiques. La seconde partie propose des fiches d'exercices corrigés portant sur les grandeurs périodiques/séries de Fourier, puissances/rendement, semi-conducteurs de puissance, redresseurs monophasés biphasés et triphasés commandés/non-commandés, gradateurs, hacheurs et onduleurs.

Mots clés :

Electronique de puissance, convertisseur statique, diode, thyristor, transistor, redresseur, gradateur, hacheur, onduleur.

Abstract :

This workbook for tutorials on the subject of « Power Electronics » is designed for undergraduate and engineering school students in the field of electrical engineering. Its objective is to allow them to acquire autonomy in the design of static converters. It provides an overview of the fundamental principles of power electronics and different converters, presents the semiconductor devices used as well as their characteristics, and analyzes the operation of the main converters by studying their waveforms, calculating efficiency, and applications.

The workbook is divided into two complementary parts. The first part provides concise theoretical reviews on trigonometric functions, solving differential equations, laws of electricity, power/efficiency calculations, as well as a summary on static converters. The second part offers corrected exercise sheets covering periodic quantities/Fourier series, powers/efficiency, power semiconductors, single-phase, bi-phase and three-phase controlled/uncontrolled rectifiers, choppers, inverters and AC regulators.

Keywords :

Power electronic devices, static converter, diode, thyristor, transistor, rectifier, AC regulator, chopper, inverter.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

	Préface	1
	<u>Partie I</u>	
	Rappels	
I.1	Rappels mathématiques	3
I.1.1	Fonctions trigonométriques	3
I.1.1.1	Quelques fonctions de bases	3
I.1.1.2	Valeurs remarquables	3
I.1.1.3	Quelques fonctions d'addition et de soustraction	3
I.2.2	Résolution d'une équation différentielle	4
I.1.2.1	Equation différentielle premier ordre	4
I.1.2.2	Equation différentielle deuxième ordre	4
I.1.2.3	Application des équations différentielles aux circuits électriques	4
I.2	Rappels sur les lois fondamentales de l'électricité	6
I.2.1	Grandeurs électriques continues ou variables	6
I.2.2	Lois de fonctionnement des dipôles élémentaires	6
I.2.3	Lois de Kirchhoff	7
I.2.3.1	Lois des nœuds	7
I.2.3.2	Lois des mailles	7
I.2.4	Quelques notions sur le régime sinusoïdal	7
I.2.4.1	La forme d'onde	7
I.2.4.2	La valeur instantanée	7
I.2.4.3	La valeur crête	8
I.2.4.4	La forme d'onde périodique	8
I.2.4.5	La période	8
I.2.4.6	Le cycle	8
I.2.4.7	La fréquence	8
I.2.4.8	Forme générale des ondes sinusoïdales de la tension ou de courant	8
I.2.5	Les caractéristiques d'un signal périodique	9
I.2.5.1	La valeur moyenne	9
I.2.5.2	La valeur efficace	9
I.2.6	Décomposition d'un signal en série de Fourier	9
I.3	Les puissances électriques et le rendement	10
I.3.1	La puissance électrique en régime continu	10
I.3.2	Les puissances électriques en régime alternatif sinusoïdal	11
I.2.2.1	Les puissances en monophasé	11
I.2.2.2	Les Puissances en triphasé	11
I.3.3	Rendement	12
I.4	Rappels sur les convertisseurs statiques	12
I.4.1	Introduction	12
I.4.2	Les composants de l'électronique puissance de puissance	13
I.4.2.1	La diode	14
I.4.2.2	Le thyristor	15
I.4.2.3	Le thyristor G.T.O.	16
I.4.2.4	Le thyristor T.R.I.A.C.	17
I.4.2.5	Le transistor bipolaire	17

I.4.2.6	Le transistor à effet champ	17
I.4.2.7	Le transistor à grille isolée	18
I.4.3	Le redressement non commandé et commandé	18
I.4.3.1	Généralités	18
I.4.3.2	Le redressement monophasé à simple alternance	19
I.4.3.2	Le Redressement monophasé à double alternance	23
I.4.3.3	Le redressement triphasé	27
I.4.4	Les gradateurs	31
I.4.4.1	Généralités	31
I.4.4.2	Le gradateur monophasé	31
I.4.4.3	Les gradateurs triphasés	33
I.4.4.4	Le cycloconvertisseur	33
I.4.5	Les hacheurs	34
I.4.5.1	Généralités	34
I.4.5.2	Les convertisseurs un quadrant	34
I.4.5.3	Les convertisseurs deux quadrants	37
I.4.5.4	Les convertisseurs quatre quadrants	39
I.4.6	Les onduleurs	41
I.4.6.1	Généralités	41
I.4.6.2	L'ondeur de tension monophasé	41
I.4.6.3	L'ondeur de tension triphasé	45

Partie II

Fiches de travaux dirigés

II.1	Fiche N° 1 : Grandeurs périodiques d'un signal, série de Fourier, puissances et rendement d'un système électrique	
II.1.1	Enoncés	49
II.1.2	Solutions	52
II.2	Fiche N°2 : Composants électronique de puissance	
II.1.1	Enoncés	66
II.1.2	Solutions	70
II.3	Fiche N°3 : Redressement monophasé simple alternance commandé et non commandé	
II.1.1	Enoncés	84
II.1.2	Solutions	87
II.4	Fiche N°4 : Redressement monophasé double alternance commandé et non commandé	
II.1.1	Enoncés	103
II.1.2	Solutions	108
II.5	Fiche N°5 : Redressement triphasé commandé et non commandé	
II.1.1	Enoncés	127
II.1.2	Solutions	130
II.6	Fiche N°6 : Les gradateurs	
II.1.1	Enoncés	145
II.1.2	Solutions	149

Table des matières

II.7	Fiche N°7 : Les hacheurs	
II.1.1	Enoncés	163
II.1.2	Solutions	167
II.8	Fiche N°8 : Les onduleurs	
II.1.1	Enoncés	180
II.1.2	Solutions	184
	<u>Références bibliographiques</u>	199

Préface

Ce polycopié de travaux dirigés de la matière « *Electronique de Puissance* » a été rédigé à l'intention des étudiants qui préparent, dans le cadre de la réforme *LMD*, une licence académique dans le domaine des Sciences et Technologie, filière Génie Electrique, parcours Electronique, troisième année, semestre 6. Ce polycopié s'adapte aussi avec le programme des écoles d'ingénieurs du même module.

Le contenu de ce polycopié permet aux étudiants l'acquisition des compétences professionnelles à la conception des convertisseurs statiques en toute autonomie.

Les objectifs de ce cours sont multiples. Il s'agit tout d'abord de donner à l'étudiant un aperçu général sur les principes de base de l'électronique de puissance et les différents convertisseurs statiques, tout en soulignant l'impact d'un convertisseur statique dans la conversion d'énergie électrique. Le deuxième objectif est de connaître les différents semi-conducteurs de puissance (diode, thyristors, transistors) utilisés dans la réalisation des convertisseurs et d'expliquer leurs caractéristiques, leurs principes de fonctionnements et leurs modes de commande. Le troisième objectif est d'étudier le fonctionnement des principaux convertisseurs statiques et savoir représenter leurs formes d'ondes d'entrée et de sortie (tension et courant), calculer leurs rendements et d'acquérir les connaissances de base pour un choix technique suivant leurs domaines d'applications.

Ce polycopié est scindé en deux grandes parties.

I. Première partie

Cette première partie est consacrée à des rappels de cours concis. Elle commence par une présentation sur les fonctions trigonométriques suivies par le principe de résolution des équations différentielles avec une application sur un circuit électrique. Ensuite, elle aborde les lois fondamentales de l'électricité et la méthode de calculs des puissances électriques (en régime continu et en régime alternatif), ainsi que le rendement d'un système électrique. Elle est clôturée par un résumé sur les convertisseurs statiques. Cette partie met en lumière l'essentiel de ce qu'il faut savoir.

II. Deuxième partie

La deuxième partie est réservée à des énoncés des exercices de plusieurs fiches de travaux dirigés sur les différents chapitres de la matière en question. Ces fiches sont suivies par des solutions détaillées.

- ✚ Fiche de travaux dirigés N°1 : Grandeurs périodiques d'un signal et série de Fourier.
Puissances et rendement d'un système électrique.
- ✚ Fiche de travaux dirigés N°2 : Composants électroniques de puissance.
- ✚ Fiche de travaux dirigés N°3 : Redressement monophasé simple alternance commandé et non commandé.
- ✚ Fiche de travaux dirigés N°4 : Redressement monophasé double alternance commandé et non commandé.

- ✚ Fiche de travaux dirigés N°5 : Redressement triphasé commandé et non commandé.
- ✚ Fiche de travaux dirigés N°6 : Les gradateurs.
- ✚ Fiche de travaux dirigés N°7 : Les hacheurs.
- ✚ Fiche de travaux dirigés N°8 : Les onduleurs.

Les énoncés des exercices et leurs solutions devraient permettre aux étudiants :

- ✚ De consolider leurs connaissances.
- ✚ Un entraînement efficace afin de s'assurer que le cours est bien assimilé.

Le niveau pré-requis recommandées est celui d'une bonne connaissance de la matière :

- ✚ d'électrotechnique générale.
- ✚ d'électronique générale.
- ✚ mathématique.
- ✚ physique.

Finalement, j'espère que ce polycopié constituera un support utile pour les étudiants.

I.1 Rappels mathématiques

I.1.1 Fonctions trigonométriques

I.1.1.1 Quelques fonctions de bases [1], [2]

Les fonctions sinus et cosinus définies de \mathbb{R} dans l'intervalle $[-1 ; 1]$

$$\cos^2(x) + \sin^2(x) = 1$$

$$\cos(x) = \cos(-x)$$

$$\sin(-x) = -\sin(x)$$

$$\cos(\pi - x) = -\cos(x)$$

$$\cos(\pi + x) = -\cos(x)$$

$$\sin(\pi - x) = \sin(x)$$

$$\sin(\pi + x) = -\sin(x)$$

$$\cos^2(x) = \frac{1 + \cos(2x)}{2}$$

$$\sin^2(x) = \frac{1 - \cos(2x)}{2}$$

I.1.1.2 Valeurs remarquables [1], [2]

	0	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$	π
<i>cos</i>	1	$\sqrt{3}/2$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	0	$-1/2$	-1
<i>sin</i>	0	$1/2$	$\pi/6$	$\sqrt{3}/2$	1	$\sqrt{3}/2$	0

I.1.1.3 Quelques fonctions d'addition et de soustraction [3]

Les variables x et y sont des réelles

$$\cos(x + y) = \cos(x)\cos(y) - \sin(x)\sin(y)$$

$$\cos(x - y) = \cos(x)\cos(y) + \sin(x)\sin(y)$$

$$\sin(x + y) = \sin(x)\cos(y) + \cos(x)\sin(y)$$

$$\sin(x - y) = \sin(x)\cos(y) - \cos(x)\sin(y)$$

I.1.2 Résolution des équations différentielles

Une équation différentielle est une équation dont les inconnues sont des fonctions. Elle se présente sous forme d'une relation entre ces fonctions inconnues et leurs dérivées [3].

I.1.2.1 Equation différentielle premier ordre

Une équation différentielle du premier ordre est de la forme [4], [5]:

$$y' = f(x, y)$$

On distingue trois classes principales d'équations différentielles du premier ordre :

- ✚ Equations dont on peut séparer les variables.
- ✚ Equations homogènes (où y' ne dépend pas du rapport (y/x)).
- ✚ Equations linéaires (où y et y' sont du premier degré).

I.1.2.2 Equation différentielle deuxième ordre

Une équation différentielle du deuxième ordre est de la forme [4], [6] :

$$y'' = f(x, y, y')$$

Il y a deux classes principales d'équations différentielles du deuxième ordre :

- ✚ Equation incomplètes (se ramenant au premier).
- ✚ Equation linéaires (où y, y' et y'').

I.1.2.3 Application des équations différentielles aux circuits électriques [7]

Nous allons étudier la charge d'un condensateur à travers une résistance (voir le circuit ci-après).

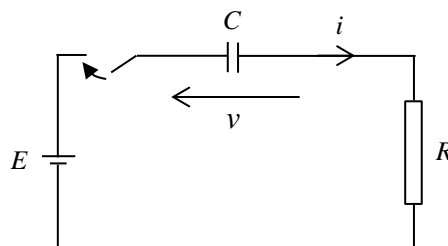


Figure I.1 : Circuit R-C

Le condensateur ne se charge pas immédiatement car, dès qu'il a reçu une charge, si petite soit-elle, il apparaît à ces bornes une tension qui agit comme une f.c.é.m., et il se charge de moins en moins vite, puisque la tension aux bornes du condensateur augmente progressivement, de 0 jusqu'à E .

D'après la loi de Kirchoff, on a :

$$\begin{cases} E = R i + v \\ i = \frac{E - v}{R} \end{cases}$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par la formule suivante :

$$v = \frac{q}{C}$$

On a aussi :

$$dq = i dt$$

Il en découle que :

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E$$

Nous reconnaissons une équation différentielle linéaire du premier ordre, à coefficients constants et avec second membre constant.

$$\frac{dq}{E - q/C} = \frac{dt}{R}$$

La charge q étant nulle lorsque $t=0$. Nous obtenons par intégration :

$$\text{Ln} \left(1 - \frac{q}{CE} \right) = -\frac{t}{CR}$$

Soit encore :

$$q = CE(1 - e^{-t/CR})$$

On en déduit la tension aux bornes du condensateur :

$$v = \frac{q}{C} = E(1 - e^{-t/CR})$$

Et enfin l'intensité :

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{CR}}$$

Finalement on obtient pour le courant :

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{CR}}$$

I.2 Rappels sur les lois fondamentales de l'électricité

I.2.1 Grandeurs électriques continues ou variables

En électronique de puissance comme en électricité, les grandeurs électriques, notamment les tensions, courants et les puissances, sont continues (constantes) ou variables. Ce document utilise la convention universellement adoptée en ce qui concerne la différenciation de la notation de ces grandeurs :

- ✚ Les grandeurs constantes seront systématiquement notées à l'aide de lettres majuscules.
Exemple : U_I, V, I_{ch}, P_s .
- ✚ Les grandeurs variables en fonction du temps seront systématiquement notées à l'aide de lettres minuscules.
Exemple : u_I, v, i_{ch}, p_s .

I.2.2 Lois de fonctionnement des dipôles élémentaires

L'électronique de puissance utilise abondamment les trois dipôles passifs linéaires élémentaires à savoir :

- ✚ La résistance R .

La différence de potentiel entre les bornes de la résistance est donnée par l'équation suivante [8] :

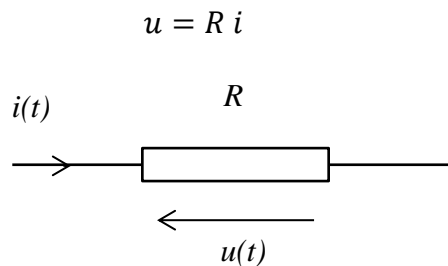


Figure I.2 : Symbole de la résistance

- ✚ La bobine de l'inductance L .

La différence de potentiel entre les bornes de la bobine et le courant qui la traverse sont donnés par les formules suivantes [8] :

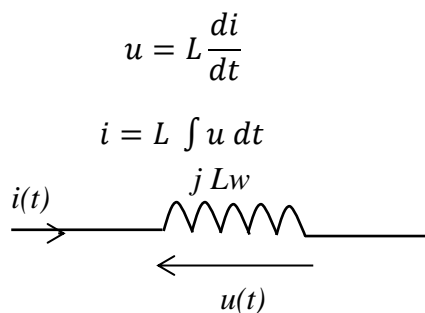


Figure I.3 : Symbole de la bobine

✚ Le condensateur de la capacité C.

La tension aux bornes du condensateur et le courant qui le traverse sont mentionnés par les relations ci-dessous [8]:

$$u = C \int i dt$$

$$i = C \frac{du}{dt}$$

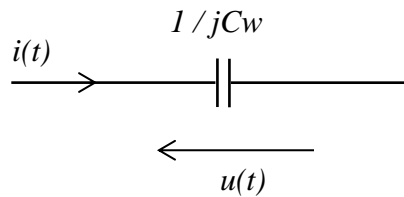


Figure I.4 : Symbole de la capacité

I.2.3 Lois de Kirchhoff

I.2.3.1 Lois des nœuds

La somme algébrique des courants circulant en direction d'un nœud d'un circuit est nulle. Ou encore, la somme des courants dirigés vers un nœud du circuit est égale à la somme des courants issus de ce même nœud [9], [10].

Exemple : $i_1 + i_2 - i_3 = 0$

I.2.3.2 Lois des mailles

La somme algébrique des tensions relevées le long d'une maille est nulle. Les tensions orientées dans le sens de parcours de la maille sont comptées positivement. Celles qui sont orientées en sens contraire sont comptées négativement [9], [10].

Exemple: $i_1 + i_2 - i_3 = 0$

I.2.4 Quelques notions sur le régime sinusoïdal

Pour la fonction sinusoïdale nous définissons quelques termes fondamentaux (forme d'onde, valeur instantanée, valeur crête, forme périodique, période, cycle et fréquence). Ces termes ne sont pas particuliers à la forme sinusoïdale, ils s'appliqueront à toute forme d'onde [10], [11].

I.2.4.1 La forme d'onde

Représentation graphique d'une grandeur, obtenue en traçant la valeur en fonction d'une certaine variable, comme le temps, sa position, sa valeur en degrés, sa valeur en radians, la température, etc .

I.2.4.2 La valeur instantanée

Valeur d'une forme d'onde à un instant « t » particulier.

I.2.4.3 La valeur crête

Valeur maximale que prend une forme d'onde.

I.2.4.4 La forme d'onde périodique

Forme d'onde qui se reproduit en un certain intervalle de temps.

I.2.4.5 La période

Intervalle de temps sur lequel une forme d'onde périodique se produit une seule fois. La période se mesure entre deux points identiques de la forme d'onde.

I.2.4.6 Le cycle

Portion d'une forme d'onde périodique contenue en une période

I.2.4.7 La fréquence

Nombre de cycles qui se produit en une seconde. La fréquence est inversement liée à la période. Mathématiquement, on écrit :

$$f = \frac{1}{T}$$

I.2.4.8 Forme générale des ondes sinusoïdales de la tension ou de courant

La forme mathématique de la sinusoïde est [11]:

$$A_m \sin wt$$

Dans laquelle A_m est la valeur de crête de la forme d'onde et α est l'unité de graduation de l'axe horizontale

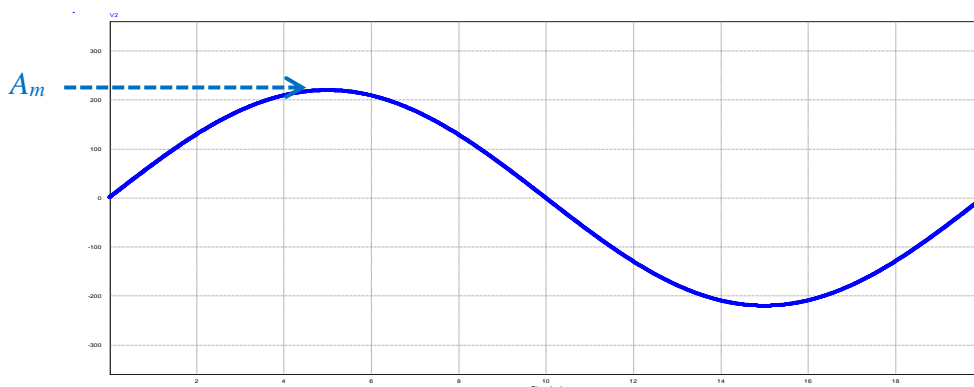


Figure I.5 : Représentation graphique d'une sinusoïde

Dans le cas de grandeurs électriques, comme le courant et la tension, la forme générale est :

$$i = I_m \sin wt$$

$$e = E_m \sin wt$$

I.2.5 les caractéristiques d'un signal périodique

I.2.5.1 La valeur moyenne

La valeur moyenne d'un signal périodique est la moyenne des valeurs instantanées mesurées sur une période complète [12], [13].

$$X_{moy} = \langle X \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

I.2.5.2 La valeur efficace

La valeur efficace d'un signal périodique est la racine carrée de la moyenne du carré de cette grandeur sur une période complète [12], [13].

$$X_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

I.2.6 Décomposition d'un signal en série de Fourier

Tout signal $x(t)$ périodique peut être décomposé en une somme comprenant [5], [14], [15]:

- ✚ Un terme constant.
- ✚ Un terme sinusoïdal de fréquence f (ou fondamental).
- ✚ Une suite limitée ou non de termes sinusoïdaux de fréquence multiple entier de f (les harmoniques).

$$x(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (A_h \cos(h\omega t) + B_h \sin(h\omega t))$$

Ou

$$x(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} X_h \sqrt{2} \sin(h\omega t + \varphi_h)$$

Avec :

$$X_h = \sqrt{\frac{A_h^2 + B_h^2}{2}}$$

$\varphi_h = \text{Arc tan} \frac{A_h}{B_h}$ Le premier terme d'une série de Fourier est le coefficient A_0 , égal à la valeur moyenne de l'onde sur un cycle.

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

La série comporte aussi des termes cosinusoidaux dont les coefficients A_h peuvent être d'une valeur quelconque mais dont la fréquence est nécessairement un multiple entier de la fréquence du premier terme cosinusoidal de la série.

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(hwt) dt$$

Les termes sinusoidaux dont les coefficients B_h peuvent aussi être d'une valeur quelconque mais dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du premier terme sinusoidal de la série.

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(hwt) dt$$

I.3 Les puissances électriques et le rendement

I.3.1 La puissance électrique en régime continu [9], [13]

La puissance est une mesure de la quantité de travail qui peut être fournie en un temps déterminé.

$$P = \frac{W}{t}$$

La puissance fournie ou absorbée par un dispositif ou un système électrique peut se calculer en fonction de l'intensité du courant et de la tension.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Q V}{t}$$

Avec :

$$I = \frac{Q}{t}$$

On obtient :

$$P = V I$$

La puissance fournie par une source d'énergie est donc :

$$P = E I$$

Par substitution direct de la loi d'Ohm, l'équation de la puissance peut s'exprimer sous deux autres formes

I.3.2 Les puissances électriques en régime alternatif sinusoïdal

I.3.2.1 Les puissances en monophasé

En régime alternatif sinusoïdal, on distingue plusieurs types de puissances électriques, qui correspondent à des notions liées aux aspects technologiques de la distribution de l'énergie électrique [9], [13].

+ Puissance instantanée

C'est le produit courant tension à tout instant.

$$p(t) = v(t) i(t)$$

+ Puissance active

C'est la valeur moyenne de la puissance instantanée.

$$P = V I \cos \varphi$$

+ Puissance apparente

C'est le produit des valeurs efficaces.

$$P = V I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

+ Puissance réactive

C'est la puissance sans effet physique en terme de travail correspond à la partie réactive du courant.

$$Q = V I \sin \varphi$$

I.3.2.3 Les puissances en triphasé

En terme de puissance, un système triphasé est équivalent à trois circuit monophasé côte à côte. Les formulations des puissances pour des récepteurs couplés en étoile ou bien en triangle sont définies comme suit [16], [17]:

+ Puissance active

La puissance active fournie à chaque phase est déterminée par l'équation suivante :

$$P_{\phi} = V_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$$

La puissance active totale fournie au récepteur est :

$$P_T = 3P_{\phi} = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

+ Puissance réactive

La puissance réactive dans chaque phase est :

$$Q_{\phi} = V_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi$$

La puissance réactive totale du récepteur est :

$$Q_T = 3Q_\phi = \sqrt{3} U I \sin\phi$$

✚ Puissance apparente

La puissance apparente dans chaque phase est :

$$S_\phi = U_\phi I_\phi$$

La puissance apparente totale du récepteur est :

$$S_T = 3S_\phi = \sqrt{3} U I$$

I.3.3 Rendement

Tout dispositif électrique utilisé pour transformer de l'énergie électrique peut être représenté par une boîte noire comportant une entrée et une sortie comme le montre la figure ci-après [16].

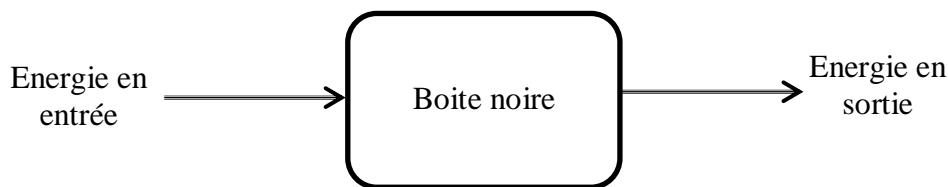


Figure I.6 : Schéma synoptique de la transformation de l'énergie électrique

La loi de conservation de l'énergie impose la condition :

$$W_{entrée} = W_{sortie} + W_{pertes \text{ d'énergie ou énergie stockée.}}$$

Divisons les deux membres de cette relation par le temps. On trouve :

$$P_{entrée} = P_{sortie} + P_{perdue \text{ ou stockée.}}$$

Le rendement du dispositif représenté par la boîte noire se calcule au moyen de la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} = \frac{W_{sortie}}{W_{entrée}}$$

I.4 Rappels sur les convertisseurs statiques

I.4.1 Introduction

L'électronique de puissance permet d'adapter et de moduler l'énergie électrique fournie par un réseau électrique à une charge et réciproquement, de la charge vers le réseau, en cas de réversibilité énergétique [18].

Les fonctions de l'électronique de puissance comme le redressement sont réalisées par des convertisseurs d'énergie, dit statiques par opposition aux convertisseurs tournants.

Afin d'assurer un rendement de conversion proche de 100 %, l'électronique de puissance utilise des composants semi-conducteurs de puissance, également appelés interrupteurs de puissance, qui fonctionnent en commutation [18].

Selon la nature des grandeurs d'entrée et de sortie, le tableau suivant présente quatre familles de convertisseurs. Ces grandeurs pouvant être continues ou alternatives.

Type de conversion	Symbole	Montage
Alternatif-continu		Redresseur
Alternatif-alternatif		Gradateur Cycloconvertisseur
Continu-continu		Hacheur
Continu-alternatif		Onduleur

Tableau I.1 : Types de convertisseurs d'électronique de puissance

I.4.2 Les composants de l'électronique puissance de puissance

La technologie de l'électronique de puissance utilise des semi-conducteurs qui opèrent comme des interrupteurs, fonctionnant de manière analogue à un interrupteur mécanique pouvant être ouvert ou fermé [19].

Ces semi-conducteurs présentent une résistance très basse lorsqu'ils sont en position fermée et une résistance très élevée lorsqu'ils sont en position ouverte [19].

Il existe deux familles de semi-conducteurs :

- ✚ Semi-conducteurs contrôlables.
- ✚ Semi-conducteurs non contrôlables.

Les composants suivants sont utilisés par l'électronique de puissance pour assurer la fonction d'interrupteur:

- ✚ La diode.
- ✚ Le thyristor.
- ✚ Le thyristor G.T.O. (gate turn off).
- ✚ Le thyristor T.R.I.A.C (triode for alternative current).
- ✚ Le transistor bipolaire.
- ✚ Le transistor M.O.S
- ✚ Le transistor bipolaire à grille isolée I.G.B.T.

I.4.2.1 La diode

La diode constitue le semi-conducteur de base non contrôlable, son comportement étant entièrement déterminé par le circuit au sein duquel elle est incorporée. Lorsque le circuit cherche à laisser passer un courant dans le sens direct, c'est-à-dire de l'anode vers la cathode, la diode devient conductrice ou passante. En revanche, lorsque le circuit applique une tension négative ou inverse à ses bornes, la diode se bloque ou devient isolante [20], [21].

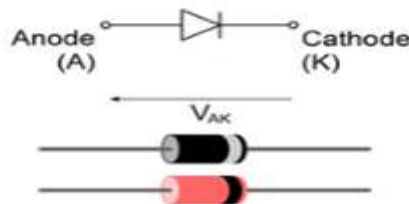


Figure I.7 : Symbole de la diode et boîtiers cylindriques standards avec l'emplacement de la cathode

La courbe courant-tension d'une diode redresseuse est représentée dans la figure ci-dessous. On peut observer la présence de deux segments distincts dans cette caractéristique [22], [23] :

- ✚ Caractéristique directe.
- ✚ Caractéristique inverse.

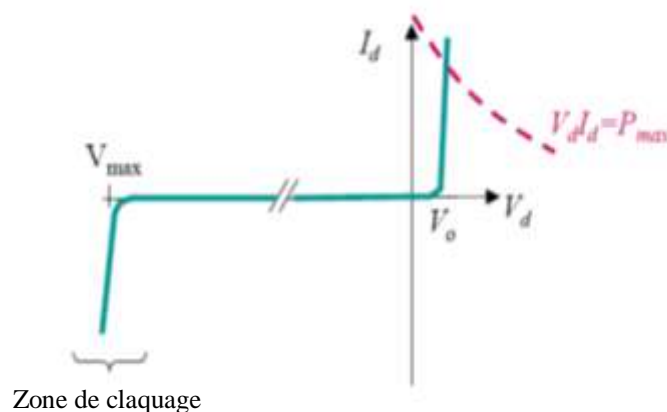


Figure I.8 : Caractéristique statique d'une diode

Le modèle de la diode à l'état passant est alors constitué d'un générateur de tension V_0 en série avec une résistance R_0 .

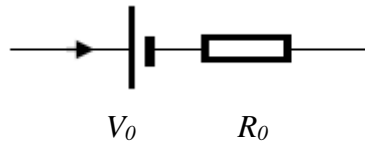


Figure I.9 : Schéma électrique équivalent d'une diode

Avec : V_0 : tension de seuil (tension minimale à partir de laquelle la diode devient passante).
 R_0 : résistance dynamique de la diode.

Les pertes par conduction

Les pertes par conduction d'une diode à l'état passant sont données par la formule suivante :

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \int_0^T V_d I_d dt$$

Avec :

$$V_d = V_0 + R_0 I_d$$

Finalement on trouve :

$$P_{cond} = V_0 I_{d \text{ moyen}} + R_0 I_{d \text{ efficace}}^2$$

Si on a n diodes identiques les pertes seront donc :

$$P_{cond} = n (V_0 I_{d \text{ moyen}} + R_0 I_{d \text{ efficace}}^2)$$

Les pertes par conduction d'une diode à l'état bloquée sont négligeables.

I.4.2.2 Le thyristor

Le thyristor est un semi-conducteur unidirectionnel contrôlable (\approx diode commandée) [22], [23].

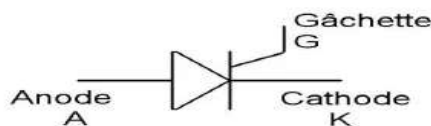


Figure I.10 : Symbole d'un thyristor

Le thyristor devient passant que si :

➤ $V_{AK} > 0$.

- $I_G > 0$.

Le thyristor se désamorce dès le passage par zéro du courant direct I_d . En réalité le thyristor se désamorce dès que $I_d > I_H$ (I_H est le courant de maintien).

Si le thyristor est déjà amorcé par un courant I_G , on peut interrompre ce courant, le thyristor restera toujours amorcé.

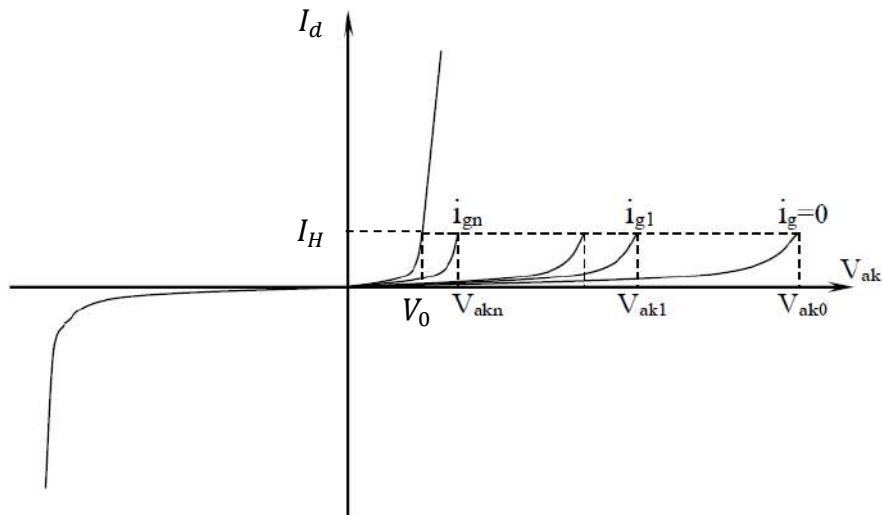


Figure I.11 : Caractéristique statique d'un thyristor [24]

I.4.2.3 Le thyristor G.T.O.

Le thyristor G.T.O. (Gate Turn Off) possède des propriétés semblables à celles du thyristor classique sauf que la fermeture et l'ouverture peuvent être commandées par une gâchette [22], [23].

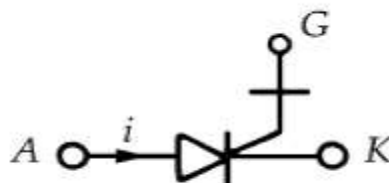


Figure I.12 : Symbole d'un thyristor GTO

L'amorçage commandé du G.T.O. est similaire à celui du thyristor classique. Toutefois, après amorçage, il est nécessaire de maintenir le courant de gâchette à une valeur légèrement positive pour assurer une bonne répartition du courant au sein du composant.

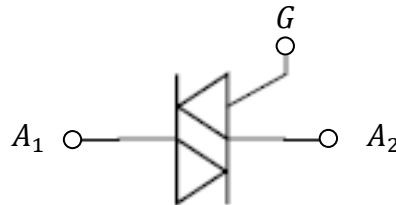
Un thyristor GTO est désamorcé si :

- On extrait une impulsion de courant cathode-gâchette d'intensité suffisante.

- La tension $V_{AK} < 0$.

I.4.2.4 Le thyristor T.R.I.A.C.

Le Triac (TRIode for Alternative Current) est un semi-conducteur bidirectionnel (conduire dans les deux sens). Il se comporte comme deux thyristors montés en anti-parallèle ou bien en tête bêche [22], [23], [25].

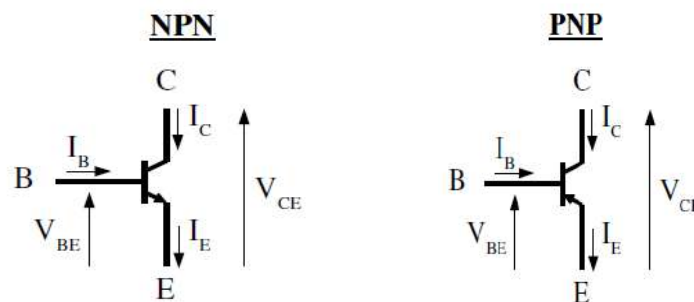


Avec : A_1 : anode 1.
 A_2 : anode 2.

Figure I.13 : Symbole d'un thyristor TRIAC [26]

I.4.2.4 Le transistor bipolaire

Le transistor bipolaire est un interrupteur unidirectionnel en courant et tension commandable à la fermeture et à l'ouverture par le biais du courant de base. Son principe de fonctionnement est basé sur deux jonctions PN, l'une en direct et l'autre en inverse. La polarisation de la jonction PN inverse par un faible courant électrique permet de commander un courant beaucoup plus important, suivant le principe de l'amplification de courant [22], [23], [27].



Avec : C : le collecteur.
 E : l'émetteur.
 B : la base.

Figure I.14 : Symbole d'un transistor bipolaire [28]

I.4.2.6 Le transistor à effet champ

Le transistor à effet champ M.O.S.F.E.T. (metal oxide semiconductor field effect transistor) est un composant totalement commandé à la fermeture et à l'ouverture. C'est le composant le

plus rapide à se fermer et à s'ouvrir. C'est un composant très facile à commander. Il est rendu passant grâce à une tension V_{GS} positive. La grille est isolée du reste du transistor, ce qui procure une impédance grille-source très élevée. La grille n'absorbe donc aucun courant en régime permanent. La jonction drain-source est alors assimilable à une résistance très faible : R_D Son de quelques $m\Omega$. On le bloque en annulant V_{GS} , R_{DS} devient alors très élevée [23], [27], [29].

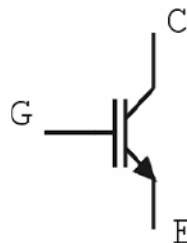


Avec : D : le drain.
 S : la source.
 G : la grille.

Figure I.15 : Symbole d'un transistor MOSFET [29]

I.4.2.7 Le transistor à grille isolée

Le transistor à grille isolée I.G.B.T. (inslated gate bipolar transistor) est l'association d'un transistor bipolaire et un transistor à effet de champ. Il combine les meilleures qualités des deux pour atteindre les caractéristiques d'un semi-conducteur optimal. Son fonctionnement est simple ; une tension positive V_{GE} entre la grille (G) et l'émetteur (E) active le MOSFET. Ensuite, la tension connectée au collecteur (C) peut conduire le courant de base à travers le transistor bipolaire et le MOSFET. Le transistor bipolaire s'active et le courant de charge peut circuler. Une tension $V_{GE} \leq 0$ volt désactive le MOSFET, le courant de base est interrompu, et le transistor bipolaire se désactive également [23], [27], [30].



Avec : C : le collecteur.
 E : l'émetteur.
 G : la grille.

Figure I.16 : Symbole d'un transistor IGBT [30]

I.4.3 Le redressement non commandé et commande

I.4.3.1 Généralités

✚ Définition

Les redresseurs opèrent la conversion alternatif-continu. Ils constituent le type de convertisseur statique le plus répandu parmi les convertisseurs de l'électronique de puissance [31], [32].

✚ Types de commutations

On distingue trois types de montage à savoir :

- Les montages à commutation parallèle **P**.
- Les montages à commutation parallèle double **PD**.
- Les montages à commutation série **S**.

L'indication du mode de commutation suivi du nombre de phase à redresser suffit à caractériser un montage redresseur.

I.4.3.2 Le redressement monophasé simple alternance

✚ Montage non commandé

✚ Charge résistive

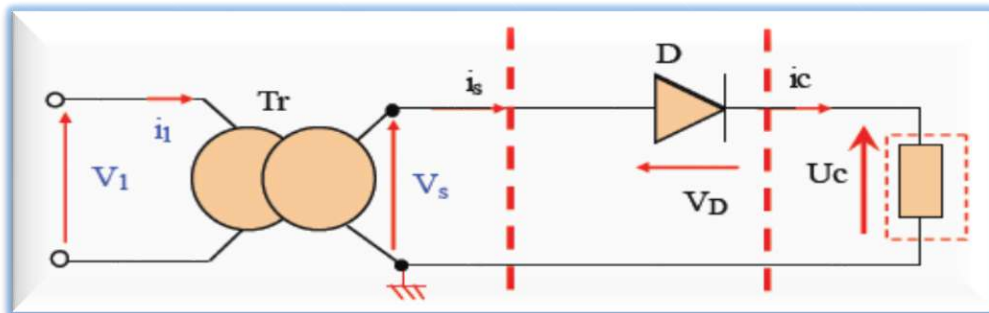


Figure I.17 : Montage simple alternance [33]

La tension d'alimentation est : $v_s (wt) = V_{max} \sin(wt)$

Formes d'ondes des différentes grandeurs

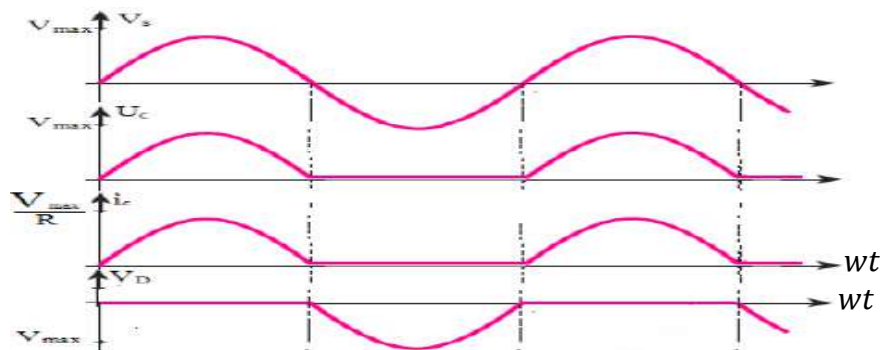


Figure I.18 : Formes d'ondes relatives au redressement non commandé (charge R) [33]

Expressions des tensions et du courant

$$U_{c\text{ moyenne}} = \frac{V_{\max}}{\pi}$$

$$V_{D\text{ max}} = -V_{\max}$$

$$i_{c\text{ moyen}} = \frac{U_{c\text{ moyenne}}}{R} = \frac{V_{\max}}{\pi R}$$

➤ Charge résistive-inductive sans diode de roue libre

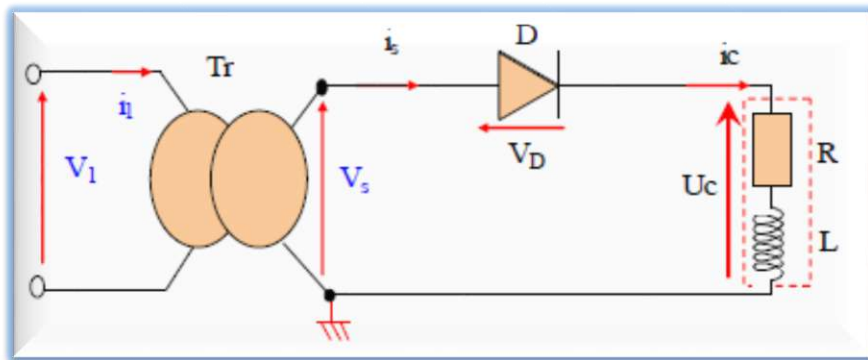


Figure I.19 : Montage simple alternance. Charge R-L [33]

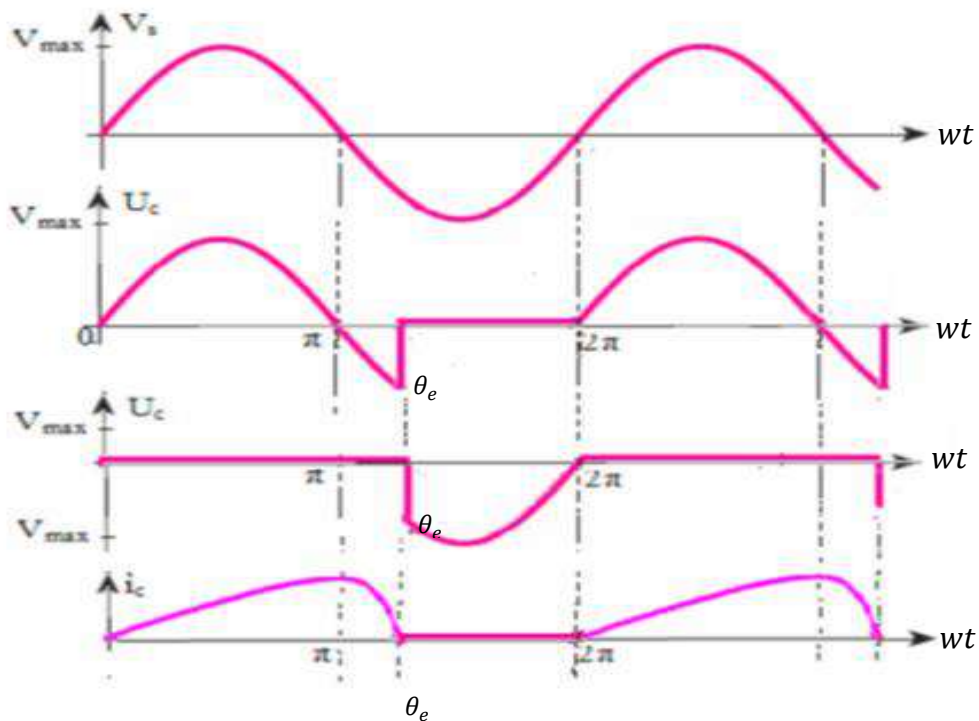


Figure I.20 : Formes d'ondes relatives au redressement non commandé (charge R-L) [33]

Avec : θ_e : l'angle d'extinction du courant.

Expressions des tensions et du courant

$$U_c \text{ moyenne} = \frac{V_{max}}{2 \pi} (1 - \cos \theta_e)$$

$$V_D \text{ max} = -V_{max}$$

$$i_c \text{ moyen} = \frac{U_c \text{ moyenne}}{R} = \frac{V_{max}}{2 \pi R} (1 - \cos \theta_e)$$

➤ **Charge résistive-inductive avec diode de roue libre**

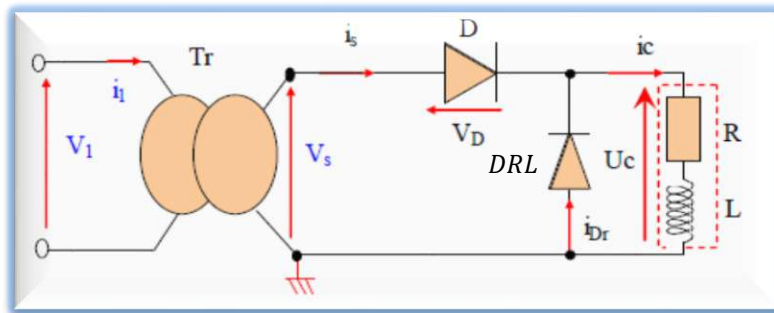


Figure I.21: Montage simple alternance. Charge R-L avec DRL [33]

Formes d'ondes des différentes grandeurs

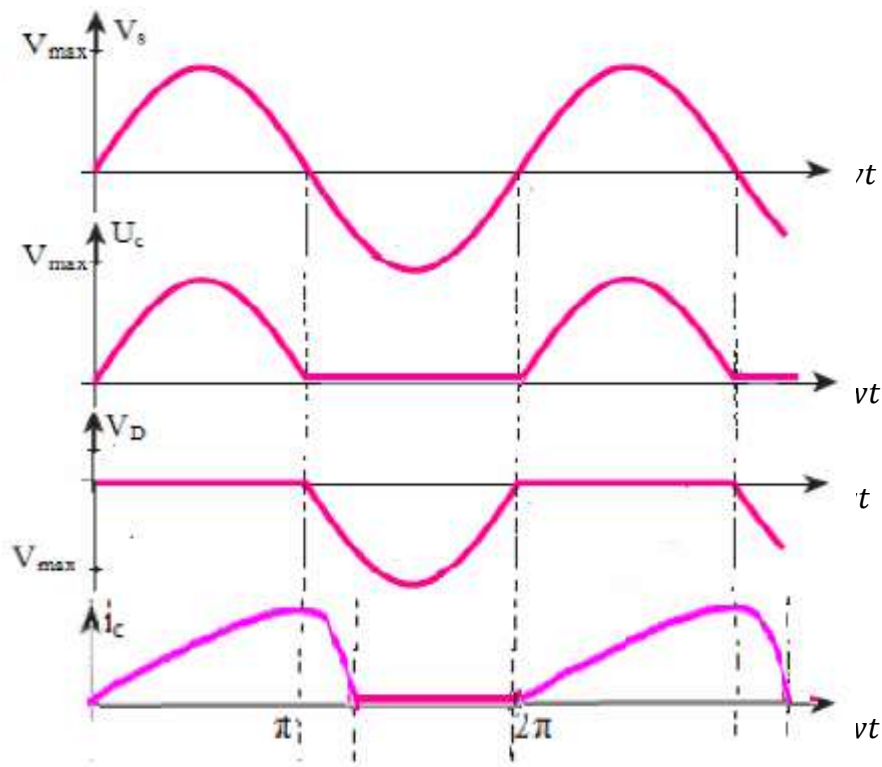


Figure I.22 : Formes d'ondes relatives au redressement non commandé avec DRL (charge R-L) [33]

Expressions des tensions et du courant

$$U_{c\ moyenne} = \frac{V_{max}}{\pi}$$

$$V_{D\ max} = -V_{max}$$

$$i_{c\ moyen} = \frac{U_{c\ moyenne}}{R} = \frac{V_{max}}{\pi R}$$

Note :

- ✓ La diode de roue libre devient passante lorsque la tension d'alimentation du pont devient négative.
- ✓ La tension de charge ne peut plus devenir négative car la diode de roue libre assure la continuité du courant jusqu'à l'angle θ_e .

⚡ Montage commandé

⚡ Charge résistive

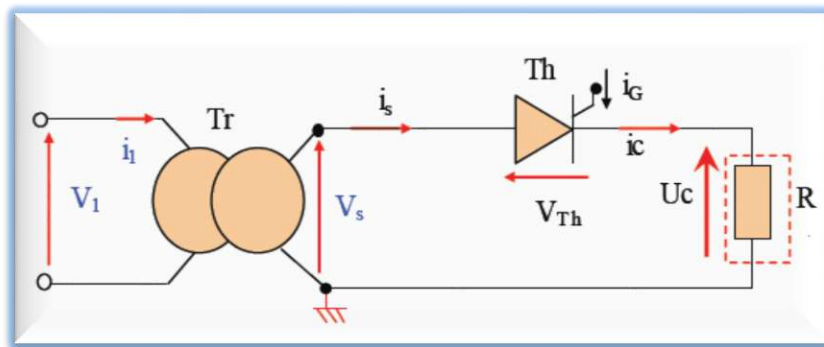


Figure I.23: Montage simple alternance [33]

Avec : i_G : courant de commande du thyristor.

Formes d'ondes des différentes grandeurs

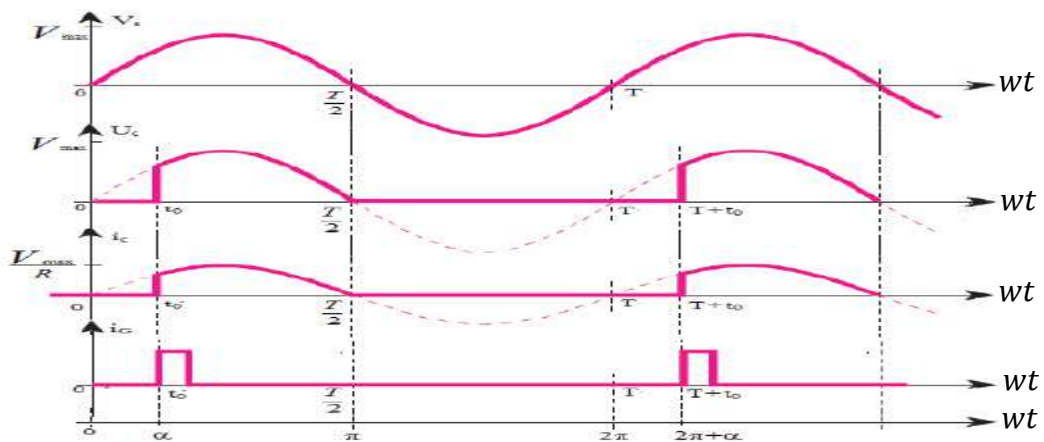


Figure I.24 : Formes d'ondes correspondantes au redressement commandé (charge R) [33]

Avec : α : l'angle de retard de l'amorçage du thyristor ($\alpha = \pi/4\ rad$).

Expressions des tensions et du courant

$$U_{c\ moyenne} = \frac{V_{max}}{2\pi} (1 - \cos \alpha)$$

$$V_{Th\ max} = -V_{max}$$

$$i_{c\ moyen} = \frac{U_{c\ moyenne}}{R} = \frac{V_{max}}{2\pi R} (1 - \cos \alpha)$$

I.4.3.2 Le redressement monophasé double alternance

Hypothèse :

Nous supposons que l'inductance de la bobine est suffisamment grande pour que le courant de charge soit constant.

- ✚ Montage non commandé
- ✚ Commutation parallèle simple - P2 (transformateur point milieu)
- ✚ Charge résistive-inductive

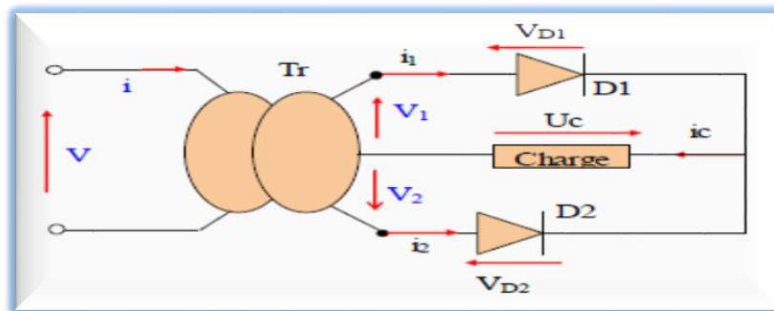


Figure I.25: Montage double alternance - P2 [33]

Avec : $v_1 (wt) = V_{max} \sin(wt)$ et $v_2 (wt) = V_{max} \sin(wt + \pi) = -V_{max} \sin(wt)$

Formes d'ondes des différentes grandeurs

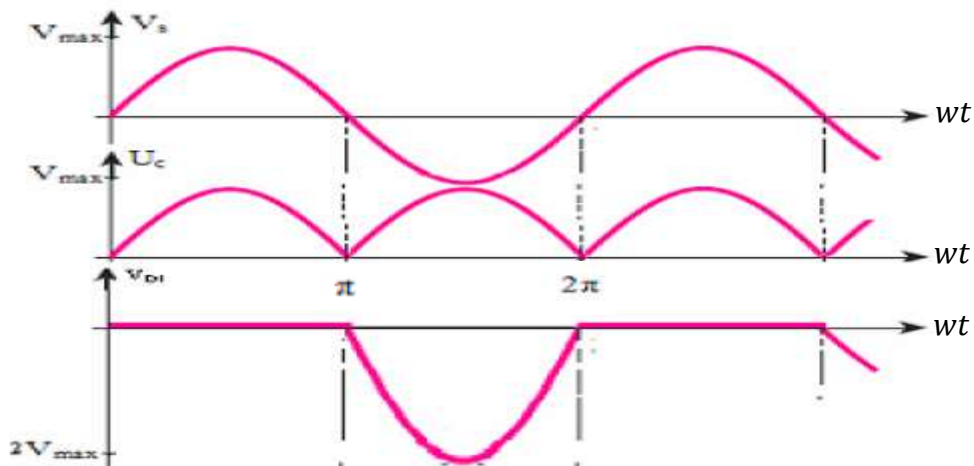


Figure I.26 : Formes d'ondes - Montage P2 non commandé avec charge résistive [33]

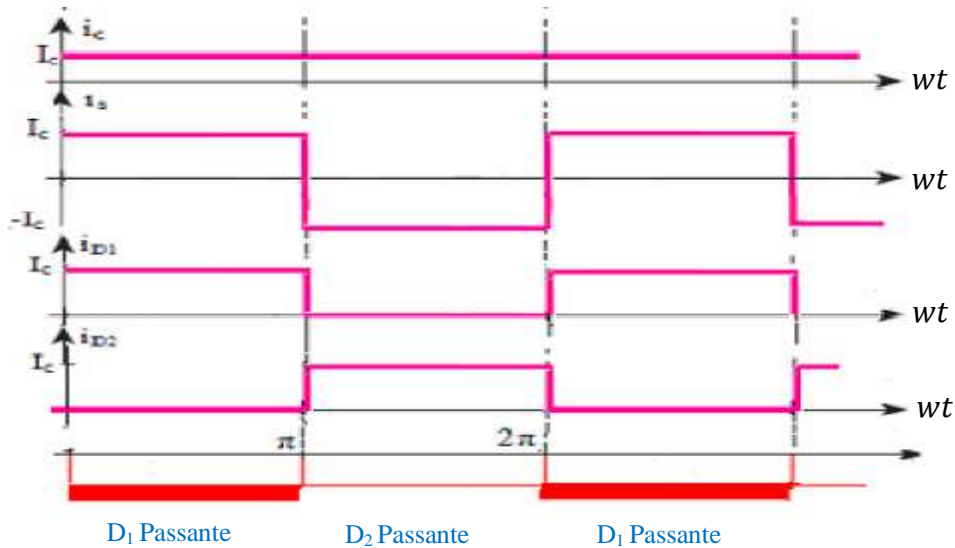


Figure I.27 : Formes d'ondes - Montage P2 non commandé avec charge résistive (suite) [33]

Expressions des tensions et du courant

$$U_{c\ moyenne} = \frac{2 V_{max}}{\pi}$$

$$V_{D\ max} = -2 V_{max}$$

$$i_{c\ moyen} = \frac{U_{c\ moyenne}}{R} = \frac{2 V_{max}}{\pi R}$$

- ✚ Commutation parallèle simple - PD2 (pont de GRAETZ)
- ✚ Charge résistive-inductive

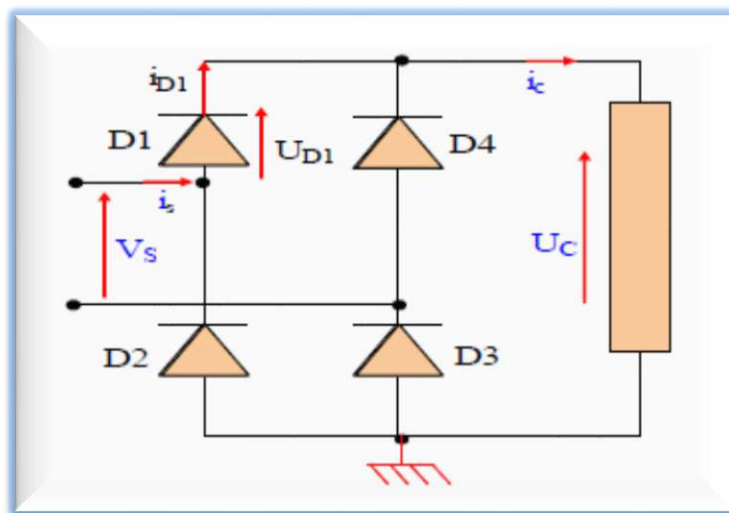


Figure I.28: Montage double alternance - PD2 [33]

Formes d'ondes des différentes grandeurs

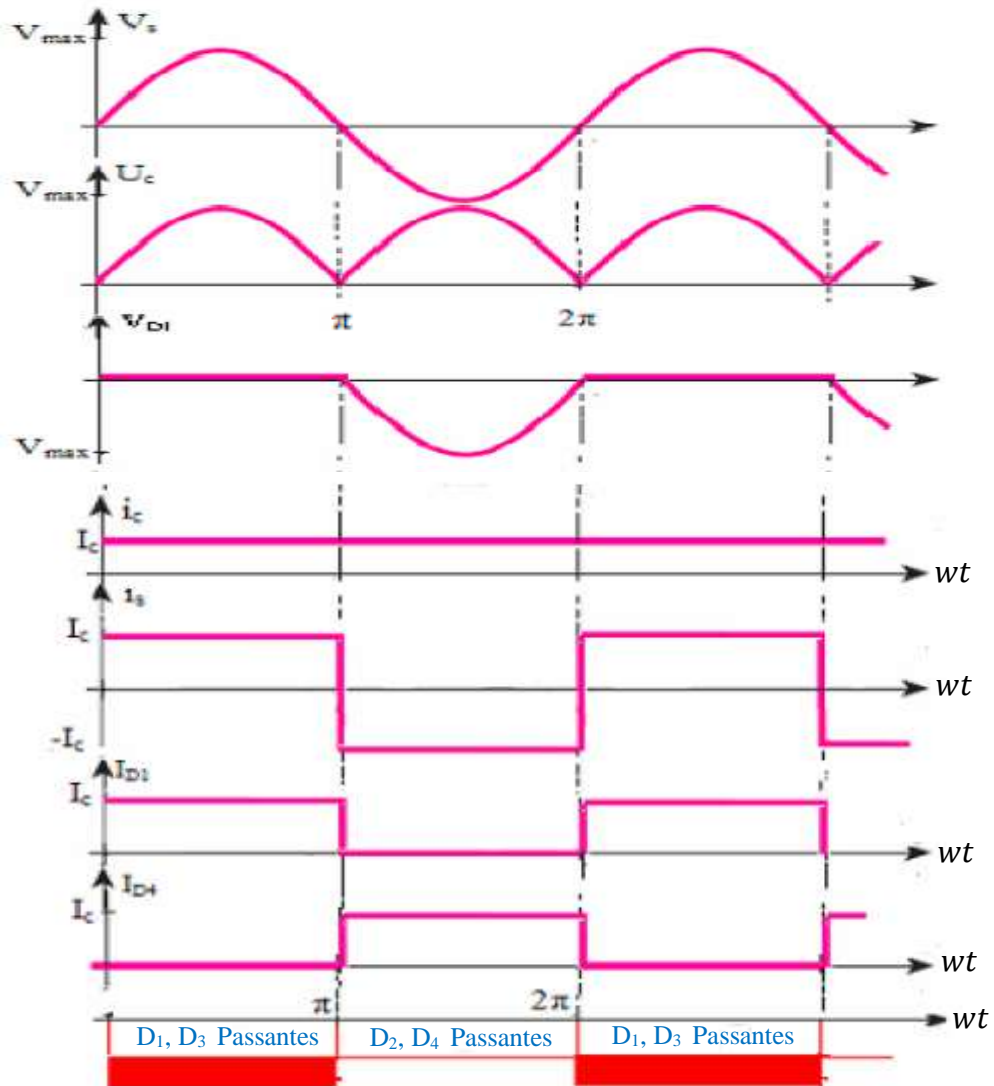


Figure I.29 : Formes d'ondes – Montage PD2 non commandé avec charge résistive [33]

Expressions des tensions et du courant

$$U_{c \text{ moyenne}} = \frac{2 V_{max}}{\pi}$$

$$V_{D \text{ max}} = - V_{max}$$

$$i_{c \text{ moyen}} = \frac{U_{c \text{ moyenne}}}{R} = \frac{2 V_{max}}{\pi R}$$

⚡ Montage commandé

⚡ Commutation parallèle double - PD2 (pont de GRAETZ mixte)

⚡ Charge résistive-inductive avec diode de roue libre

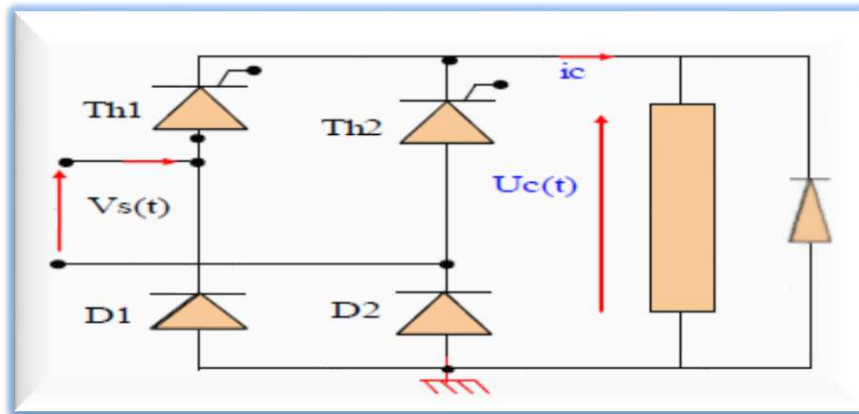
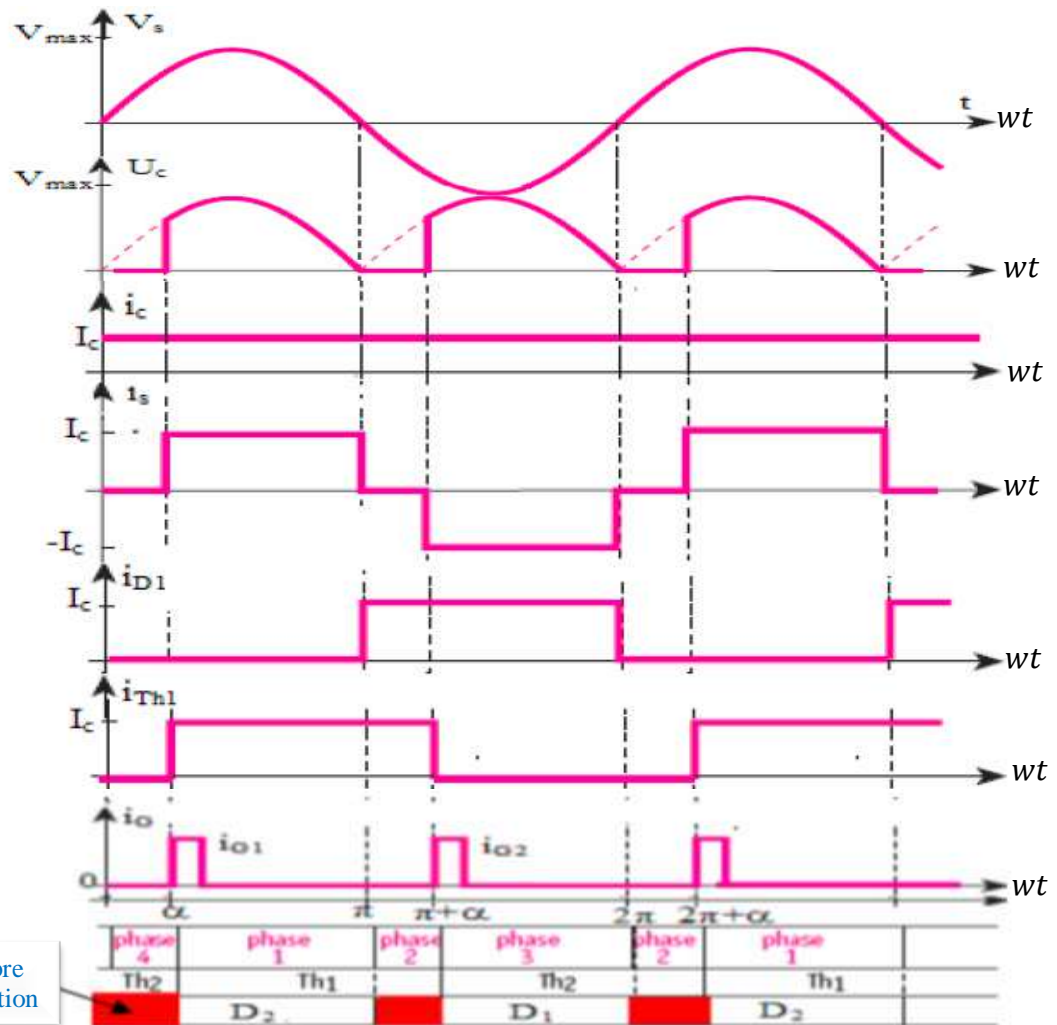


Figure I.30: Montage double alternance - PD2 mixte [33]

Formes d'ondes des différentes grandeurs



Phase de roue libre
Phase de récupération

Figure I.31 : Formes d'ondes – Montage PD2 mixte avec charge résistive [33]

Expressions de la tension et du courant

$$U_{c\ moyenne} = \frac{V_{max}}{2\pi} (1 - \cos \alpha)$$

$$i_{c\ moyen} = \frac{U_{c\ moyenne}}{R} = \frac{V_{max}}{2\pi R} (1 - \cos \alpha)$$

I.4.3.3 Le redressement triphasé

- ✚ Montage non commandé
- ✚ Commutation parallèle simple - P3
- ✚ Charge résistive

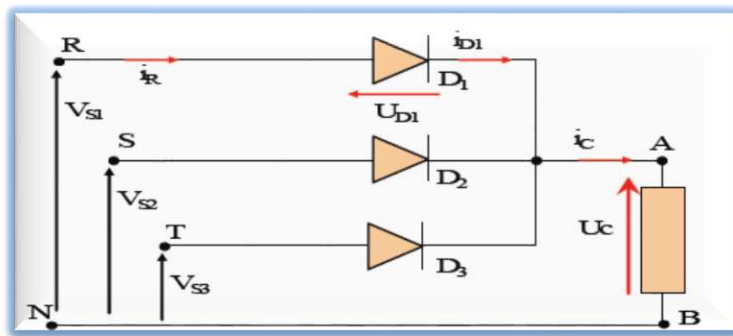


Figure I.32: Montage triphasé - Montage P3 [33]

Avec :

$$v_{s1}(wt) = V_{max} \sin(wt)$$

$$v_{s2}(wt) = V_{max} \sin\left(wt - \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

$$v_{s3}(wt) = V_{max} \sin\left(wt + \left(\frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

Note :

Parmi les diodes D_1, D_2, D_3 devient passante celle qui a la tension la plus positive au niveau de son anode et supérieure aux tensions appliquées aux deux autres diodes.

Formes d'ondes des différentes grandeurs

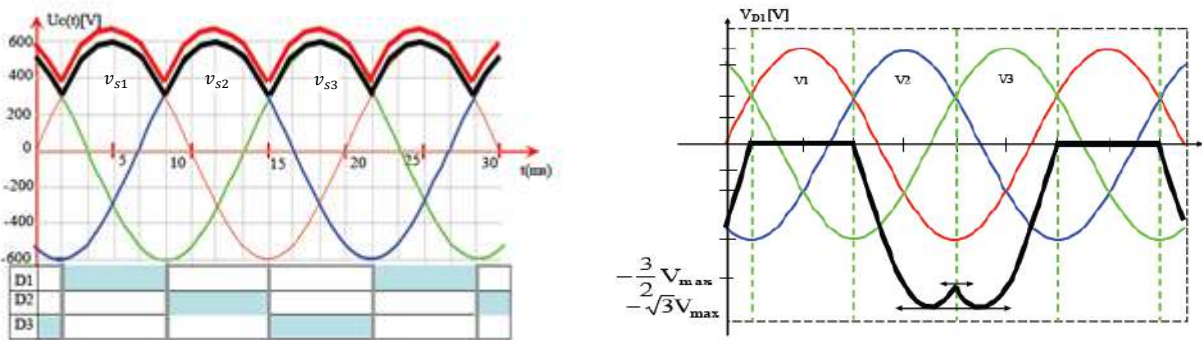


Figure I.33 : Formes d'ondes – Montage P3 non commandé (charge R) [33]

Expressions des tensions et du courant

$$U_{c\ moyenne} = \frac{3\sqrt{3} V_{max}}{2\pi}$$

$$V_{D\ max} = -\sqrt{3} V_{max}$$

$$i_{c\ moyen} = \frac{U_{c\ moyenne}}{R} = \frac{3\sqrt{3} V_{max}}{2\pi R}$$

- ✚ Commutation parallèle double - P3 non commandé
- ✚ Charge résistive

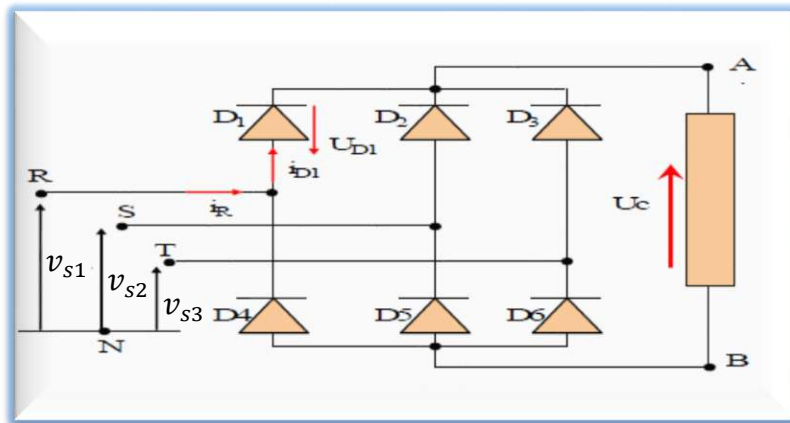


Figure I.34: Montage triphasé - Montage PD3 [33]

Note :

La tension redressée est à chaque instant, égale à la différence entre la plus positive et la plus négative des tensions alternatives v_{s1} , v_{s2} et v_{s3} .

Formes d'ondes des différentes grandeurs

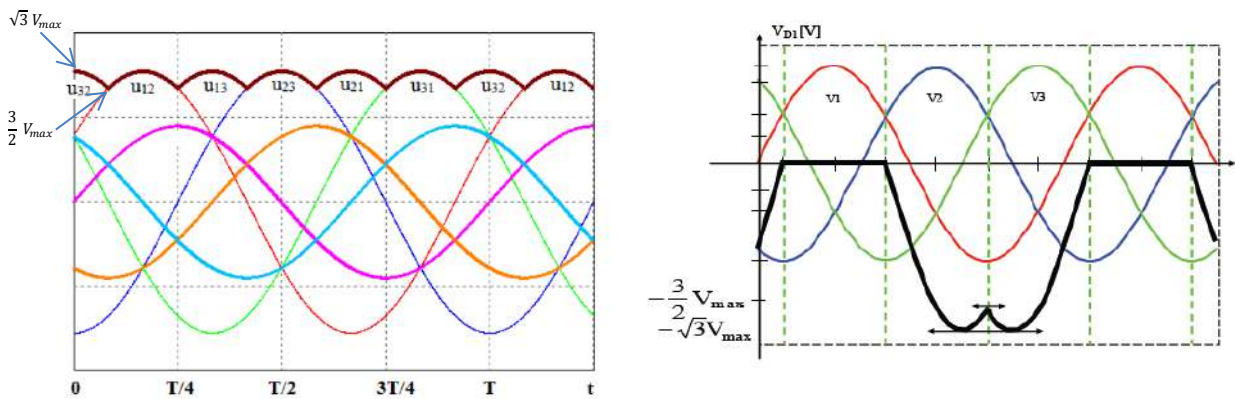


Figure I.35: Formes d'ondes - Montage PD3 non commandé (charge R) [33]

Expressions des tensions et du courant

$$U_{c\ moyenne} = \frac{3\sqrt{3} V_{max}}{\pi}$$

$$V_{D\ max} = -\sqrt{3} V_{max}$$

$$i_{c\ moyen} = \frac{U_{c\ moyenne}}{R} = \frac{3\sqrt{3} V_{max}}{\pi R}$$

⚡ Montage commandé

Note :

L'angle de retard à l'amorçage des thyristors est compté à partir de l'amorçage naturel des diodes.

⚡ Commutation parallèle simple - P3

⚡ Charge résistive

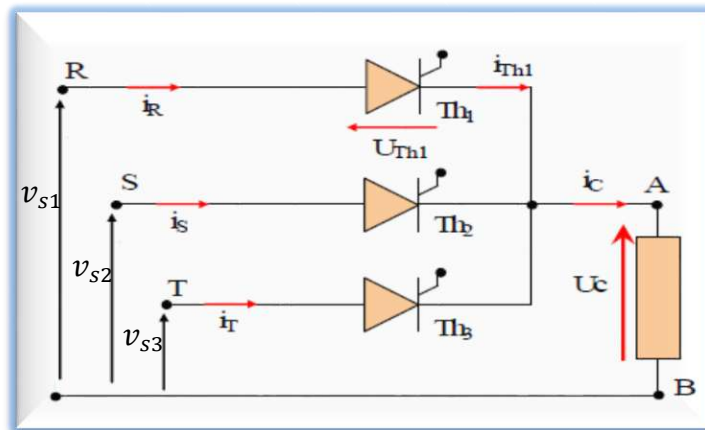


Figure I.36: Montage triphasé - Montage P3 [33]

Formes d'ondes des différentes grandeurs

$$\alpha = \pi/6 \text{ rad}$$

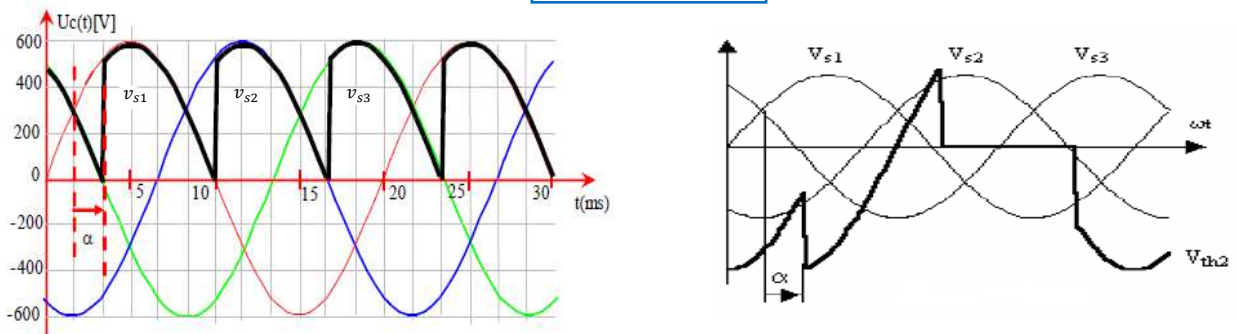


Figure I.37: Formes d'ondes - Montage P3 commandé (charge R) [33]

Expressions des tensions et du courant

$$U_{c\ moyenne} = \frac{3\sqrt{3} V_{max}}{2\pi} \cos(\alpha)$$

$$V_{D\ max} = \pm\sqrt{3} V_{max}$$

$$i_{c\ moyen} = \frac{U_{c\ moyenne}}{R} = \frac{3\sqrt{3} V_{max}}{2\pi R} \cos(\alpha)$$

⚡ Commutation parallèle double - P3 non commandé

⚡ Charge résistive

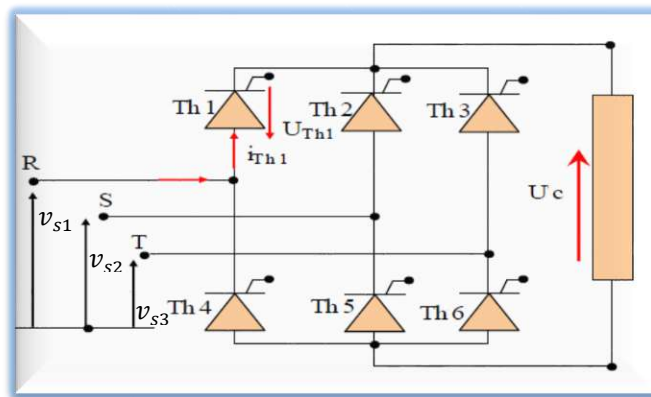


Figure I.38: Montage triphasé - Montage PD3 [33]

Formes d'ondes des différentes grandeurs

$$\alpha = \pi/6\ rad$$

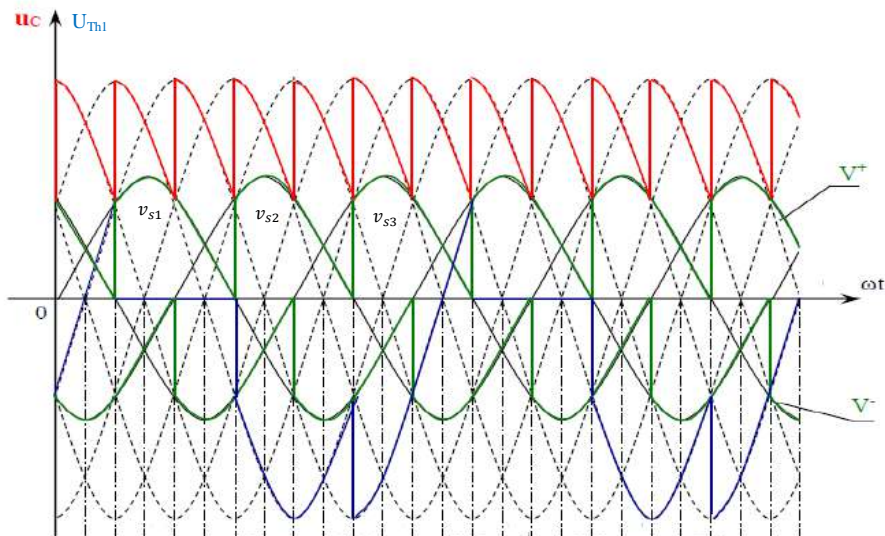


Figure I.39: Formes d'ondes - Montage PD3 commandé (charge R) [33]

Expressions des tensions et du courant

$$U_{c\ moyenne} = \frac{3\sqrt{3} V_{max}}{\pi} \cos(\alpha)$$

$$V_{D\ max} = \pm \sqrt{3} V_{max}$$

$$i_{c\ moyen} = \frac{U_{c\ moyenne}}{R} = \frac{3\sqrt{3} V_{max}}{\pi R} \cos(\alpha)$$

I.4.4 Les gradateurs

I.4.4.1 Généralités

Un gradateur est un convertisseur statique qui permet de contrôler la puissance absorbée par un récepteur en régime alternatif. Ce convertisseur produit une tension et un courant alternatifs variable à partir d'une source de tension alternative, sans en modifier la fréquence. La tension aux bornes du récepteur évolue en fonction de la séquence de commande de l'interrupteur. Ce dernier est bidirectionnel en courant, il est formé d'un triac ou bien de deux thyristors montés en têtes bêtes [27], [34], [35].

I.4.4.2 Le gradateur monophasé

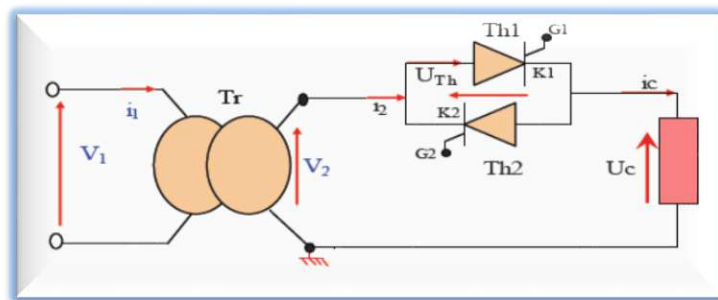


Figure I.40: Montage d'un gradateur monophasé - Montage à deux thyristors en têtes bêtes [33]

⚡ Charge résistive

Formes d'ondes des différentes grandeurs

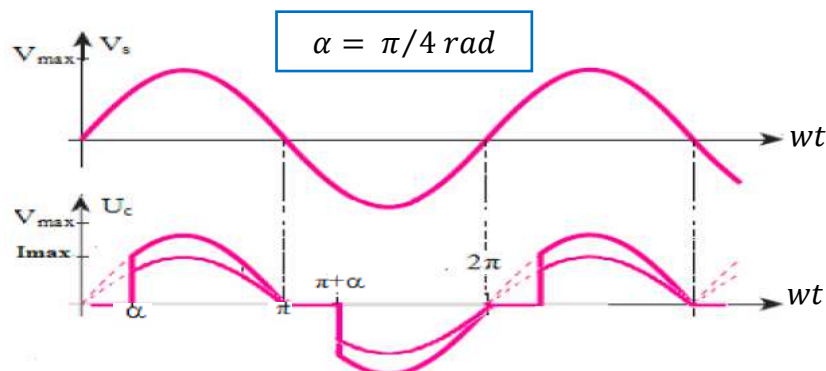


Figure I.42: Formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un gradateur monophasé – Charge R [33]

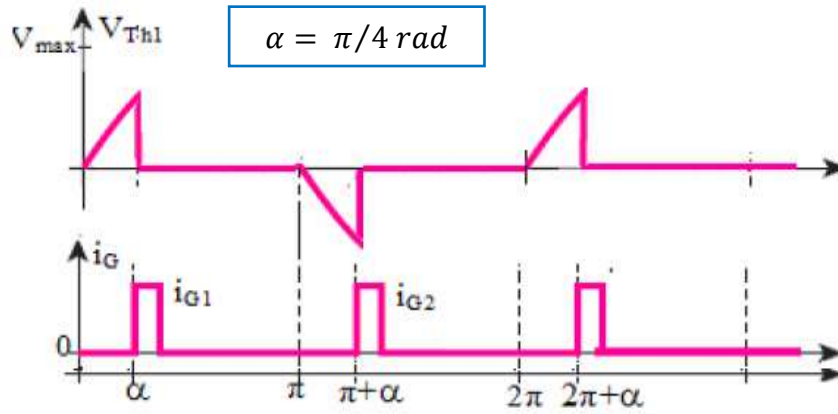


Figure I.43: Formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un gradateur – Charge résistive (suite) [33]

Expressions de la tension et du courant de la charge

$$U_{c\text{ efficace}} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

$$i_{c\text{ efficace}} = \frac{U_{c\text{ efficace}}}{R} = \frac{V_{max}}{R \sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

⚡ Charge résistive-inductive

Formes d'ondes des différentes grandeurs

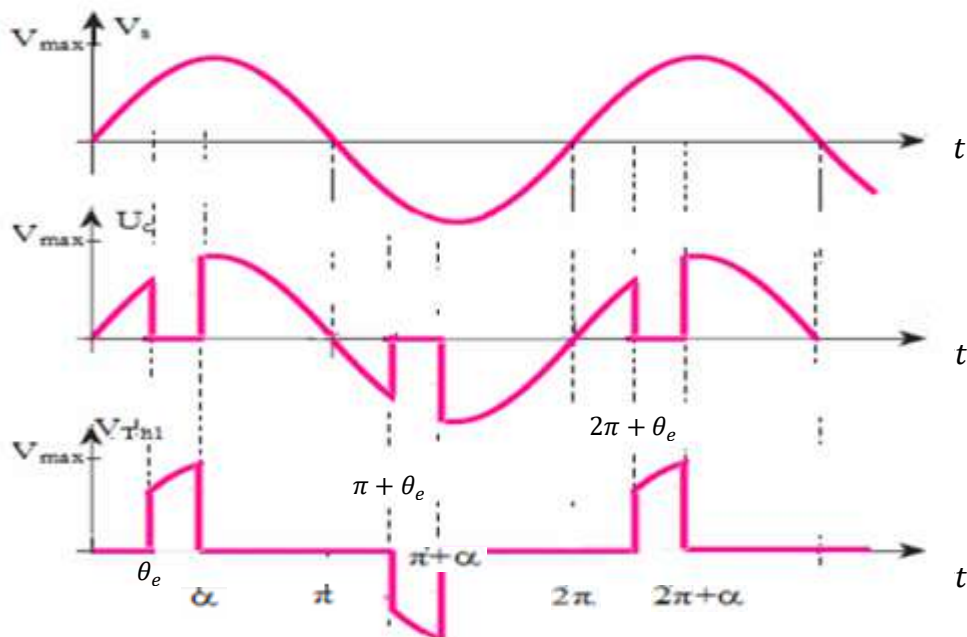


Figure I.44: Formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un gradateur – Charge résistive-inductive [33]

I.4.4.3 Les gradateurs triphasés

Un gradateur triphasé est formé par trois gradateurs monophasés montés en étoile ou en triangle

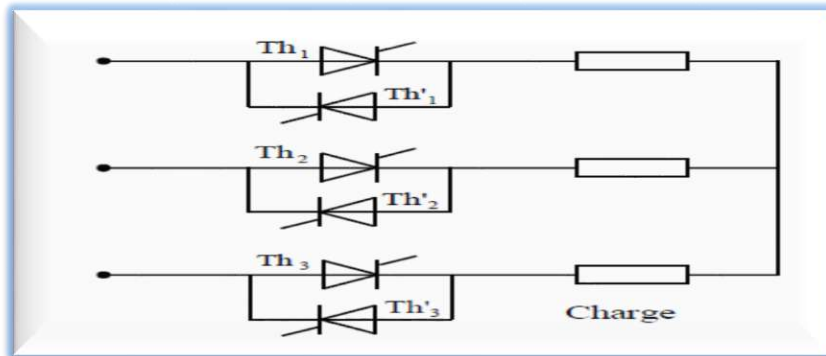


Figure I.40: Montage d'un gradateur triphasé – Charge résistive couplée en étoile [33]

Forme d'onde de la tension de charge de la première phase

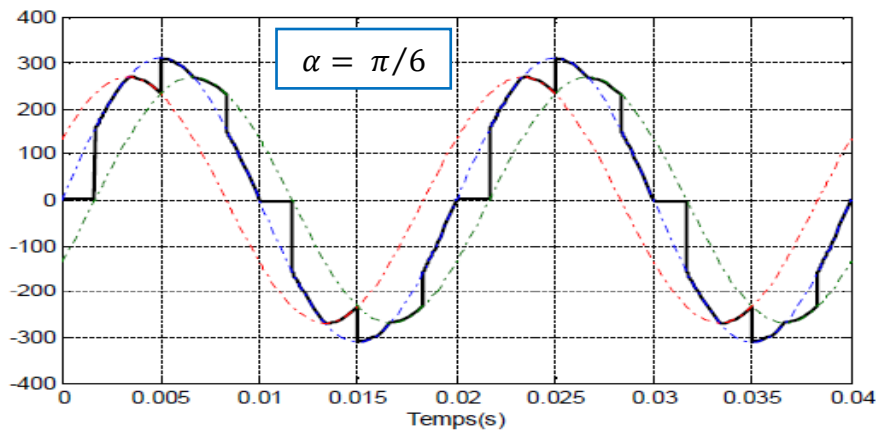


Figure I.44: Forme d'onde de la tension aux bornes de la charge – Charge résistive [33]

Expressions de la tension et du courant de la charge

$$U_{c\text{ efficace}} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \frac{\sin 2\alpha}{1}}$$

$$i_{c\text{ efficace}} = \frac{U_{c\text{ efficace}}}{R} = \frac{V_{max}}{R\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \frac{\sin 2\alpha}{1}}$$

I.4.4.4 Le cycloconvertisseur

Un cycloconvertisseur est un convertisseur de fréquence; il permet d'obtenir, à partir d'un réseau de fréquence donnée, une ou plusieurs tensions de fréquence plus petite, généralement inférieure à celle du réseau. Un cycloconvertisseur peut être construit à partir de deux ponts

triphasés montés en tête-bêche. Chaque pont fournira une alternance du courant de charge. Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure [27], [36].

I.4.5 Les hacheurs

I.4.5.1 Généralités

Un hacheur est un convertisseur statique de type continu-continu. Il permet d'alimenter une charge sous une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue constante. Il est caractérisé par un rapport cyclique (γ). Ce rapport est la fraction de période pendant lequel le semi-conducteur conduit [27], [37].

$$\gamma = \frac{\text{Durée de conduction de l'interrupteur}}{\text{periode de hachage}}$$

Selon le modèle, un hacheur peut être un :

- ✚ Convertisseur un quadrant (série, parallèle).
- ✚ Convertisseur deux quadrants (réversible en courant ou en tension).
- ✚ Convertisseur quatre quadrants (réversible en courant et en tension).

I.4.5.2 Les convertisseurs un quadrant

- ✚ **Hacheur série (abaisseur)**
- ✚ **Charge résistive**

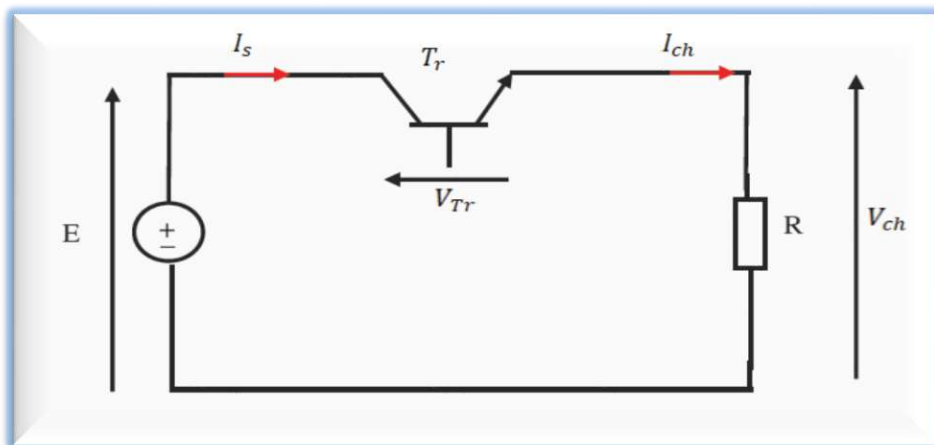


Figure I.45: Montage d'un hacheur série – Charge résistive [33]

Formes d'ondes des différentes grandeurs

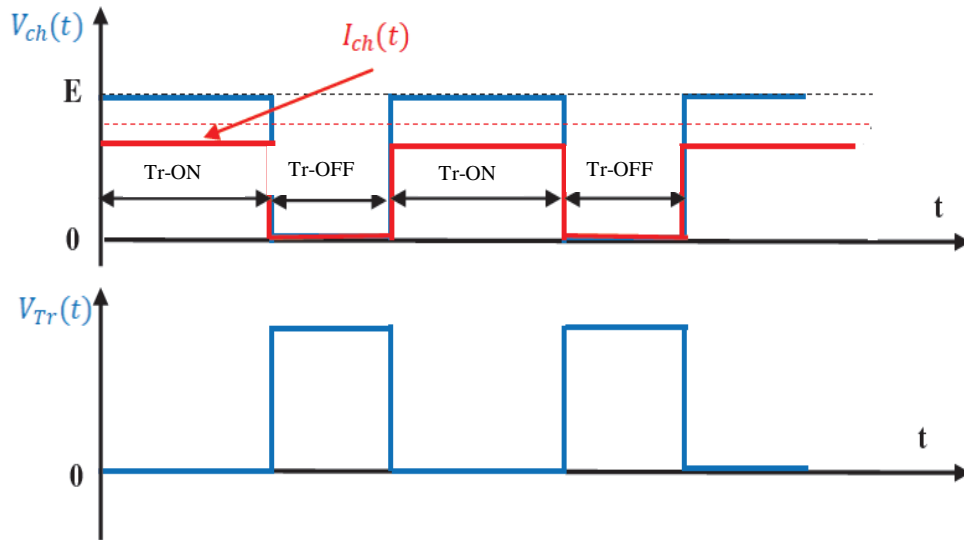


Figure I.46: Formes d'ondes des grandeurs de sortie et de la tension aux bornes du transistor correspondantes à un hacheur série – Charge résistive [33]

Expressions de la tension et du courant de la charge

$$V_{ch\ moyenne} = \gamma E$$

$$i_{ch\ moyen} = \frac{V_{ch\ moyenne}}{R} = \frac{\gamma E}{R}$$

✚ Charge résistive

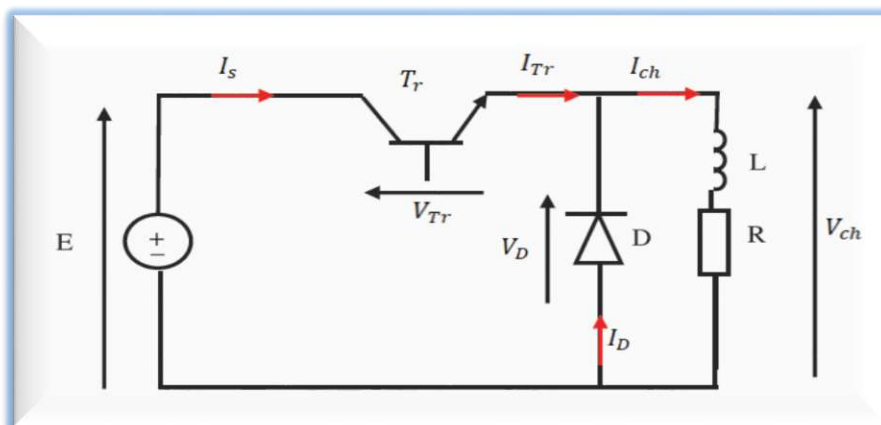


Figure I.47: Montage d'un hacheur série – Charge résistive-inductive [33]

Formes d'ondes des différentes grandeurs

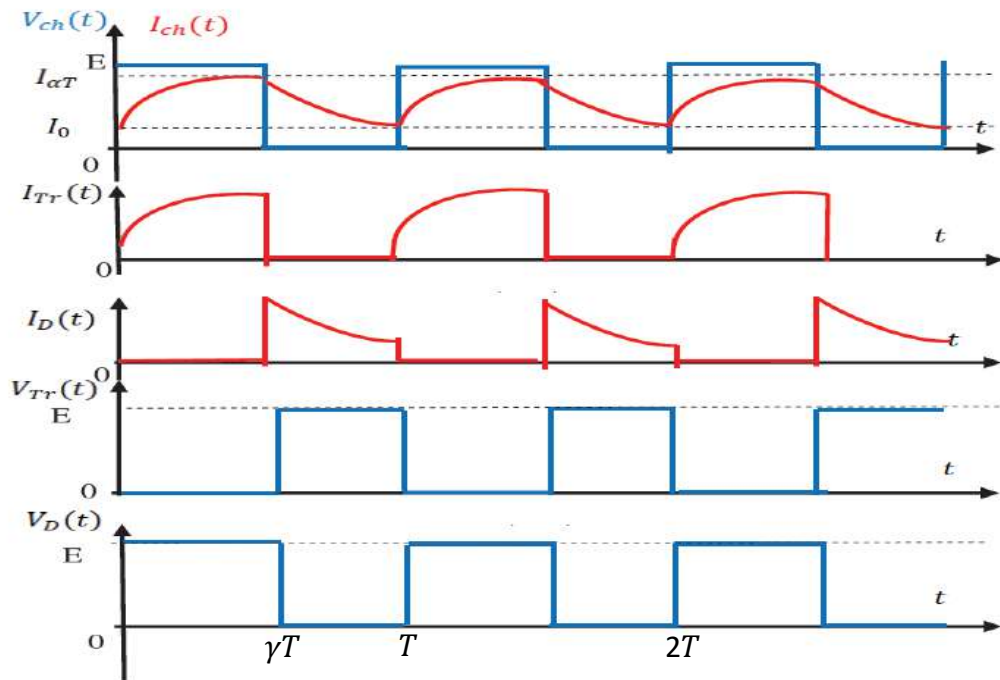


Figure I.48: Formes d'ondes des grandeurs (tensions, courants) relatives à un hacheur série – Charge résistive-inductive [33]

Expressions de la tension et du courant de la charge

$$V_{ch\ moyenne} = \gamma E$$

$$i_{ch\ moyen} = \frac{V_{ch\ moyenne}}{R} = \frac{\gamma E}{R}$$

⚡ Hacheur parallèle (élevateur)

⚡ Charge résistive

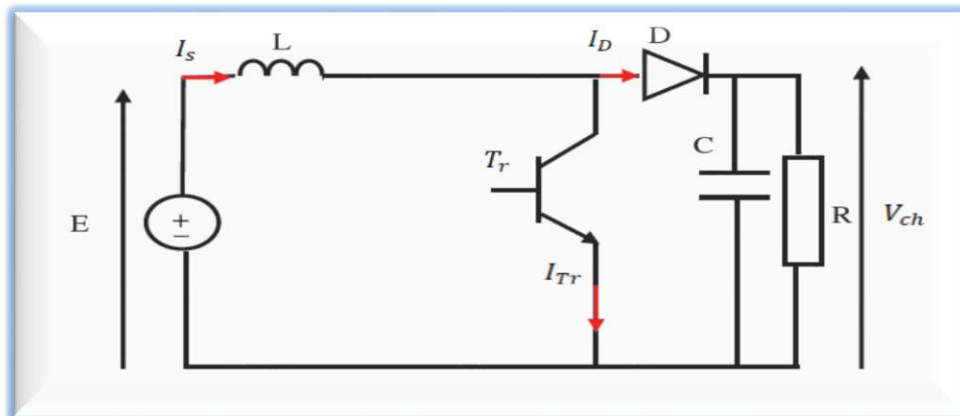


Figure I.49: Montage d'un hacheur parallèle – Charge résistive [33]

Formes d'ondes des différentes grandeurs

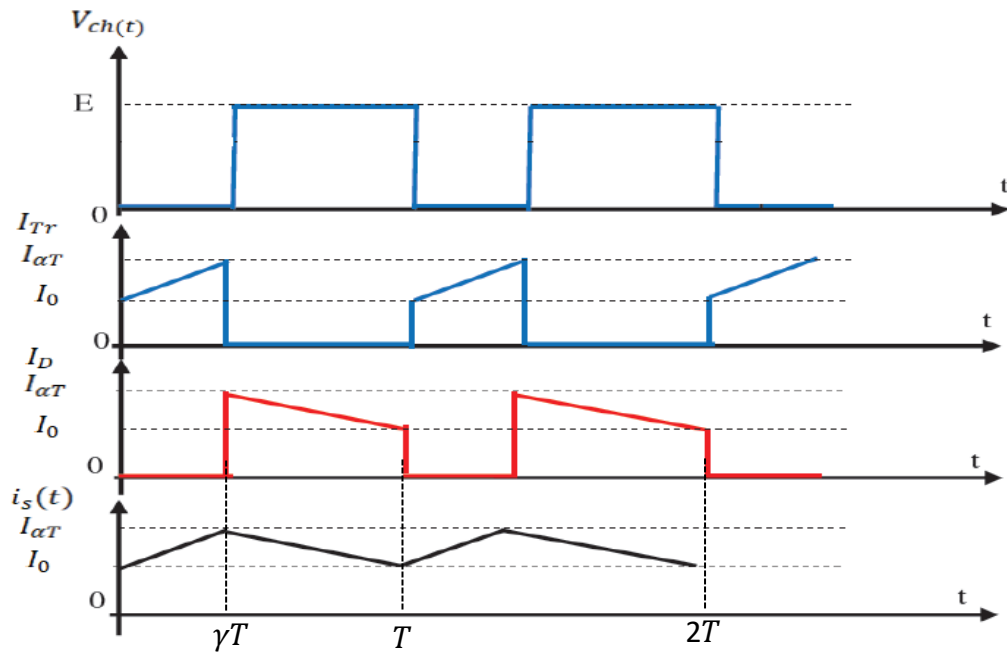


Figure I.50: Formes d'ondes des grandeurs (tension, courants) relatives à un hacheur parallèle – Charge résistive [33]

Expressions de la tension et du courant de la charge

$$V_{ch \text{ moyenne}} = (1 - \gamma) E$$

$$i_{ch \text{ moyen}} = \frac{V_{ch \text{ moyenne}}}{R} = \frac{(1 - \gamma) E}{R}$$

I.4.5.3 Les convertisseurs deux quadrants

- ✚ Hacheur réversible en courant
- ✚ Charge machine à courant continu

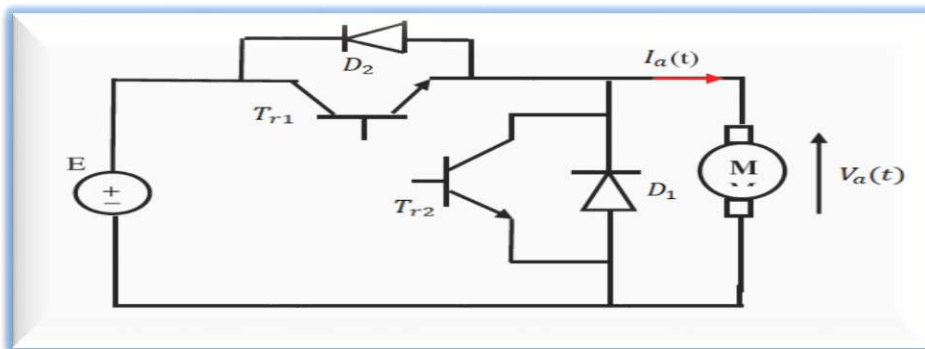


Figure I.51: Topologie d'un hacheur réversible en courant permettant d'alimenter l'induit d'une machine à courant continu [33].

Note :

- ✓ Pour éviter les anomalies dues à la conduction discontinue pour les faibles valeurs du courant, il faut adopter une commande complémentaire dont :

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 1$$

Avec : $Tr1$ est commandé à la fermeture durant l'intervalle 0 à $\gamma_1 T$.

$Tr2$ est commandé à la fermeture durant l'intervalle de temps : $\gamma_2 T$ à T .

- ✓ Les interrupteurs $Tr2$ et $D2$ ramène le courant de la génératrice vers la source, le hacheur fonctionne en survolteur (élévateur).

Formes d'ondes de la tension et du courant de la charge

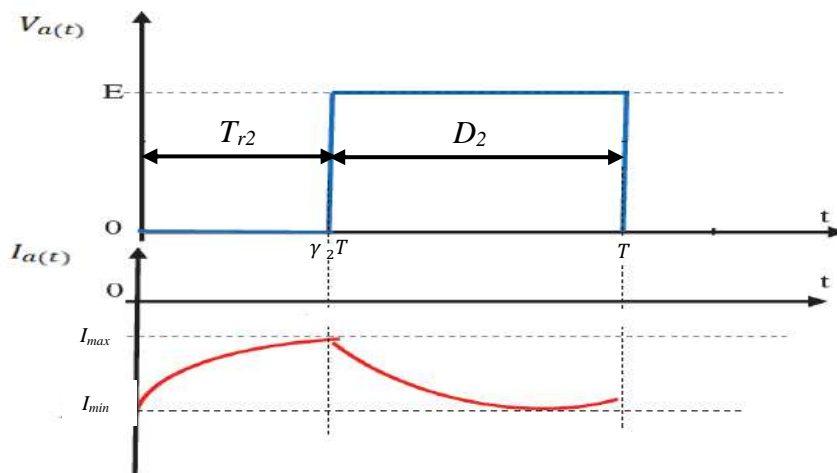


Figure I.52: Formes d'ondes des grandeurs de sortie correspondantes à un hacheur réversible en courant – Charge l'induit d'une machine à courant continu [33]

- ✚ **Hacheur réversible en tension**
- ✚ **Charge machine à courant continu**

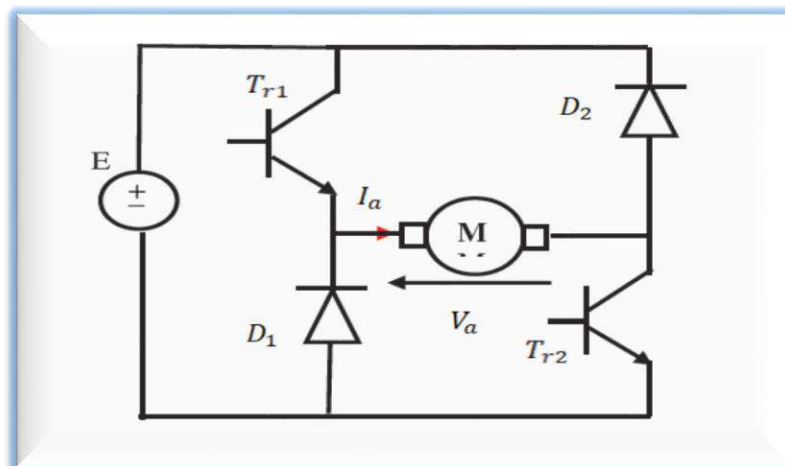


Figure I.53: Montage d'un hacheur réversible en tension – Charge l'induit d'une machine à courant continu [33]

Note :

Les interrupteurs T_{r1} et T_{r2} sont commandés simultanément avec le même rapport cyclique.

Formes d'ondes de la tension et du courant de la charge

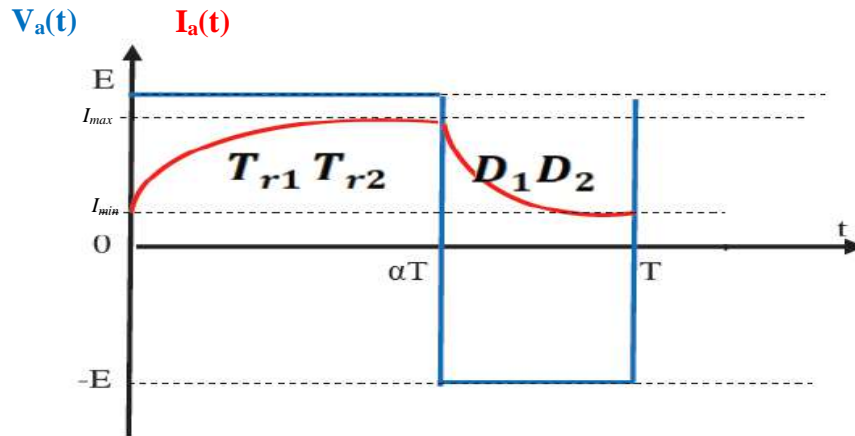


Figure I.54: Formes d'ondes des grandeurs de sortie correspondantes à un hacheur réversible en tension – Charge l'induit d'une machine à courant continu [33]

I.4.5.4 Les convertisseurs quatre quadrants

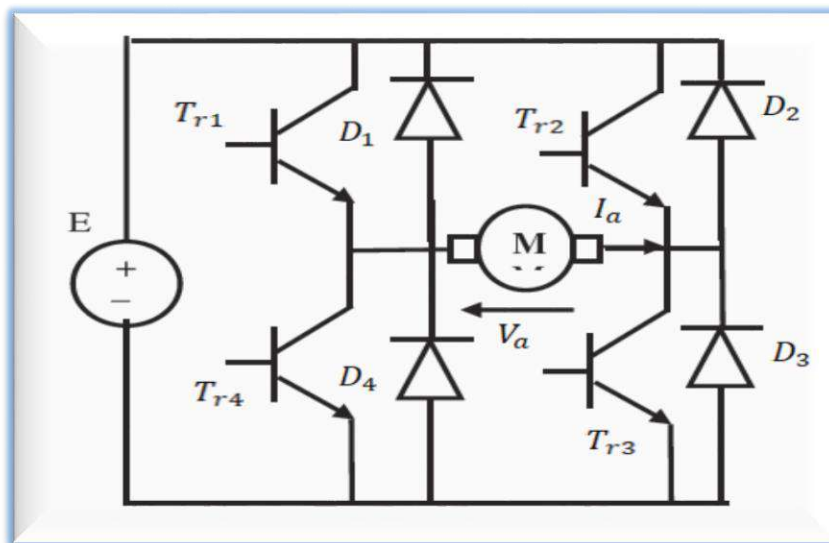


Figure I.55: Montage d'un hacheur réversible en courant et en tension – Charge l'induit d'une machine à courant continu [33]

Note :

- ✓ Les interrupteurs T_{r1} et T_{r3} sont commandés de 0 à γT .
- ✓ Les interrupteurs T_{r2} et T_{r4} sont commandés de γT à T .

Formes d'ondes de la tension et du courant de la charge

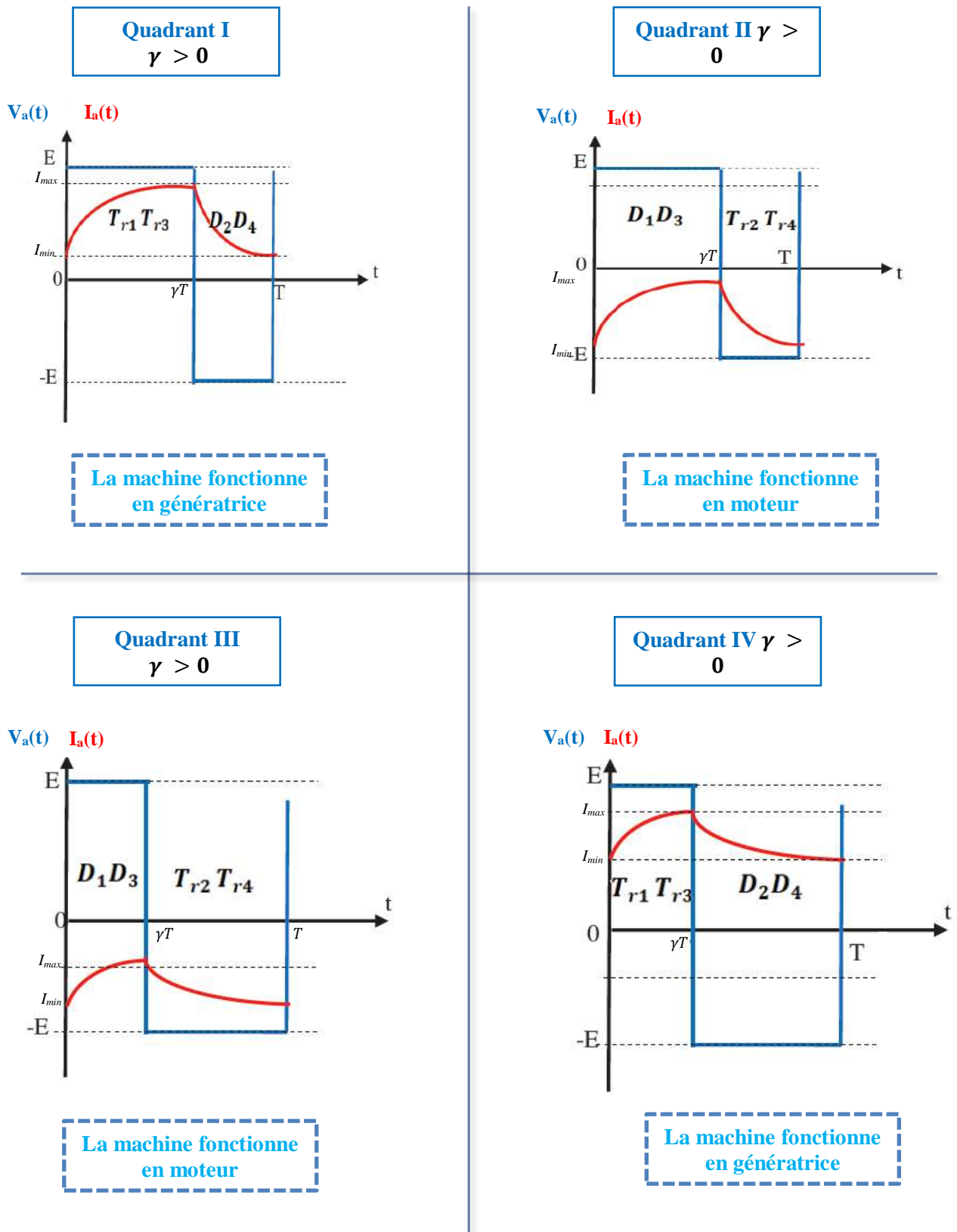


Figure I.56: Formes d'ondes des grandeurs de sortie correspondantes à un hacheur réversible en courant et en tension – Charge l'induit d'une machine à courant continu [33]

I.4.6 Les onduleurs

I.4.6.1 Généralités

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie [27], [38].

L'onduleur est dit autonome quand il impose sa propre fréquence à la charge [39].

- ✓ Si la source continue est une source de tension, l'onduleur est appelé onduleur de tension. Il impose la forme d'onde de la tension aux bornes de la charge, la forme d'onde du courant dépend de la charge [40].
- ✓ Si la source continue est une source de courant, l'onduleur est appelé onduleur de courant. Il impose la forme d'onde du courant (alternatif) qui traverse la charge. On parle de commutateur de courant. Par contre la forme d'onde de la tension aux bornes de la charge dépend de la nature de la charge [40].

I.4.6.2 L'onduleur de tension monophasé

✚ Onduleur de tension à deux interrupteurs (demi-pont)

✚ Charge résistive

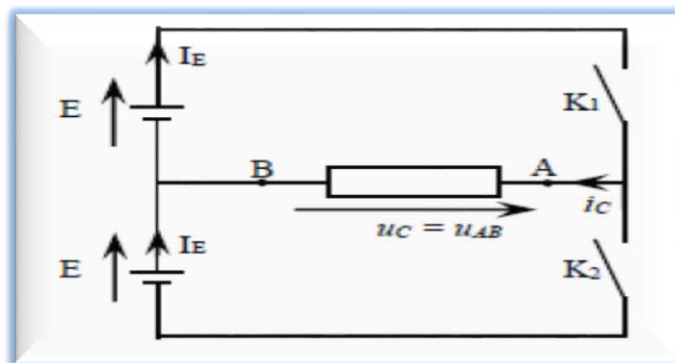


Figure I.57: Montage d'un onduleur de tension en demi-pont – Charge résistive [33]

Note :

Les interrupteurs K_1 et K_2 sont commandés alternativement de façon complémentaire sur une période.

Formes d'ondes de la tension et du courant de la charge

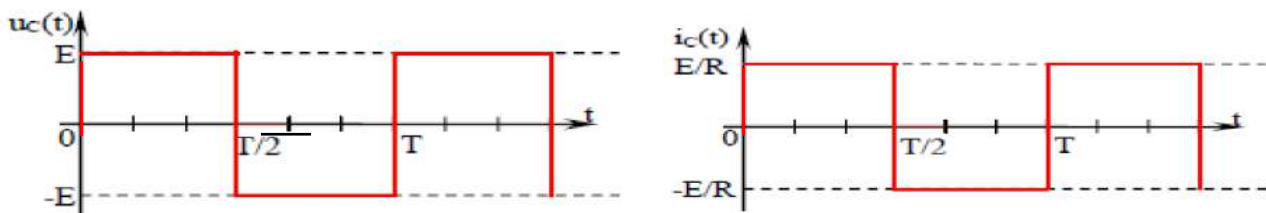


Figure I.48: Formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur de tension en demi-pont – Charge résistive [33]

Expressions de la tension et du courant de la charge

$$U_{c\text{ efficace}} = E$$

$$i_{c\text{ efficace}} = \frac{U_{c\text{ efficace}}}{R} = \frac{E}{R}$$

✚ Charge résistive-inductive

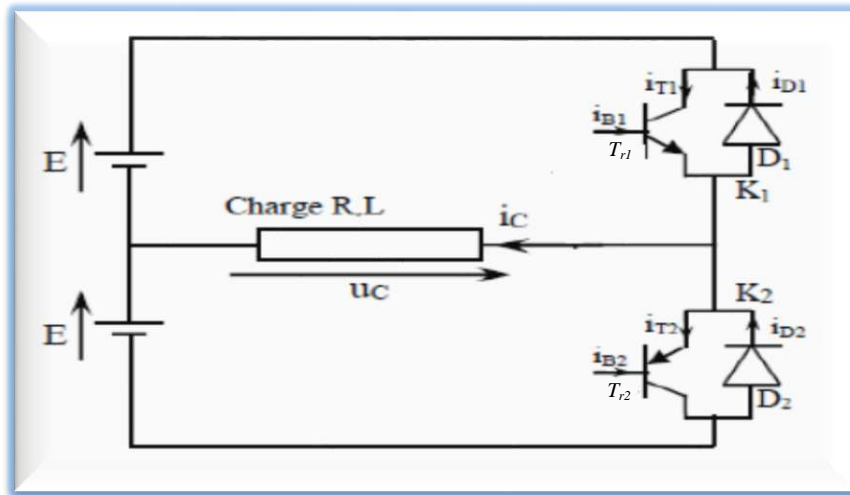


Figure I.59: Montage d'un onduleur de tension en demi-pont – Charge résistive-inductive [33]

Note :

Une diode est branchée en antiparallèle sur chaque interrupteur (transistor) pour permettre au courant dans la charge de circuler dans les deux sens.

Formes d'ondes des différentes grandeurs

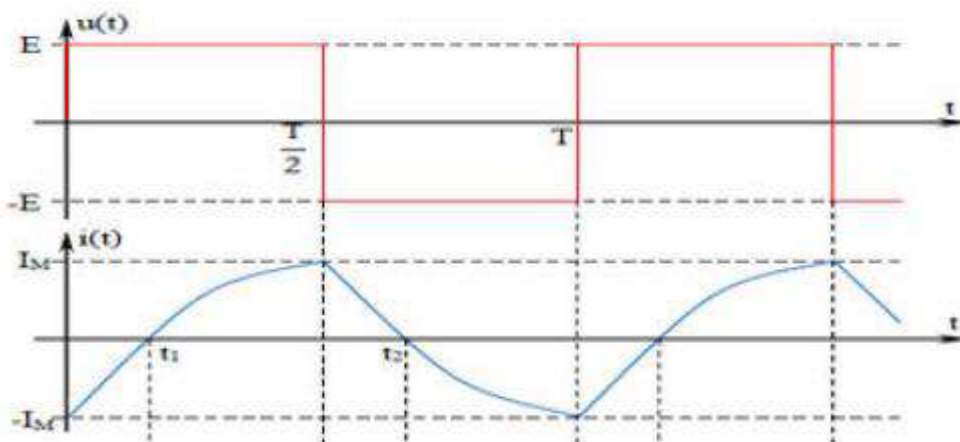


Figure I.60: Formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur de tension en demi-pont – Charge résistive-inductive [33]

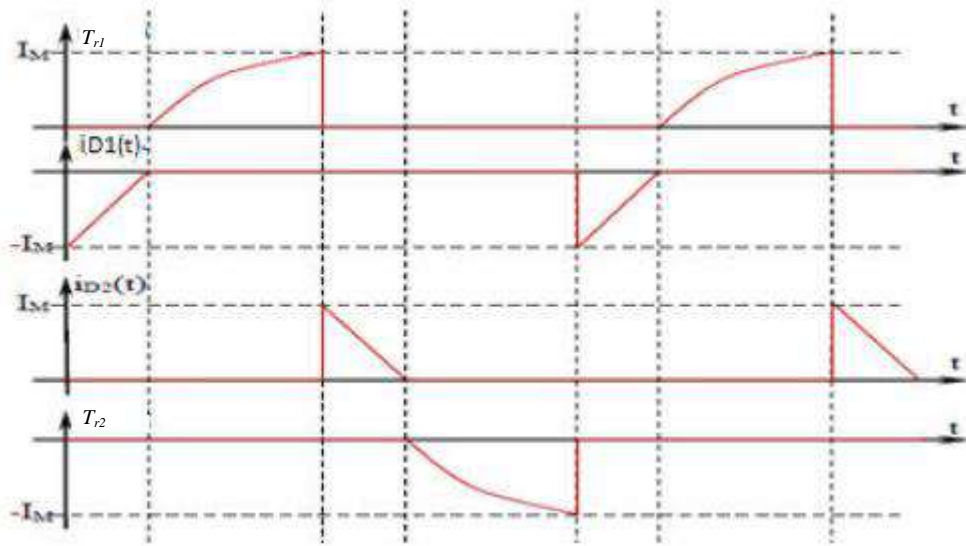


Figure I.61: Formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur de tension en demi-pont – Charge résistive-inductive (suite) [33]

Expressions de la tension et du courant de la charge

$$U_{c\ efficace} = E$$

$$i_{c\ efficace} = \frac{U_{c\ efficace}}{R} = \frac{E}{R}$$

✚ **Onduleur de tension à deux interrupteurs (pont)**

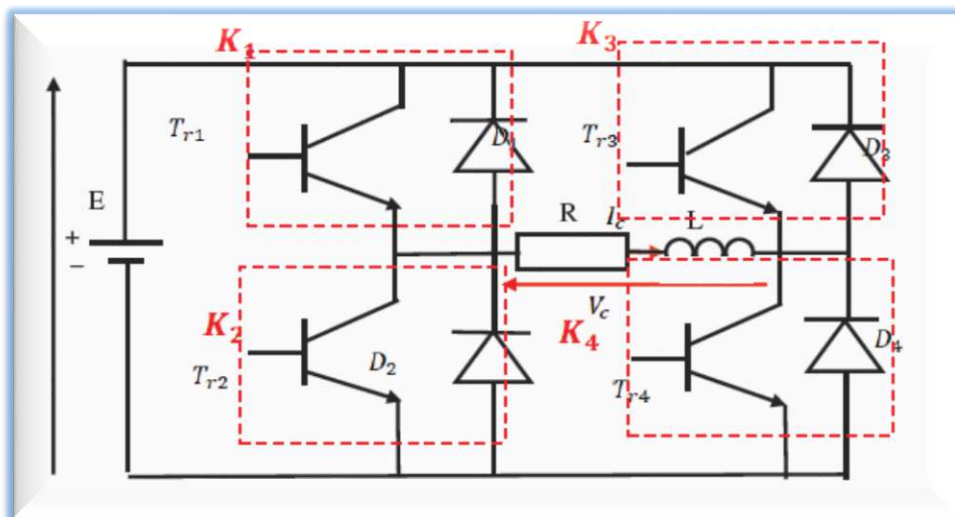


Figure I.62: Montage d'un onduleur de tension en pont – Charge résistive-inductive [33]

Formes d'ondes des différentes grandeurs

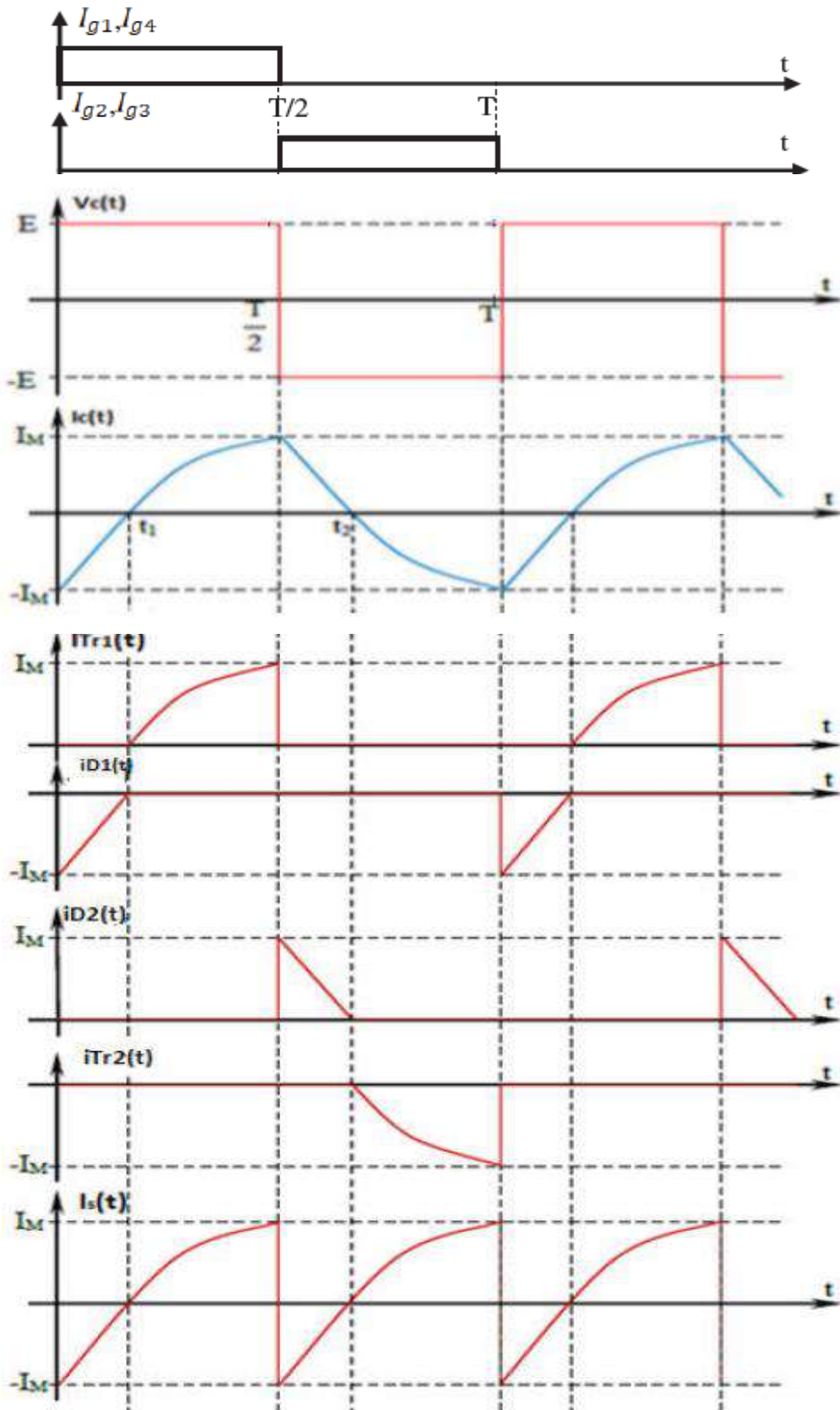


Figure I.63: Formes d'ondes des grandeurs (courants, tension) relatives d'un onduleur de tension en pont – Charge résistive-inductive [33]

Expressions de la tension et du courant de la charge

$$U_{c\text{ efficace}} = E$$

$$i_{c\text{ efficace}} = \frac{U_{c\text{ efficace}}}{R} = \frac{E}{R}$$

I.4.6.3 L'onduleur de tension triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en groupant trois onduleurs monophasé en demi-pont. Il suffit de décaler 120° (décalage entre les trois bras). Nous considérons une charge triphasée équilibrée, et pour simplifier l'étude nous supposons que le couplage est en étoile [40].

À tous instants deux interrupteurs sont en état de conduction et les quatre autres sont bloqués. Aussi, les interrupteurs d'un même bras doivent être commandés de façon complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source de tension [40].

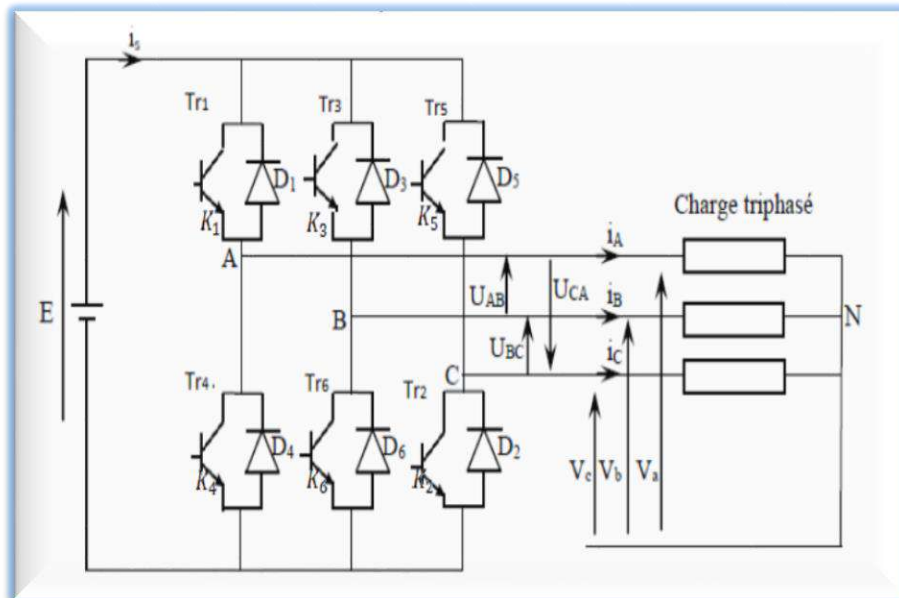


Figure I.64: Montage d'un onduleur de tension triphasé – Charge résistive-inductive [40]

Plusieurs types de commande sont possibles, les plus utilisées sont [40], [41]:

✚ La commande 120°

Les interrupteurs sont commandés pendant une durée correspondant à un tiers de période.

✚ La commande 180°

Les interrupteurs sont commandés durant une demi-période.

✚ La commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La technique de commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) est réalisée par comparaison d'une onde modulante (référence) à une onde porteuse de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante [40].

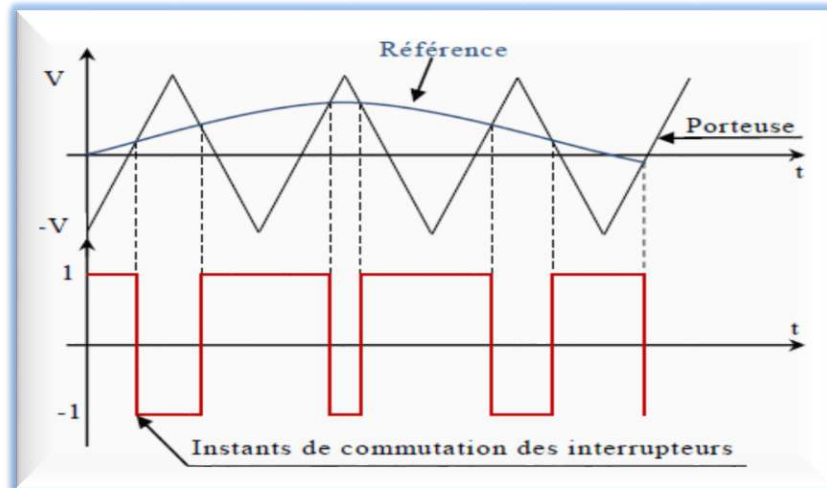


Figure I.65: Principe de la technique MLI [40]

Pour une charge équilibrée on a :

$$\begin{cases} i_A + i_B + i_C = 0 \\ V_A + V_B + V_C = 0 \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} U_{AB} = V_A - V_B \\ U_{BC} = V_B - V_C \\ U_{CA} = V_C - V_A \end{cases}$$

Finalement on obtient :

$$\begin{cases} V_A = \frac{1}{3}(U_{AB} - U_{CA}) \\ V_B = \frac{1}{3}(U_{BC} - U_{AB}) \\ V_C = \frac{1}{3}(U_{CA} - U_{BC}) \end{cases}$$

Formes d'ondes des différentes grandeurs

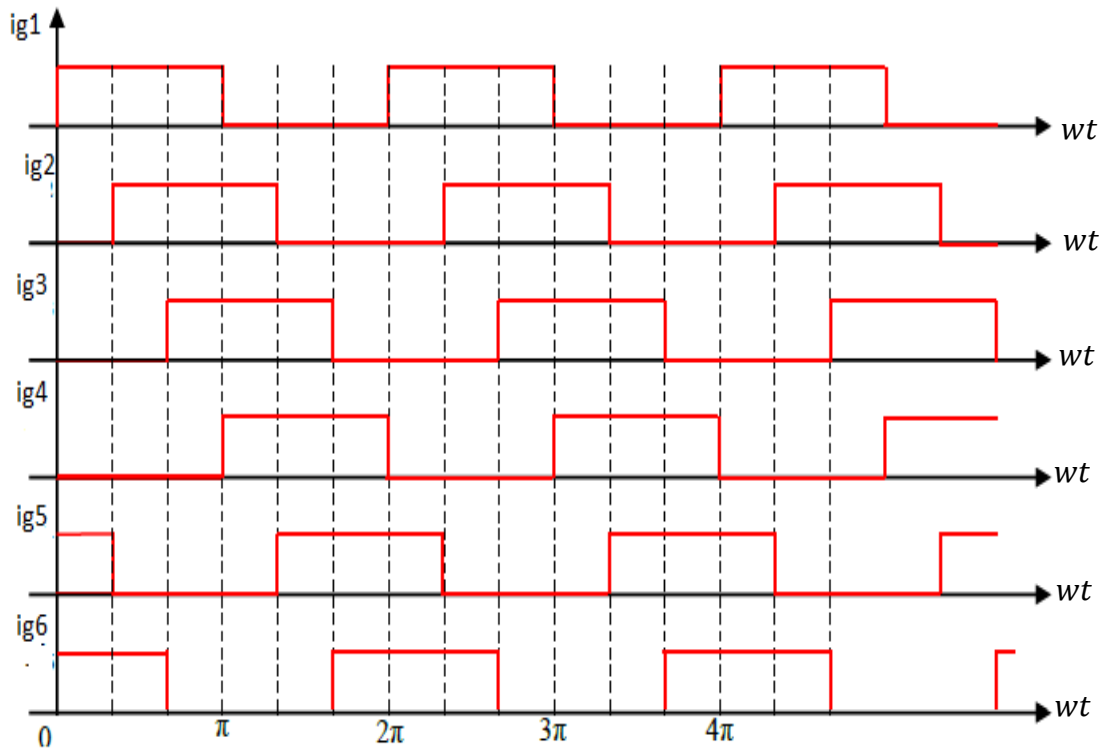


Figure I.66: Formes d'ondes des séquences de conduction des interrupteurs correspondantes à la technique de commande 180° [33], [40]

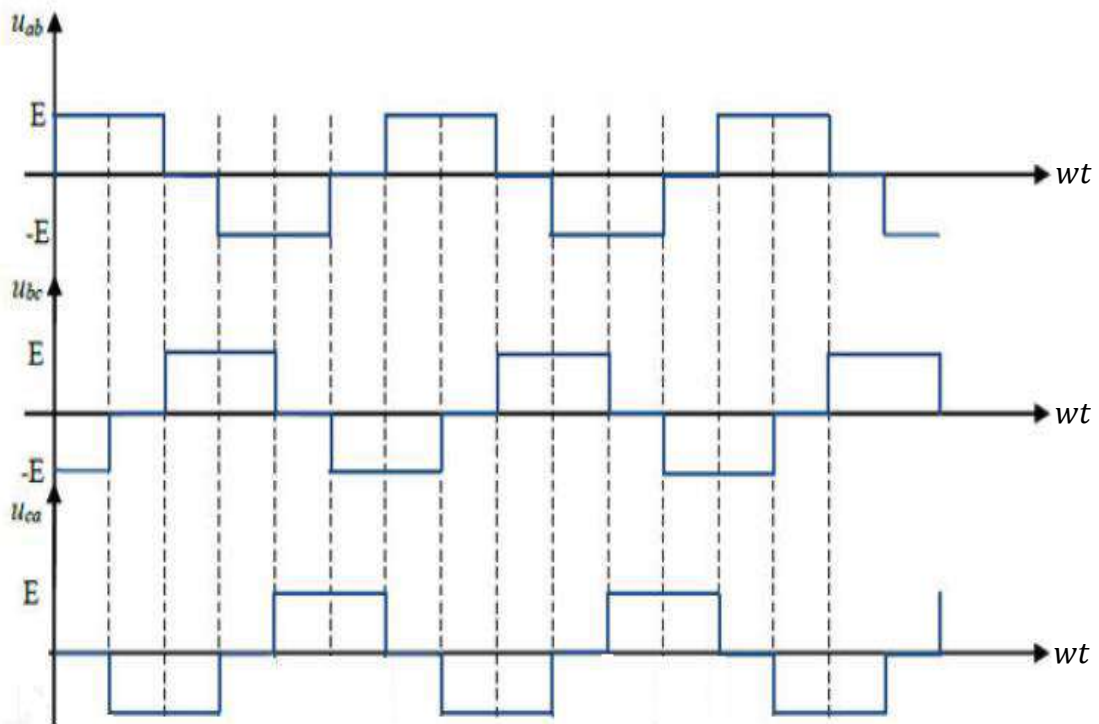


Figure I.67: Formes d'ondes des tensions composées correspondantes à la technique de commande 180° [33], [40]

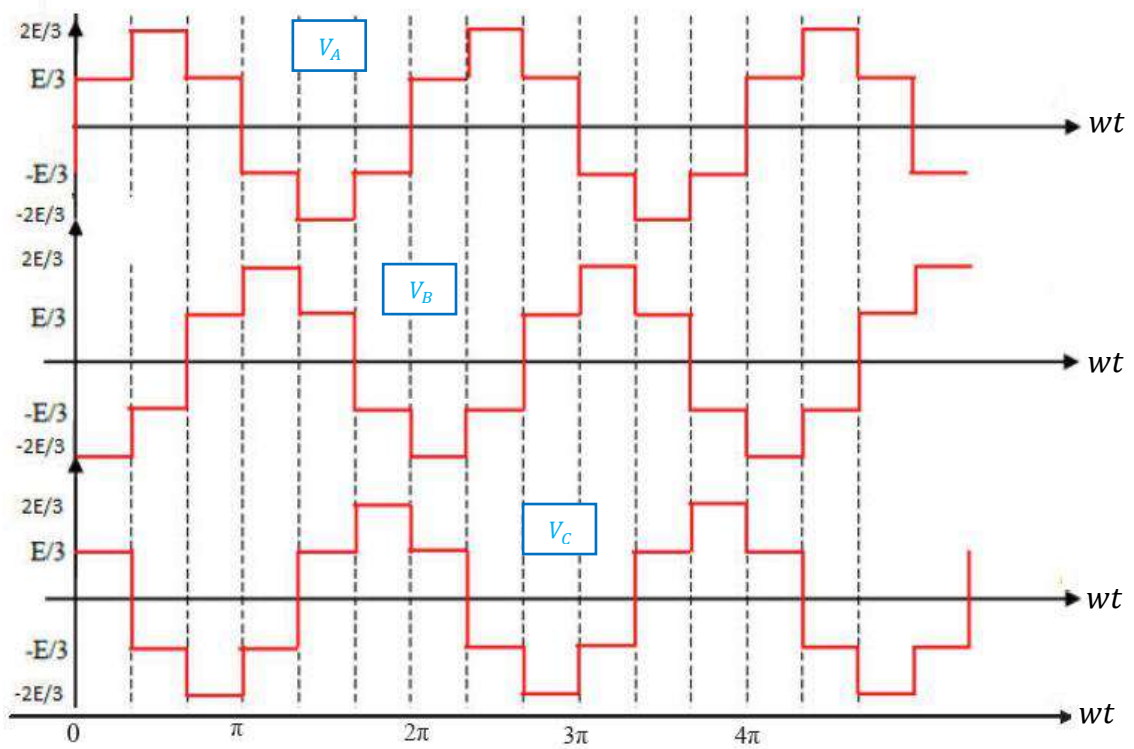


Figure I.67: Formes d'ondes des tensions simples correspondantes à la technique de commande 180° [33], [40]

Deuxième partie

Fiches de travaux dirigés

FICHE DE TD N°1

Grandeurs périodiques d'un signal et série de Fourier Puissances et rendement d'un système électrique

Objectifs

- + Familiariser les étudiants avec les calculs des grandeurs périodiques d'un signal.
- + Apprendre à étudier les fonctions périodiques par la série de Fourier.
- + Familiariser les étudiants avec les calculs des différentes puissances et du rendement.

Enoncés

Fiche de travaux dirigés N° 1

Grandeurs périodiques d'un signal et série de Fourier

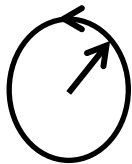
Puissances et rendement d'un système électrique

Exercice N°1

Déterminer la pulsation d'une onde sinusoïdale dont la fréquence est égale à 60Hz .

Exercice N°2

Déterminer la fréquence et période de l'onde sinusoïdale représenté sur la figure suivante.



$$W=500 \text{ rad/s}$$

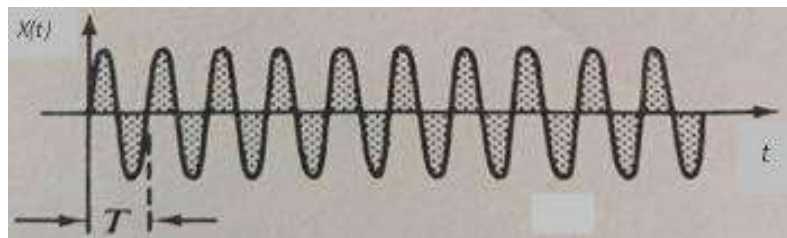
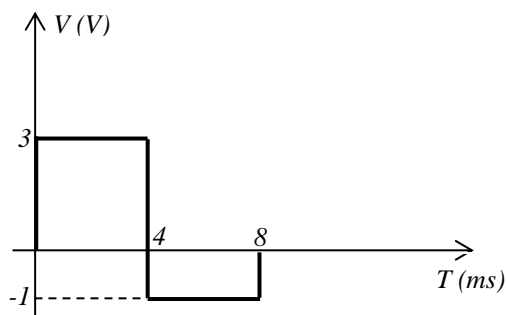


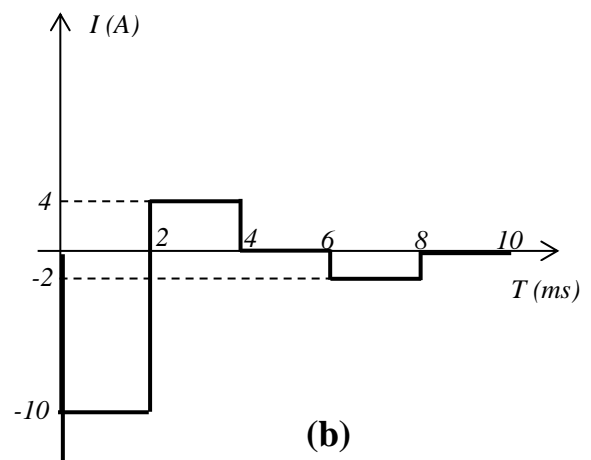
Figure 1.1.E

Exercice N°3

Calculer les valeurs moyennes et les valeurs efficaces sur un cycle complet des formes d'ondes ci-dessous.



(a)



(b)

Figure 1.2.E

Exercice N°4

Voir la forme périodique de la figure ci-après.

- Déterminer la période.
- Combien de cycles sont illustrés ?
- Quelle est la fréquence ?
- Quelle est l'amplitude ?

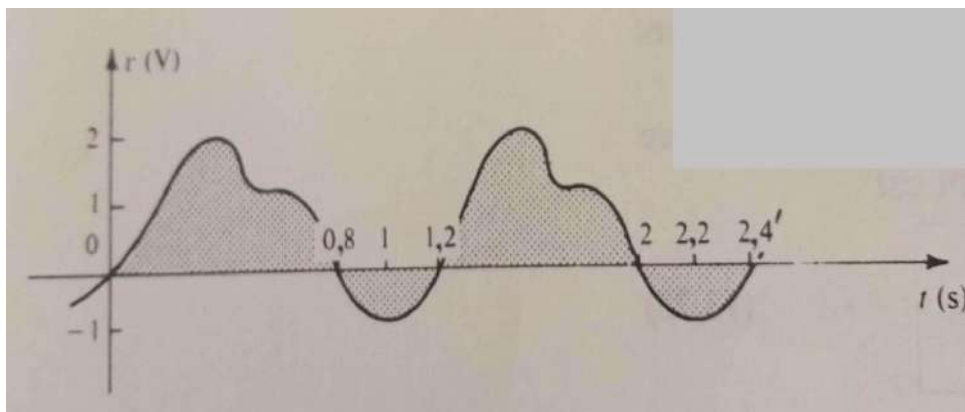


Figure 1.3.E

Exercice N°5

Soit le signal suivant :

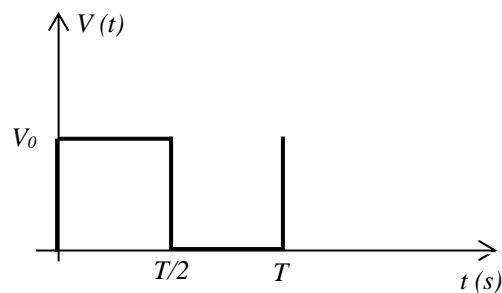


Figure 1.4.E

- Déduire la fonction $v(t)$.
- Décomposer le signal $v(t)$ en série de Fourier.

Exercice N°6

Quelle est la puissance dissipée dans une charge purement résistive dont la résistance est égale à 5Ω et traversé par un courant de $4 A$?

Exercice N°7

Dans le circuit représenté sur la figure ci-après, déterminer les puissances moyennes consommées par chaque résistance, ainsi que la puissance délivrée par la source de tension. Vérifier le principe de la conservation de puissance à partir de ces résultats

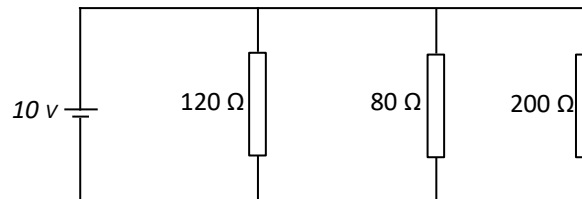


Figure 1.5.E

Exercice N°8

Soit le montage suivant.

- Calculer la puissance moyenne, la puissance apparente, la puissance réactive et le facteur de puissance de chacune des branches.
- Calculer le nombre total de watts, de vars et de voltampères ainsi que le facteur de puissance du circuit.

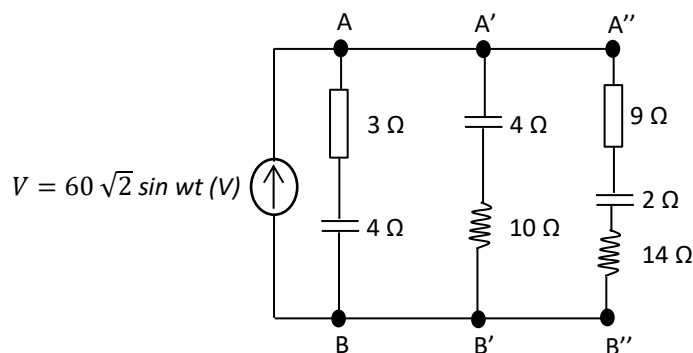


Figure 1.6.E

Exercice N°9

Le rendement d'un moteur de 2 hp est 75 %.

- Quelle est l'énergie fournie en entrée au moteur, en watts ?
- Quelle est la tension d'entrée, sachant que l'intensité du courant d'entrée est 9,05 A ?

Solutions

Fiche de travaux dirigés N° 1

Grandeurs périodiques d'un signal et série de Fourier

Puissances et rendement d'un système électrique

Exercice N°1

La pulsation d'une onde sinusoïdale est calculée par la formule suivante.

$$w = 2 \pi f$$

AN :

$$w = 2 \pi 60 = 377 \text{ rad/s}$$

$$w = 377 \text{ rad/s}$$

Exercice N°2

La fréquence

On a :

$$w = 2 \pi f \Rightarrow f = w/2\pi$$

AN :

$$f = 500/2\pi = 79,62 \text{ Hz}$$

$$f = 79,62 \text{ Hz}$$

La période

La formule qui permet le calcul de la période est :

$$T = 1/f$$

AN :

$$T = 1/79,62 = 0.01255 \text{ s}$$

$$T = 12,55 \text{ ms}$$

Exercice N°3

✚ Valeurs moyennes

✚ Figure 1.2.E.a

$$V_{moyenne} = \frac{1}{T} \left[\int_0^4 3 dt + \int_4^8 (-1) dt \right]$$

Avec : $T = 8 \text{ ms}$

AN :

$$V_{moyenne} = \frac{1}{8} [3(4 - 0) + (-1)(8 - 4)] = 1 \text{ V}$$

$$V_{moyenne} = 1 \text{ V}$$

✚ Figure 1.2.E.b

$$I_{moyen} = \frac{1}{T} \left[\int_0^2 (-10) dt + \int_2^4 4 dt + \int_6^8 (-2) dt \right]$$

Avec : $T = 10 \text{ ms}$

AN :

$$I_{moyen} = \frac{1}{10} [(-10)(2 - 0) + (4)(4 - 2) + (-2)(8 - 6)] = 1,6 \text{ V}$$

$$I_{moyen} = -1,6 \text{ A}$$

✚ Valeurs efficaces

✚ Figure 1.2.E.a

$$V_{efficace} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^4 (3)^2 dt + \int_4^8 (-1)^2 dt \right]}$$

Avec : $T = 10 \text{ ms}$

AN :

$$V_{efficace} = \sqrt{\left[\frac{1}{8} [9 (4 - 0) + (1) (8 - 4)] \right]} = 2,33V$$

$$V_{efficace} = 2,33 V$$

✚ Figure 1.2.E.b

$$I_{efficace} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^2 (-10)^2 dt + \int_2^4 4^2 dt + \int_6^8 (-2)^2 dt \right]}$$

Avec : $T=10 ms$

AN :

$$I_{efficace} = \sqrt{\frac{1}{10} [(100)(2 - 0) + (16)(4 - 2) + (4) (8 - 6)]}$$

$$I_{efficace} = 4,9 A$$

Exercice N°4

a) D'après la figure 2.3 la période du signal est égale à 1.2 s:

$$T = 1,2 s$$

b) D'après la figure 2.3 **deux cycles** sont illustrés.

c) La fréquence du signal

$$f = 1/T$$

AN :

$$f = 1/1,2 = 0.833 Hz$$

$$f = 0.833 Hz$$

d) Amplitude

Valeur maximale :

$$V_{max} = 2 V$$

Valeur minimale :

$$V_{min} = -1 V$$

Exercice N°5

a) La fonction $v(t)$ est égale à :

✚ t compris entre 0 et T/2

$$V(t) = V_0$$

✚ t compris entre T/2 et T

$$V(t) = 0$$

b) La décomposition du signal en série de Fourier.

On a :

$$V_t = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n t}{T}$$

Avec : n est le rang d'harmonique

✚ Calcul du terme a_0

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_0 dt$$

$$a_0 = \frac{1}{T} V_0 \left[\frac{T}{2} - 0 \right] = \frac{V_0}{2}$$

$$a_0 = \frac{V_0}{2}$$

✚ Calcul du terme a_n

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_0 \cos \frac{2\pi n t}{T} dt$$

$$a_n = \frac{2 V_0}{T} \int_0^{T/2} \cos \frac{2\pi n t}{T} dt$$

$$a_n = \frac{2 V_0}{T} \left[\frac{T}{2\pi n} \sin 2\pi n \frac{t}{T} \right]_0^{T/2} = \frac{V_0}{\pi n} \sin(\pi n)$$

$$a_n = \frac{V_0}{\pi n} \sin(\pi n)$$

✚ Calcul du terme b_n

La fonction $V(t)$ est une fonction **paire** donc le

$$b_n = 0$$

Exercice N°6

La puissance dissipée dans une charge résistance est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$P = R I^2$$

AN :

$$P = 5 (4)^2 = 80 W$$

$$P = 80 W$$

Exercice N°7

Soit les puissances P_1 , P_2 et P_3 dissipées respectivement dans chacune des trois résistances 120Ω , 80Ω et 200Ω .

➤ **Puissances moyennes consommées par chaque résistance**

La même tension E étant appliquée aux bornes de chaque résistance.

Donc on a :

$$P_1 = \frac{E^2}{R_1}$$

AN :

$$P_1 = \frac{10^2}{120} = 0,83 \text{ W}$$

$$P_1 = 0,83 \text{ W}$$

$$P_2 = \frac{E^2}{R_2}$$

AN :

$$P_2 = \frac{10^2}{80} = 1,25 \text{ W}$$

$$P_2 = 1,25 \text{ W}$$

$$P_3 = \frac{E^2}{R_3}$$

AN :

$$P_3 = \frac{10^2}{200} = 0,5 \text{ W}$$

$$P_3 = 0,5 \text{ W}$$

➤ **Puissance totale fournie par le générateur**

Le générateur débite dans une résistance équivalente telle que :

$$\frac{1}{R_{\text{équivalente}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

AN :

$$\frac{1}{R_{\text{équivalente}}} = \frac{1}{120} + \frac{1}{80} + \frac{1}{200} \Rightarrow R_{\text{equi}} = 38,71 \Omega$$

$$R_{\text{équivalente}} = 38,71 \Omega$$

La Puissance fournie par le générateur vaut donc :

$$P_{\text{générateur}} = \frac{E^2}{R_{\text{équivalente}}}$$

AN :

$$P_{\text{générateur}} = \frac{10^2}{38,71} = 2,58 W$$

$$P_{\text{générateur}} = 2,58 W$$

➤ **Vérification du principe de conservation de puissance**

Pour vérifier le principe de conservation de puissance il faut montrer que :

$$P_{\text{générateur}} = P_1 + P_2 + P_3$$

AN :

$$P_1 + P_2 + P_3 = 120 + 80 + 200 = 2,58 w$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 2,58 w$$

Donc le principe est vérifié.

Exercice N°8

a) Calcul des puissances et le facteur de puissance

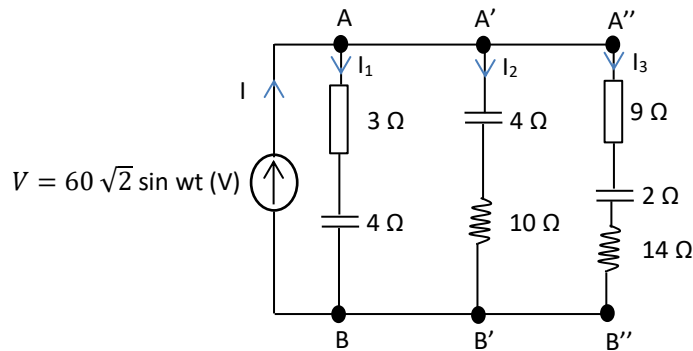


Figure 1.1.S

Dans la branche AB, on a :

$$I_1 = \frac{E}{Z_{AB}}$$

AN :

$$I_1 = \frac{60\angle 0^\circ}{3 - j4} = \frac{60\angle 0^\circ}{5\angle 53^\circ} = 12\angle 53^\circ$$

$$I_1 = 12\angle 53^\circ$$

+ Puissance active

$$P = I_1^2 R$$

AN :

$$P = 12^2 \times 3 = 432 \text{ W}$$

$$P = 432 \text{ W}$$

+ Puissance réactive

$$Q = I_1^2 X_c$$

AN :

$$Q = 12^2 \times 4 = 576 \text{ VAR}$$

$$Q = 576 \text{ VAR}$$

Puissance apparente

$$S = V \times I_1$$

AN :

$$S = 60 \times 12 = 720 \text{ VA}$$

$$S = 720 \text{ VA}$$

Facteur de puissance

$$FP = \frac{P}{S}$$

AN :

$$FP = \frac{432}{576} = 0,6$$

$$FP = 0,6 \text{ (capacitif)}$$

Dans la branche A'B', on a :

$$I_2 = \frac{E}{Z_{A'B'}}$$

AN :

$$I_2 = \frac{60 \angle 0^\circ}{j10 - j4} = \frac{60 \angle 0^\circ}{6 \angle 90^\circ} = 10 \angle -90^\circ$$

$$I_2 = 10 \angle -90^\circ$$

Puissance active

$$P = I_2^2 R$$

AN :

$$P = 10^2 \times 0 = 0 \text{ W}$$

$$P = 0 \text{ W}$$

+ Puissance réactive

$$Q = I_2^2 (X_L - X_C)$$

AN :

$$Q = 10^2 \times (10 - 4) = 600 \text{ VAR}$$

$$Q = 600 \text{ VAR}$$

+ Puissance apparente

$$S = V \times I_2$$

AN :

$$S = 60 \times 10 = 600 \text{ VA}$$

$$S = 600 \text{ VA}$$

+ Facteur de puissance

$$FP = \frac{P}{S}$$

AN :

$$FP = \frac{0}{600} = 0$$

$$FP = 0$$

En ce qui concerne la branche A''B'', on a :

$$I_3 = \frac{E}{Z_{A''B''}}$$

AN :

$$I_3 = \frac{60\angle 0^\circ}{9 + j14 - j2} = \frac{60\angle 0^\circ}{15\angle 53^\circ} = 4\angle -53^\circ$$

$$I_3 = 4\angle -53^\circ$$

✚ Puissance active

$$P = I_3^2 R$$

AN :

$$P = 4^2 \times 9 = 144 \text{ W}$$

$$P = 144 \text{ W}$$

✚ Puissance réactive

$$Q = I_3^2 (X_L - X_C)$$

AN :

$$Q = 4^2 \times (14 - 2) = 192 \text{ VAR}$$

$$Q = 192 \text{ VAR}$$

✚ Puissance apparente

$$S = V \times I_3$$

AN :

$$S = 60 \times 4 = 240 \text{ VA}$$

$$S = 240 \text{ VA}$$

✚ Facteur de puissance

$$FP = \frac{P}{S}$$

AN :

$$FP = \frac{144}{240} = 0,6$$

$$FP = 0,6 \text{ (inductif)}$$

b) Calcul du nombre total de watts, de vars et de voltampères ainsi que le facteur de puissance du circuit

+ Puissance active totale

$$P_{totale} = P_{AB} + P_{A'B'} + P_{A''B''}$$

AN :

$$P_{totale} = 432 + 144 = 576 \text{ W}$$

$$P_{totale} = 576 \text{ W}$$

+ Puissance réactive totale

$$Q_{totale} = Q_{AB} + Q_{A'B'} + Q_{A''B''}$$

AN :

$$P_{totale} = -576 + 600 + 193 = 217 \text{ VAR}$$

$$P_{totale} = 217 \text{ VAR}$$

+ Puissance apparente totale

$$S_{totale} = \sqrt{P_{totale}^2 + Q_{totale}^2}$$

AN :

$$S_{totale} = \sqrt{576^2 + 217^2} = 615,52 \text{ VA}$$

$$S_{totale} = 615,52 \text{ VA}$$

 Facteur de puissance du circuit

$$FP = \frac{P_{totale}}{S_{totale}}$$

AN :

$$FP = \frac{576}{615,52} = 0,9358$$

$$FP = 0,9358 \text{ (inductif)}$$

Exercice N°9

a) Calcul de puissance d'entrée

Le rendement du moteur est donné par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_S}{P_E}$$

Donc la puissance d'entrée elle est égale à :

$$P_E = \frac{P_S}{\eta}$$

AN :

$$P_E = \frac{2 \times 746}{0,75} = 1990 \text{ W}$$

$$P_E = 1990 \text{ W}$$

b) Calcul de la tension d'entrée

Le calcul de la tension d'entrée se fait à partir de la formule de la puissance d'entrée.

$$P_E = V I \Rightarrow V = \frac{P_E}{I} = \frac{1990}{9,05} = 220 \text{ V}$$

$$I = 220 \text{ V}$$

FICHE DE TD N°2

Les composants d'électronique de puissance

Objectifs

- + Familiariser les étudiants avec les composants utilisés dans les convertisseurs statiques.
- + Connaître les caractéristiques, le principe de fonctionnement et le mode de commande des différents semi-conducteurs de puissance.

Enoncés

Fiche de travaux dirigés N° 2

Composants électronique de puissance

Exercice N°1

Dans les quatre circuits représentés sur la figure suivante, déterminer l'état (passant ou bloqué) de la diode. Le cas échéant, déterminer le courant qui la traverse.

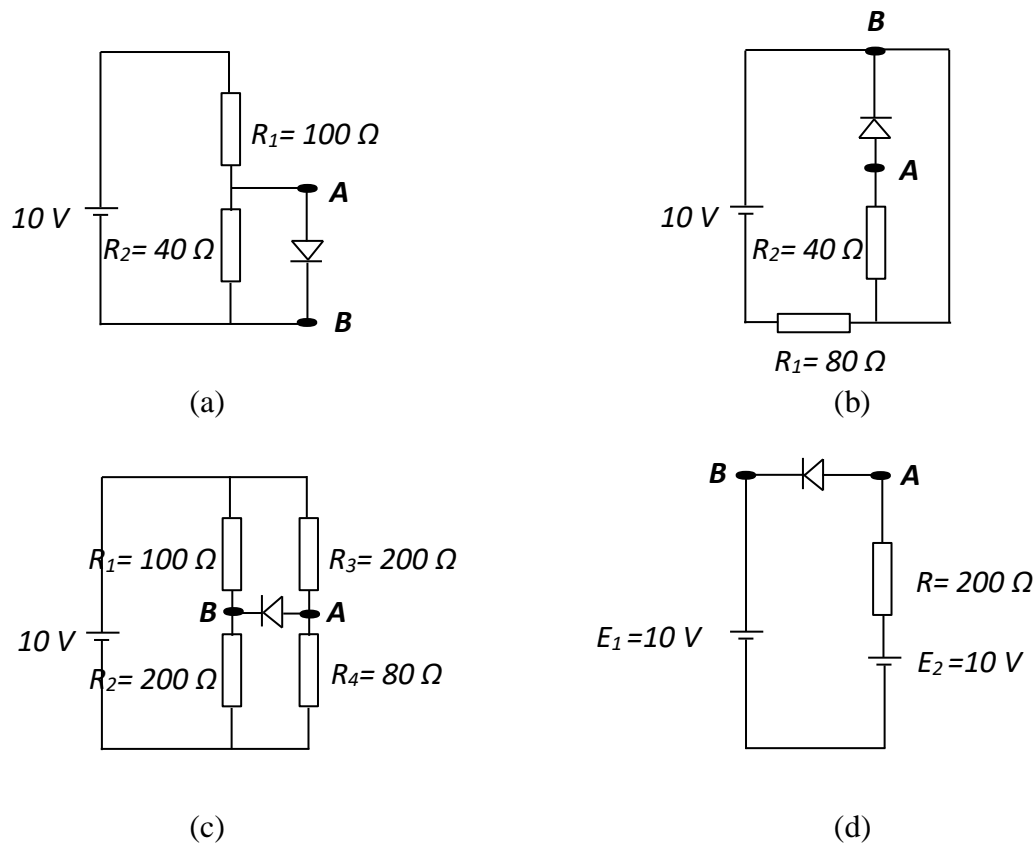


Figure 2.1.E

Exercice N°2

Soit une diode D_1 qui débite sur une inductance (L) avec une diode D_2 branchée en antiparallèle a ses bornes (voir la figure ci-après). Les diodes sont supposées parfaites.

On alimente successivement entre les points A et B par :

- Une tension continue constante E (le point A est relié avec le pôle + du générateur).
- La même tension continue interrompue, puis rétablie pendant des intervalles de temps égaux.
- Une tension sinusoïdale $U(wt) = U_m \sin(wt)$ (Volt).

- ✚ Quelle est l'allure de la forme d'onde du courant qui traverse la bobine dans chacun des trois cas ?

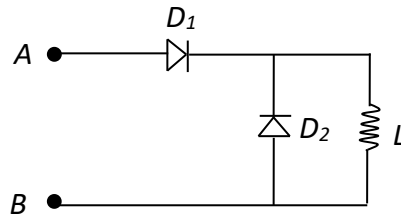


Figure 2.2.E

Exercice N°3

Soit le montage suivant :

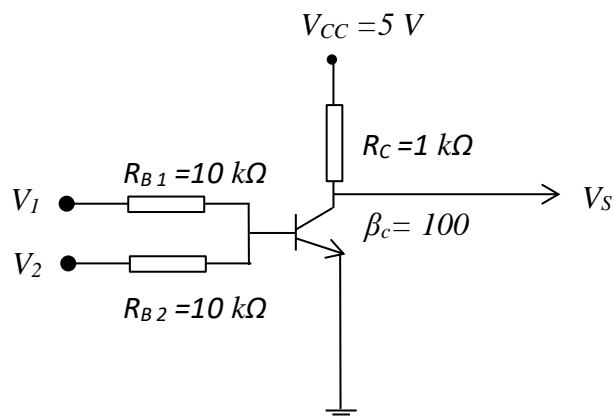


Figure 2.3.E

Chacune des deux tensions V_1 et V_2 peut prendre les valeurs 0 ou 5V.

- a) Déterminer la valeur de la tension V_S dans le cas où l'on a :
- 1) $V_1 = V_2 = 0$ V.
 - 2) $V_1 = 5$ V et $V_2 = 0$ V.
 - 3) $V_1 = V_2 = 5$ V.
- b) Conclure sur la fonction réalisée par ce montage.

Exercice N°4

Le schéma de la figure suivante représente un inverseur MOS : le transistor T_1 est un MOSFET canal P, le transistor T_2 , est un MOSFET canal N. Ces deux transistors fonctionnent en commutation.

- a) Déterminer la valeur de la tension de sortie V_S lorsque :
- 1) $V_e = 0\text{ V}$.
 - 2) $V_e = V_{CC}$.
- b) De quel montage s'agit-il ?

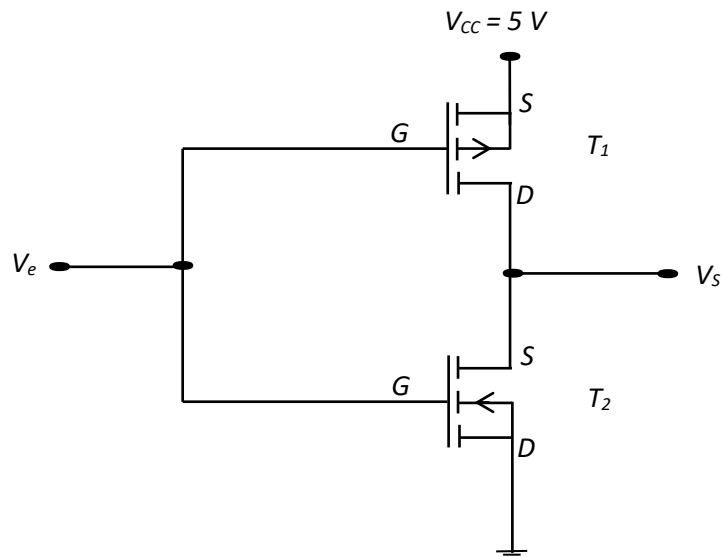


Figure 2.4.E

Exercice N°5

On considère un transistor à effet de champs à jonction canal N et son réseau de caractéristiques présenté sur la figure 2.5.E. Ce transistor est polarisé par une résistance de drain (figure 2.6.E). Calculer le courant qui traverse le drain.

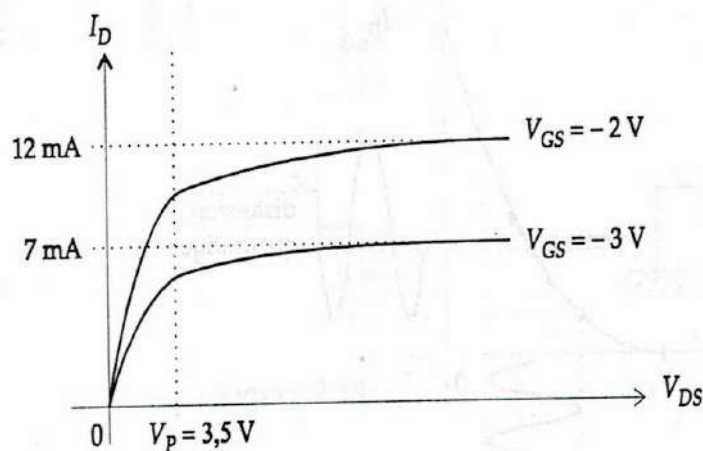


Figure 2.5.E

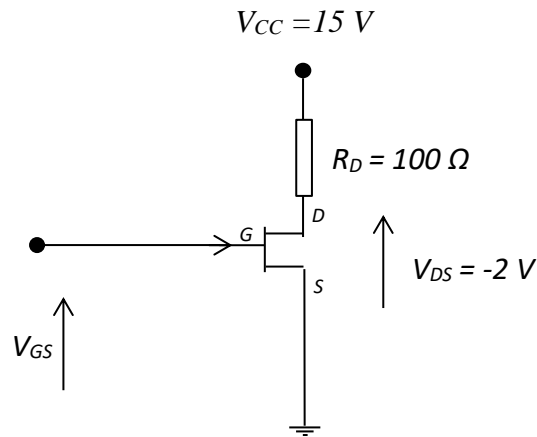


Figure 2.6.E

Exercice N°6

Soit le montage suivant.

- Le courant minimum de fonctionnement du thyristor au silicium est de 3 mA . On suppose le thyristor est fermé. Déterminer pour quelle valeur de la résistance R elle s'arrêtera de conduire.
- On suppose que la tension aux bornes de l'entrée de la gâchette et la masse est égale $0,8\text{ V}$ et le courant de déclenchement vaut $0,1\text{ mA}$, calculer quelle tension V fait conduire le thyristor.

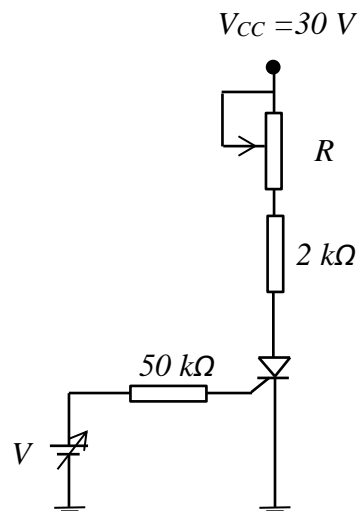


Figure 2.7.E

Solutions

Fiche de travaux dirigés N° 2

Composants électronique de puissance

Exercice N°1

Une approche très efficace pour évaluer si une diode est passante consiste de débiter en présumant qu'elle est initialement bloquée. La confirmation de cette hypothèse est facile en cas de blocage effectif, mais en si elle est passante, elle conduit rapidement à une incohérence, démontrant ainsi l'impossibilité du blocage de la diode.

Cas de la figure 2.1.E.a

Supposons que la diode se trouve dans un état bloqué ; dans ce contexte, aucun courant ne circule à travers la diode, et les deux résistances fonctionnent comme un diviseur de tension.

On a donc :

$$V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

AN :

$$V_A = \frac{40}{100 + 40} 10 = 2,8 V$$

$$V_A = 2,8 V$$

La diode présenterait donc une différence de potentiel, à ces bornes, en sens direct, égale à 2,8 V, ce qui est impossible. La diode est donc passante et présente à ses bornes une tension de 0,7 V

Calcul du courant qui traverse la diode

Soit le courant I_1 qui circule dans la résistance R_1 et I_2 le courant dans R_2 . D'après la loi des mailles on a :

$$I_1 = \frac{E - V_A}{R_1}$$

AN :

$$I_1 = \frac{10 - 0,7}{100} = 93 mA$$

$$I_1 = 93 mA$$

En procédant de la même manière (loi des mailles), le courant I_2 est égal à :

$$I_2 = \frac{V_A}{R_2}$$

AN :

$$I_2 = \frac{0,7}{40} = 17,5 \text{ mA}$$

$$I_2 = 17,5 \text{ mA}$$

Selon la loi des nœuds le courant qui circule dans la diode est égal à :

$$I = I_1 - I_2$$

AN :

$$I = 93 - 17,5 = 75,5 \text{ mA}$$

$$I = 75,5 \text{ mA}$$

Cas de la figure 2.1.E.b

En posant l'hypothèse que la diode est en état de blocage, aucun courant ne traverse la résistance R_2 . Le circuit se réduit à une seule boucle. Comme il n'y a pas de chute de tension aux bornes de la résistance R_2 , l'anode et la cathode de la diode sont au même potentiel. La tension aux bornes de la diode est nulle, ce qui est parfaitement cohérent avec le blocage supposé de la diode.

Selon la loi des nœuds le courant qui circule dans la diode est égal à :

$$V_A - V_B = 0,7 \text{ V}$$

La tension au nœud B est égale à 10 V .

Ce qui implique que la tension au nœud A est égale à :

$$V_A = V_B + 0,7$$

AN :

$$V_A = 10 + 0,7 = 10,7 \text{ V}$$

$$V_A = 10,7 \text{ V}$$

Ce résultat conduirait à la configuration ci-après.

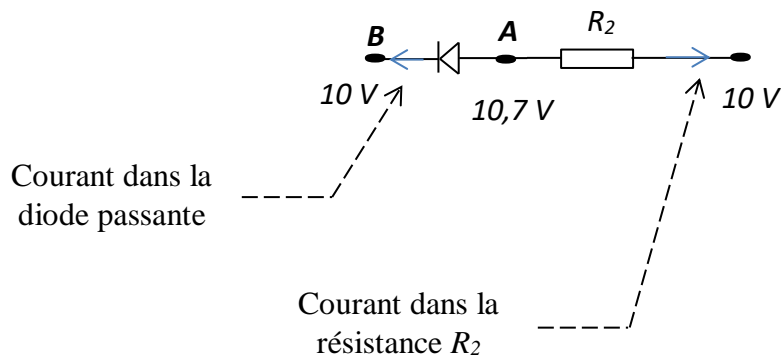


Figure 2.1.S

La configuration trouvée est impossible, ce qui signifie que la diode est bloquée.

✚ Cas de la figure 2.1.E.c

En supposant que la diode soit bloquée, on a affaire à deux diviseurs de tensions.

On a donc :

$$\begin{cases} V_A = \frac{R_4}{R_3 + R_4} E \\ V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E \end{cases}$$

À l'issue des calculs, on obtient :

$$\begin{cases} V_A = 2,9 V \\ V_B = 6,7 V \end{cases}$$

Le calcul de la tension aux bornes de la diode s'effectue selon la formule suivante :

$$V_d = V_A - V_B$$

AN :

$$V_d = 2,9 - 6,7 = -3,8 V$$

$V_d = -3,8 V$

Ce dernier résultat indique clairement que la diode est effectivement en état de blocage.

Cas de la figure 2.1.E.d

En supposant que la diode soit passante, on a :

$$\begin{cases} V_A = E_2 + V_d \\ V_B = E_1 \end{cases}$$

Le résultat des calculs se présente comme suit :

$$\begin{cases} V_A = 10,7 V \\ V_B = 10 V \end{cases}$$

La chute de tension aux bornes de la résistance ($V_A = 10,7 V$) nécessite un courant dirigé vers le bas, ce qui exclut catégoriquement le passage du courant à travers la diode. Par conséquent, la diode ne peut pas être en mode passant.

Exercice N°2

Forme d'onde du courant qui traverse la bobine :

a) Cas d'une tension continue constante

D'après la loi de Kirchhoff (loi des mailles), la tension d'alimentation est donnée par l'équation suivante :

$$E = V_{D1} + V_L$$

Lorsque la diode D_1 est en mode passant (D_2 est bloquée), cette équation se modifie comme suit :

$$\begin{aligned} E &= V_L = L \frac{di_L}{dt} \\ \Rightarrow E dt &= L di_L \\ \Rightarrow di_L &= \frac{E}{L} dt \end{aligned}$$

On résout cette équation différentielle en effectuant l'intégration des deux côtés.

La solution est exprimée par l'expression suivante :

$$i_L = \frac{E}{L} t + c$$

Avec :

c : représente la constante d'intégration qui dépend des conditions initiales.

On pose $t = 0 \text{ s} \Rightarrow i_L = 0 \text{ A}$

Donc la constante d'intégration c est nulle.

Finalement, on trouve que le courant qui circule dans la bobine est égal à :

$$i_L = \frac{E}{L} t$$

Cette équation finale nous offre la possibilité de représenter graphiquement l'évolution du courant qui traverse la bobine en fonction du temps.

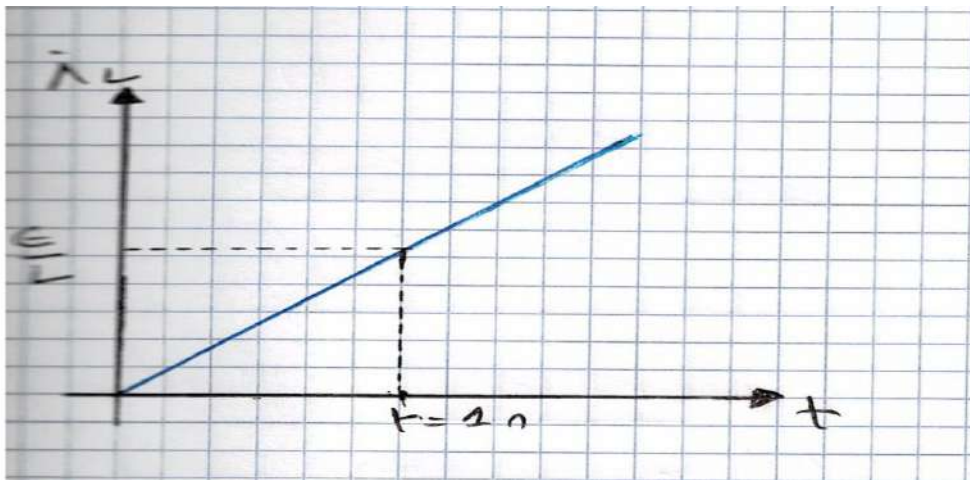


Figure 2.2.S

b) Cas d'une tension continue interrompue

La figure ci-dessous illustre la forme d'onde d'une tension continue subissant des interruptions périodiques suivies de son rétablissement à des intervalles réguliers au cours d'une période spécifiée.

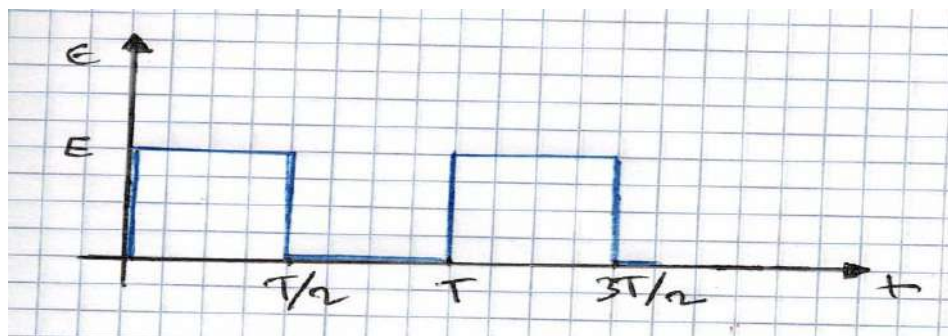


Figure 2.3.S

- ✚ Pour un temps t appartenant à l'intervalle $\left[0, \frac{T}{2}\right]$, la diode D_1 est conductrice tandis que la diode D_2 est bloquée. Dans cet intervalle, la tension d'alimentation demeure constante, entraînant ainsi un courant circulant à travers la bobine, dont son expression est la suivante :

$$i_L = \frac{E}{L} t$$

- ✚ Pour un temps $t = \frac{T}{2}$, la tension d'alimentation est nulle et le courant circulant à travers la bobine est égal à :

$$i_L = \frac{E T}{L 2}$$

- ✚ Pour un temps t appartenant à l'intervalle $\left[\frac{T}{2}, T\right]$, La diode D_1 est en état de blocage tandis que la diode D_2 est en état passant. Durant cette phase, la tension d'alimentation est nulle, et la tension aux bornes de la bobine est égale à la tension aux bornes de la diode D_2 , comme le décrit la formule suivante :

$$V_{D1} = V_L = L \frac{di_L}{dt} = 0$$

Ce dernier résultat indique que le courant qui traverse la bobine reste constant. Ainsi, pendant cette plage de temps, il est égal à :

$$i_L = \frac{E T}{L 2}$$

Les trois résultats obtenus nous permettent de tracer la forme d'onde du courant qui traverse la bobine en fonction du temps.

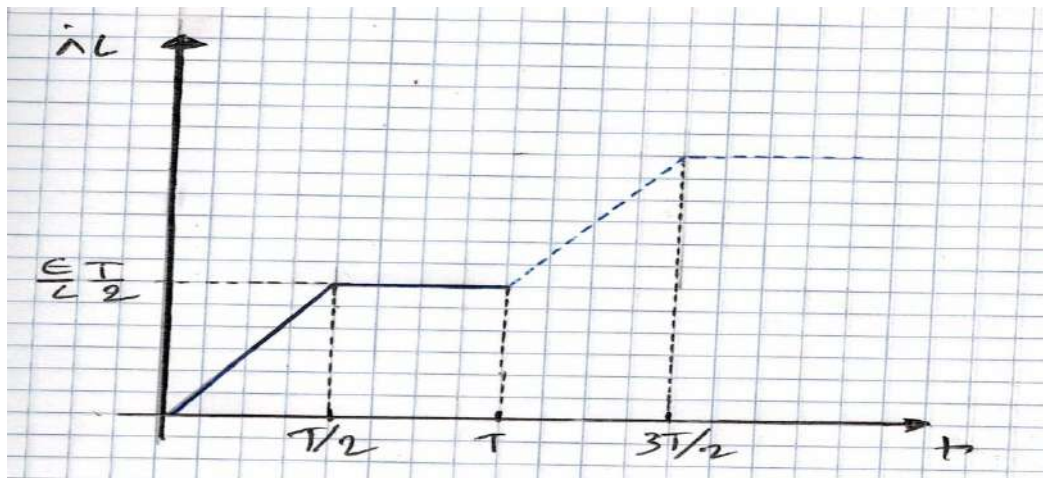


Figure 2.4.S

c) Cas d'une tension sinusoïdale

Similairement aux situations antérieures, nous allons chercher l'expression du courant circulant à travers la bobine.

Selon la loi des mailles, la tension d'alimentation est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 U &= V_{D1} + V_L \\
 \Rightarrow U_{max} \sin wt &= V_{D1} + V_L \\
 \Rightarrow U_{max} \sin wt &= L \frac{di_L}{dt} \\
 \Rightarrow di_L &= \frac{U_{max}}{L} \sin wt dt \\
 \Rightarrow di_L &= \frac{U_{max}}{w L} \sin wt dwt \\
 \Rightarrow i_L &= \int_0^T \frac{U_{max}}{w L} \sin wt dwt
 \end{aligned}$$

En intégrant cette dernière équation, on parvient à l'expression du courant, laquelle est formulée comme suit :

$$i_L = \frac{U_{max}}{w L} (1 - \cos wt)$$

Afin de représenter graphiquement le courant circulant dans la bobine, on attribue des valeurs à l'angle (wt).

Les valeurs assignées à l'angle (ωt) ainsi que les résultats du courant correspondant à chaque angle sont consignés dans le tableau suivant :

ωt	0	$\pi/2$	π	3π	2π
i_L	0	$U_{max}/\omega L$	$2 U_{max}/\omega L$	$U_{max}/\omega L$	0

Tableau 2.1.S

En utilisant les données reportées dans le tableau ci-dessus, nous avons la possibilité de dessiner la représentation graphique de la forme d'onde du courant qui traverse la bobine.

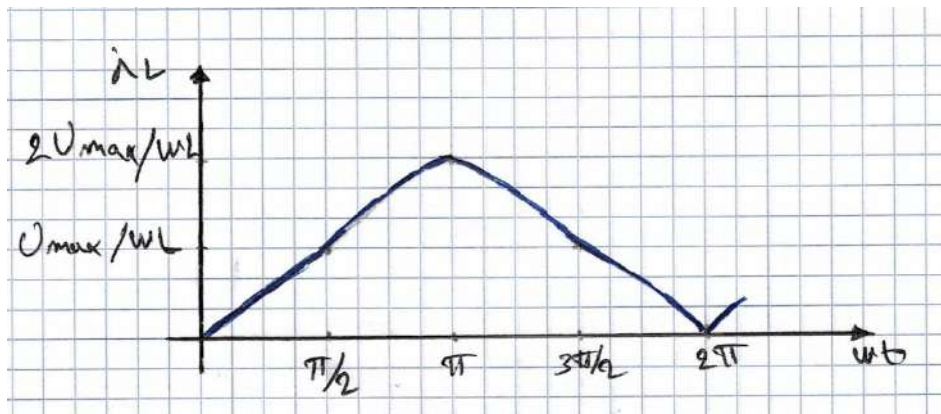


Figure 2.5.S

Exercice N°3

a) Calcul de la tension de sortie V_S

1) $V_1 = V_2 = 0$

Pour une égalité nulle entre les tensions V_1 et V_2 , la jonction base-émetteur du transistor est bloquée puisqu'aucun courant de base ne peut circuler. Le collecteur est donc nul également et comme aucune chute de tension ne règne aux bornes de la résistance R_C , la tension V_S est égale à la tension d'alimentation V_{CC} .

$$V_S = V_{CC} = 5V$$

2) $V_1 = 5V$ et $V_2 = 0$

La jonction base-émetteur du transistor se trouve polarisée en sens direct et comme l'émetteur du transistor se trouve à la masse, on a :

$$V_B = 0,7V$$

Le circuit est équivalent au schéma de la figure représenté ci-après.

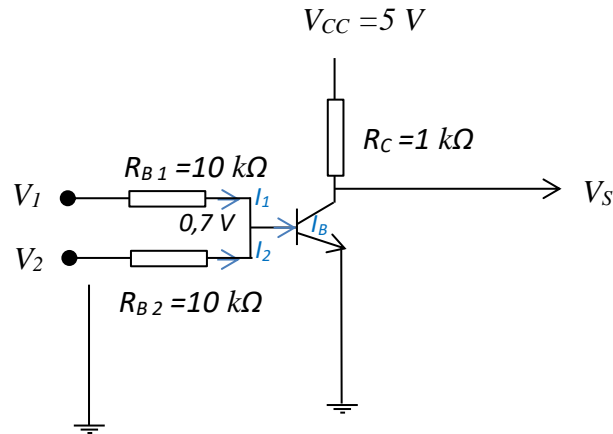


Figure 2.6.S

Calculons le courant de base du transistor. On a :

$$I_B = I_1 - I_2$$

Le courant I_1 est donné par l'équation suivante :

$$I_1 = \frac{V_1 - 0,7}{R_B}$$

AN :

$$I_1 = \frac{5 - 0,7}{10000} = 0.00043 \text{ A}$$

$$I_1 = 0.00043 \text{ A}$$

L'expression du courant I_2 est formulée comme suit :

$$I_2 = \frac{0,7}{R_B}$$

AN :

$$I_2 = \frac{0,7}{10000} = 0.00007 \text{ A}$$

$$I_2 = 0.00007 \text{ A}$$

Donc le courant I_B est égale à :

$$I_B = 0.00043 - 0.00007 = 0,00036 \text{ A} = 0,36 \text{ mA}$$

$$I_B = 0.36 \text{ mA}$$

Si le transistor n'est pas saturé le courant de collecteur est donc égal à :

$$I_C = \beta I_B$$

AN :

$$I_C = 100 \times 0,36 = 36 \text{ mA}$$

$$I_C = 36 \text{ mA}$$

On déduit que la tension de sortie est égale à :

$$V_S = V_{CC} - R_C I_C$$

AN :

$$V_S = 5 - 1000 \times 0,00036 = -31 \text{ V}$$

$$V_S = -31 \text{ V}$$

Cette valeur ne correspond pas à une valeur possible. Le transistor est donc saturé et la tension de sortie est nulle.

$$V_S = 0 \text{ V}$$

$$3) V_1 = V_2 = 5 \text{ V}$$

Si les deux tensions sont égales à 5 V, le schéma du montage devient celui de la figure suivante :

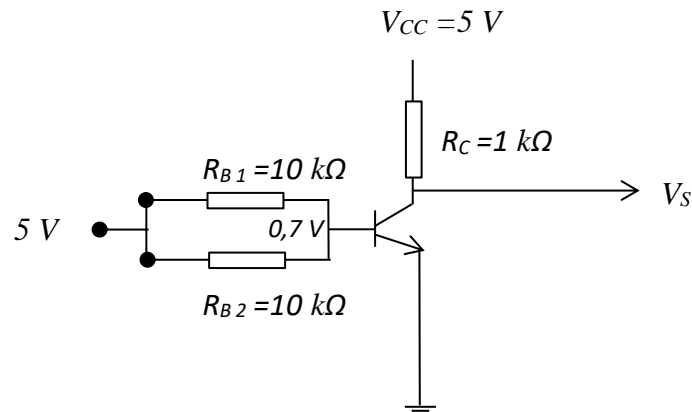


Figure 2.7.S

La base du transistor se trouve reliée au potentiel 5V par l'intermédiaire d'une résistance R équivalente à l'association parallèle de deux résistances R_B

Soit :

$$R = \frac{R_B}{2}$$

Le courant de base est donc égal à :

$$I_B = \frac{5 - 0,7}{\frac{R_B}{2}}$$

AN :

$$I_B = \frac{5 - 0,7}{\frac{10000}{2}} = 0,00086 \text{ A} = 0,86 \text{ mA}$$

$$I_B = 0,00086 \text{ A} = 0,86 \text{ mA}$$

Si le transistor est conducteur, le courant de collecteur est égal à :

$$I_C = \beta I_B$$

AN :

$$I_C = 100 \times 0,86 = 86 \text{ mA}$$

$$I_C = 86 \text{ mA}$$

On en déduit alors :

$$V_S = V_{CC} - R_C I_C$$

AN :

$$V_S = 5 - 1000 \times 0,00086 = -81 \text{ V}$$

$$V_S = -81 \text{ V}$$

Le résultat trouvé de la tension de sortie indique effectivement que le transistor est saturé, ce qui signifie que la tension de sortie est nulle.

$$V_S = 0 \text{ V}$$

b) Conclusion sur la fonction réalisée par le montage

En conclusion, la tension de sortie V_S est égale à $5V$ seulement lorsque les deux tensions d'entrée (V_1, V_2) sont simultanément à $0V$. Si l'une des tensions d'entrée est égale à $5V$, la sortie devient nulle. Cette fonction logique est connue sous le nom de fonction « **NON-OU** ».

Exercice N°4

Calcul de la tension V_S

1) $V_e = 0 \text{ V}$

En considérant que la tension d'entrée est nulle, le transistor T_1 présente une tension V_{GS} égale à -5 V . Étant un transistor de canal P , il devient conducteur et établit un court-circuit entre la tension V_S et la tension d'alimentation V_{CC} . En parallèle, le transistor T_2 a une tension V_{GS} nulle. En tant que transistor de canal N , il se bloque, isolant ainsi la tension V_S de la masse.

Dans cette configuration particulière, la tension V_S est égale à $5V$.

$$V_S = 5 \text{ V}$$

2) $V_e = 5 \text{ V}$

Dans cette seconde configuration, avec une tension d'entrée de $5V$, le transistor T_1 présente une tension V_{GS} nulle. Étant un transistor de canal P , il se bloque, isolant ainsi la tension V_S de la tension d'alimentation V_{CC} . Simultanément, le transistor T_2 a une tension V_{GS} de $5V$.

En tant que transistor de canal N , il conduit, établissant un court-circuit entre la tension V_S et la masse. Cela engendre une la tension V_S nulle.

$$V_S = 0 \text{ V}$$

Exercice N°5

Pour résoudre cet exercice, nous supposons que le transistor fonctionne dans sa zone linéaire.

Selon la figure 2.5, si le transistor est correctement polarisé dans sa zone linéaire, le courant de drain est de 12 mA .

La formule permettant de calculer la tension au niveau du drain est :

1) $R_D = 100 \text{ } \Omega$ et $V_{GS} = -2 \text{ V}$

$$V_D = V_{CC} - R_D I_D$$

AN :

$$V_D = 15 - 100 \times 0,00012 = 13,8 \text{ V}$$

$$V_D = 13,8 \text{ V}$$

Comme $V_S = 0 \text{ V}$, on a :

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_D = 13,8 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 13,8 \text{ V}$$

Nous savons que la tension de pincement V_P est égale à $3,5 \text{ V}$. Nous avons effectivement $V_{DS} > V_P$. Le transistor $JFET$ est donc correctement polarisé dans sa région linéaire, et le courant I_D est de 12 mA .

$$I_D = 12 \text{ mA}$$

Exercice N°6

a) Calcul de la résistance R

Pour déterminer la valeur de la résistance R pour laquelle le thyristor cessera de conduire, nous devons examiner la condition de blocage du thyristor.

En considérant que le thyristor est en mode passant, le courant minimum de fonctionnement est de 3 mA . Lorsque le thyristor cesse de conduire, le courant devient nul.

Ainsi, la chute de tension aux bornes de la résistance R est calculée par la formule suivante :

$$V_R = R \times I$$

Pour que le thyristor cesse de conduire, il est nécessaire que la tension à travers la résistance (V_R) soit égale à la tension de seuil du thyristor.

Donc :

$$V_{Seuil} = V_R = R \times I$$

Alors :

$$R = \frac{V_{Seuil}}{I}$$

Étant donné que le matériau utilisé pour le thyristor est le silicium, la tension de seuil du thyristor est de $0,7\text{ V}$.

AN :

$$R = \frac{V_{Seuil}}{I} = \frac{0,7}{0,003} = 233,33\ \Omega$$

$$R = 233,33\ \Omega$$

b) Calcul de la tension V qui fait conduire le thyristor

D'après la figure 2.7, La tension V qui fait conduire le thyristor est la somme de la tension de gâchette (tension de seuil) et de la tension aux bornes de la résistance $50\text{ k}\Omega$.

Donc :

$$V = V_{Seuil} + R_{(50\text{ k}\Omega)} \times I'$$

AN :

$$V = 0,7 + 50000 \times 0,0001$$

$$V = 5,7\text{ V}$$

Enoncés

Fiche de travaux dirigés N° 3

Redressement monophasé simple alternance non commandé et commandé

Exercice N°1

Soit le montage suivant :

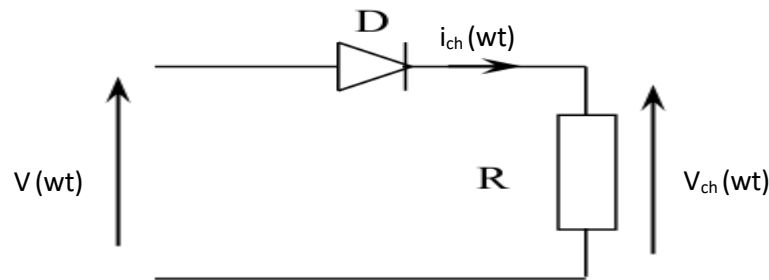


Figure 3.1.E

Dans ce circuit la tension d'alimentation est : $V(wt) = V\sqrt{2} \sin(wt)$ (Volt).

On donne $V = 220v$; $f = 50Hz$; $R = 10\Omega$.

- Analyser le fonctionnement du montage et représenter l'allure de $V(wt)$, $i_{ch}(wt)$, $V_{ch}(wt)$ et $V_D(wt)$.
- Calculer la puissance moyenne délivrée à la charge, la puissance apparente et le facteur de puissance.
- On intercale, entre la source et la charge, un transformateur de rapport de transformation égal à 1 conformément à la représentation de la figure suivante. Représenter $i_p(wt)$ et $i_s(wt)$.

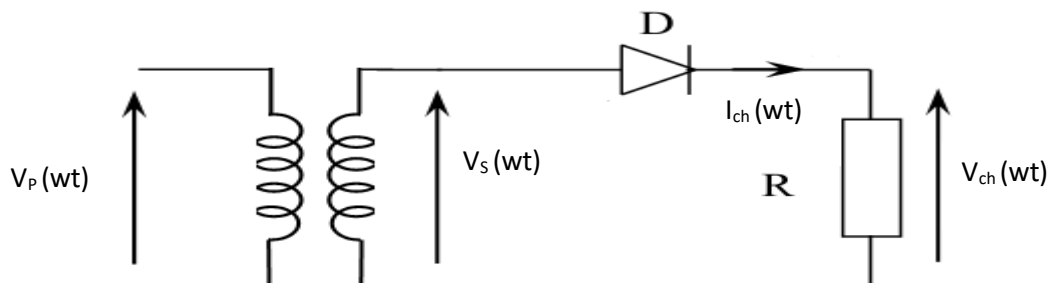


Figure 3.2.E

Exercice N°2

Soit le montage suivant :

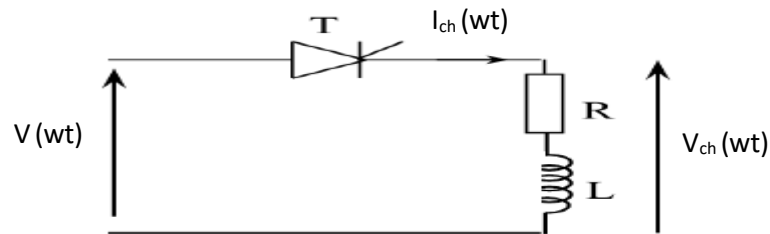


Figure 3.3.E

La tension d'alimentation est : $V(wt) = V_{max} \sin(wt)$ (V). L'angle d'amorçage est égal à $\pi/2$ (rad) et l'angle d'extinction du courant est égal à $4\pi/3$ (rad). La résistance de la charge est égale à 10Ω et la tension maximale de la source d'alimentation est égale à $220V$.

- Tracer les formes d'ondes de $V_{ch}(wt)$, $I_{ch}(wt)$ et $V_{inv}(wt)$.
- Calculer $V_{ch moy}$, $I_{ch moy}$ et $V_{inv moy}$.
- Quel est le moyen à apporter au montage pour augmenter $V_{ch moy}$? Dessiner dans ce cas le montage ainsi que $V_{ch}(wt)$, $I_{ch}(wt)$ et $V_{inv}(wt)$.

Exercice N°3

Soit le montage suivant :

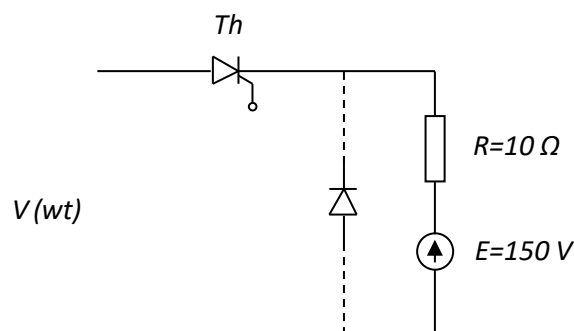


Figure 3.4.E

La tension d'alimentation est : $V(wt) = 220 \sin(wt)$ (V).

- Quel doit être la valeur de $V_{ch moy}$ et $I_{ch moy}$ pour un angle d'amorçage qui est égal à $\pi/6$ (Rad).
- Si l'angle d'amorçage est égal à $\pi/2$ (rd) calculer $V_{ch moy}$ et $I_{ch moy}$ et tracer $V_{inv}(wt)$.

- c) Si on ajoute une diode *DRL*, calculer $V_{ch\ moy}$ et $I_{ch\ moy}$.

Exercice N°4

Considérons un montage redresseur monophasé non commandé simple alternance (*PI*) qui est alimenté par une tension alternative sinusoïdale de $45V$ et une fréquence de $50\ Hz$. La charge connectée à ce montage est une combinaison résistive-inductive avec une résistance de $100\ \Omega$ et une inductance de $100\ mH$.

- Dessiner le schéma de la topologie de ce montage.
- Dessiner les formes d'ondes de $V_{ch}(wt)$ et $V_{inv}(wt)$ avec une diode de roue libre (*DRL*).
- Calculer la valeur moyenne de la tension V_{ch} .
- En déduire le courant de charge moyen.
- Calculer la valeur efficace de la tension V_{ch} .

Exercice N°5

Une diode de chute de tension négligeable recharge une batterie d'accumulateur de résistance $0,5\ \Omega$ et ayant une f.c.e.m égale à $100V$ en début de charge, et égale à $124V$ en fin de charge. La tension d'alimentation est $V(t) = 127\sqrt{2}\cos wt$ (V).

- Calculer la tension en début et en fin de charge indiquée par un voltmètre magnétoélectrique branché aux bornes de la batterie.
- Calculer le courant de charge moyen en début et en fin de charge.
- Tracer la tension inverse aux bornes de la diode.
- Donner la tension maximale appliquée aux bornes de la diode en début et en fin de charge.

Solutions

Fiche de travaux dirigés N° 4

Redressement monophasé double alternance non commandé et commandé

Exercice N°1

- a) La bobine permet de réaliser la condition courant constant.
L'inductance de la bobine doit être de forte valeur ($L \rightarrow \infty$)
Elle est appelée bobine de lissage.
- b) Formes d'ondes

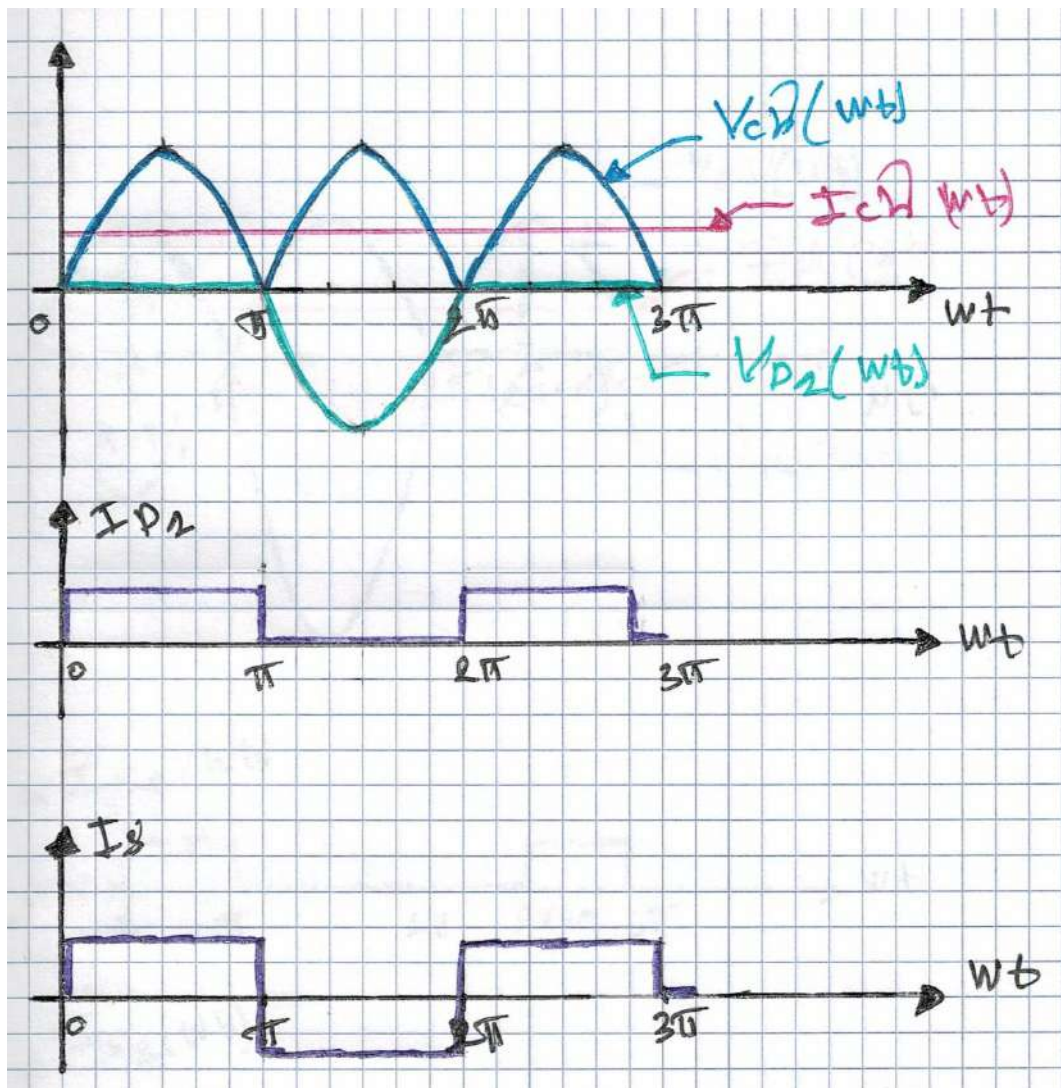


Figure 4.1.S

c) Calcul de la tension de charge moyenne

Pour calculer la tension moyenne de charge, on utilise la formule suivante :

$$\begin{aligned}V_{Ch \text{ moyenne}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{max} \sin wt \, dwt \\V_{Ch \text{ moyenne}} &= \frac{1}{2\pi} 2 \int_0^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt \\V_{Ch \text{ moyenne}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt = \frac{V_{max}}{\pi} 2 \\V_{Ch \text{ moyenne}} &= \frac{V_{max}}{\pi} [-\cos wt]_0^{\pi} = \frac{V_{max}}{\pi} 2\end{aligned}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{100}{\pi} 2 = 63,66 \, V$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 63,66 \, V$$

d) Calcul du courant moyen traversant la diode D_1

Le courant moyen qui traverse la diode D_1 est calculé à l'aide de la formule ci-après :

$$\begin{aligned}I_{D_1 \text{ moyen}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{D_1} (wt) \, dwt \\I_{D_1 \text{ moyen}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{ch} (wt) \, dwt \\I_{D_1 \text{ moyen}} &= \frac{I_{ch}}{2\pi} [-\cos wt]_0^{\pi} = \frac{I_{ch}}{2}\end{aligned}$$

AN :

$$I_{D_1 \text{ moyen}} = \frac{2}{2} = 1 \, A$$

$$I_{D_1 \text{ moyen}} = 1 \, A$$

e) Calcul du courant I_S efficace

$$I_{S \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_S^2(\omega t) d\omega t}$$

$$I_{S \text{ efficace}}^2 = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^\pi I_{Ch}^2(\omega t) d\omega t + \int_\pi^{2\pi} (-I_{Ch}^2)(\omega t) d\omega t \right]$$

$$I_{S \text{ efficace}}^2 = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^\pi I_{Ch}^2(\pi - 0) + \int_\pi^{2\pi} (-I_{Ch}^2)(2\pi - \pi) d\omega t \right]$$

$$I_{S \text{ efficace}}^2 = \frac{I_{Ch}^2}{2\pi} [\pi + 2\pi + \pi] = I_{Ch}^2$$

$$I_{S \text{ efficace}} = \sqrt{I_{Ch}^2}$$

AN :

$$I_{S \text{ efficace}} = I_{Ch} = 2 \text{ A}$$

$$I_{S \text{ efficace}} = 2 \text{ A}$$

Exercice N°2

a)

Si la tension V_{AB} est positive, le thyristor Th_2 ne peut pas conduire car cela entraînerait une tension V_{AB} aux bornes de P et A , bloquant ainsi nécessairement la diode $D1$ et empêchant tout courant de circuler dans le circuit. Le thyristor Th_2 reste donc désamorçé. Cependant, le thyristor Th_1 s'amorce dans cette condition et amorce également la conduction de la diode $D2$ simultanément. Lorsque la tension U_{AB} devient négative, Th_2 s'amorce et $D1$ commence à conduire.

b) **Forme d'onde de U_{PN}**

Avant de tracer la forme d'onde, il est nécessaire de calculer l'angle d'amorçage des thyristors (α).

$$\begin{cases} \alpha = \omega \frac{T}{12} \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{cases} \Rightarrow \alpha = \frac{T}{6} = \frac{\pi}{6} = 30^\circ$$

$$\alpha = \frac{T}{6} = \frac{\pi}{6} = 30^\circ$$

Lorsque Th_1 et $D2$ conduisent, U_{AB} est positive et $V_{PN} = V_{AB}$. Lorsque le courant s'annule Th_1 et $D2$ se bloquent, il faut attendre l'impulsion suivante pour que Th_2 et $D1$ soit passants.

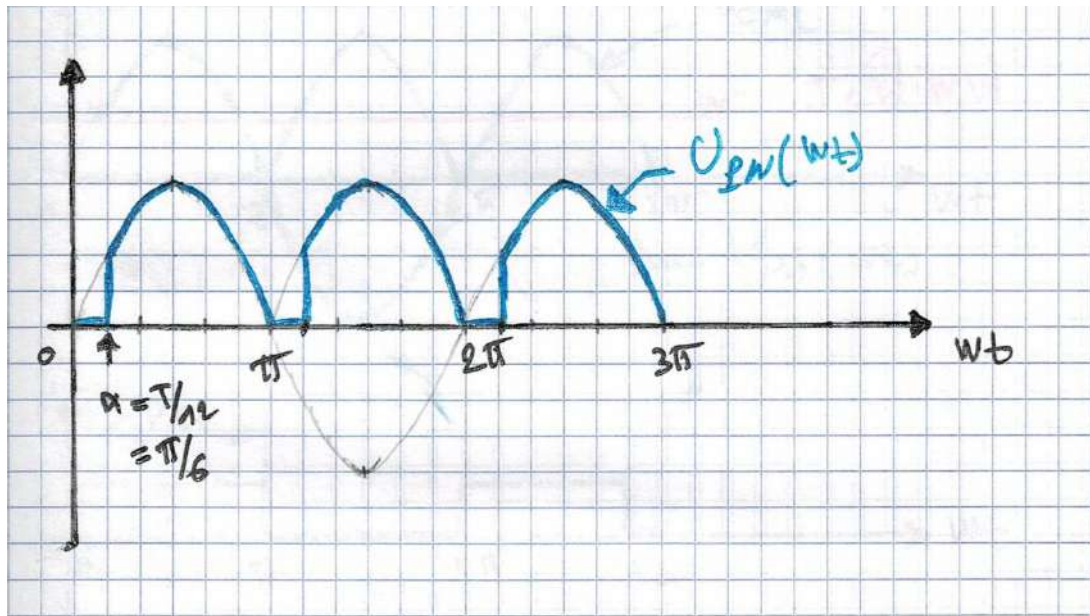


Figure 4.2.S

c) Expression de U_{PN} moyenne

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{2\pi} V_{max} \sin wt \, dwt$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{1}{2\pi} 2 \int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [-\cos wt]_{\alpha}^{\pi}$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

d) Calcul de V_{PN} moyenne pour un angle d'amorçage des thyristors qui est égal à 0°

$$\alpha = 0^\circ \Rightarrow \cos \alpha = 1$$

En remplace ce résultat dans l'équation trouvée dans la question précédente :

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + 1]$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{2 V_{max}}{\pi}$$

AN :

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{2 \cdot 220 \sqrt{2}}{\pi} = 198,17 \text{ V}$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = 198,17 \text{ V}$$

e) **Calcul de l'angle d'amorçage des thyristors pour une tension $V_{PN \text{ moyenne}}$ égale 169 V**

Le calcul de cette tension nécessite l'utilisation de l'expression trouvée dans la question C

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} + \frac{V_{max}}{\pi} \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{V_{PN \text{ moyenne}} - \frac{V_{max}}{\pi}}{\frac{V_{max}}{\pi}}$$

AN :

$$\cos \alpha = \frac{169 - \frac{220 \sqrt{2}}{\pi}}{\frac{220 \sqrt{2}}{\pi}} = 0,705$$

$$\cos \alpha = 1 \quad \Rightarrow \quad \alpha = 45,12^\circ$$

$$\alpha = 45,12^\circ$$

Exercice N°3

a) Formes d'ondes

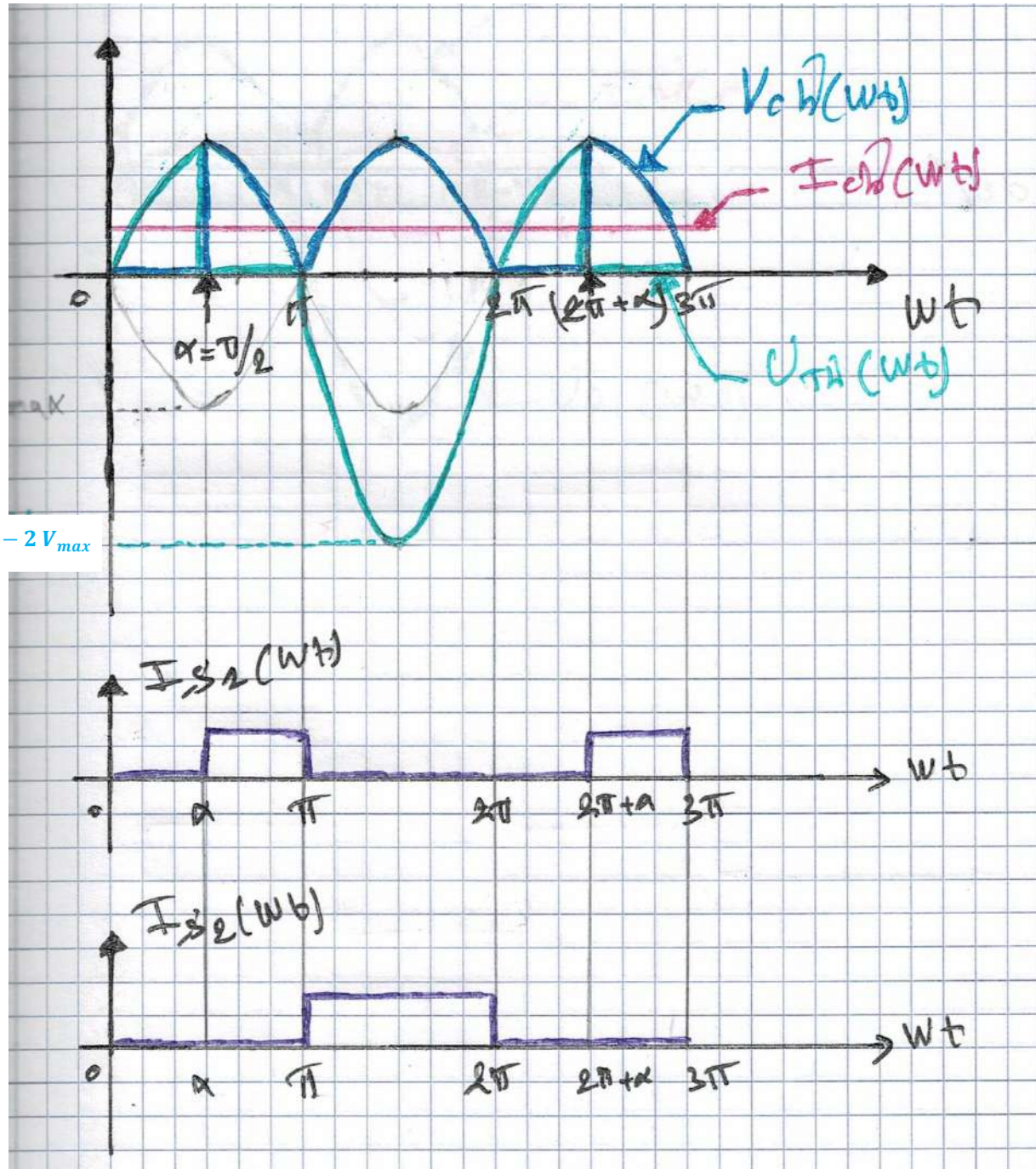


Figure 4.3.S

b) Calcul de l'angle de retard à l'amorçage du thyristor

À l'aide de la formule permettant le calcul de la puissance de charge moyenne, nous trouvons la valeur de la tension de charge moyenne. Puis, en utilisant cette tension, nous déterminons l'angle d'amorçage du thyristor.

Calcul de la tension de charge moyenne

$$P_{Ch\ moyenne} = V_{Ch\ moyenne} \times I_{Ch\ moyenne}$$

$$\Rightarrow V_{Ch\ moyenne} = \frac{P_{Ch\ moyenne}}{I_{Ch\ moyenne}}$$

AN :

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{0,5 \cdot 10^3}{7} = 71,43\ V$$

$$V_{Ch\ moyenne} = 71,43\ V$$

Calcul de l'angle de retard à l'amorçage

À partir de la forme d'onde de la tension de charge, nous obtenons l'expression permettant de calculer sa valeur moyenne.

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt + \int_{\pi}^{2\pi} V_{max} \sin (wt - \pi) \, dwt \right]$$

En notation mathématique, la fonction $\sin (wt - \pi)$ peut également s'écrire :

$$\sin (wt - \pi) = - \sin (wt)$$

Donc :

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt + \int_{\pi}^{2\pi} -V_{max} \sin (wt) \, dwt \right]$$

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{V_{max}}{2\pi} [[-\cos wt]_{\alpha}^{\pi} - [-\cos wt]_{\pi}^{2\pi}]$$

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{V_{max}}{2\pi} [3 + \cos \alpha]$$

$$\Rightarrow \cos \alpha = \frac{= 71,43 \times 2\pi}{V_{max}} - 3$$

AN :

$$\cos \alpha = \frac{V_{ch \text{ moyenne}} \times 2\pi}{150} - 3 = 2,99 - 3 = -0,01$$

$$\cos \alpha = -0,01 \Rightarrow \alpha = 90,75^\circ$$

$$\alpha = 90,75^\circ$$

Exercice N°4

a) Expression de la tension aux bornes de la charge

Afin de déterminer l'expression de la tension aux bornes de la charge, une analyse du fonctionnement de notre circuit est nécessaire.

$$\color{red}{\oplus} \quad 0 < \omega t < \pi$$

$$\text{Nous avons : } \begin{cases} V_1 > 0 \\ V_2 < 0 \end{cases}$$

Cela implique que la diode D_1 est en mode passant et que la diode D_2 est bloquée. La tension aux bornes de la charge est égale à la tension V_1 .

$$V_{Ch} = V_1$$

$$\color{red}{\oplus} \quad \pi < \omega t < 2\pi$$

$$\text{Nous avons : } \begin{cases} V_1 < 0 \\ V_2 > 0 \end{cases}$$

Ce constat indique que la diode D_1 est bloquée, tandis que la diode D_2 est en mode passant. Par conséquent, la tension aux bornes de la charge est égale à la tension V_2 .

$$V_{Ch} = V_2$$

b) Formes d'ondes

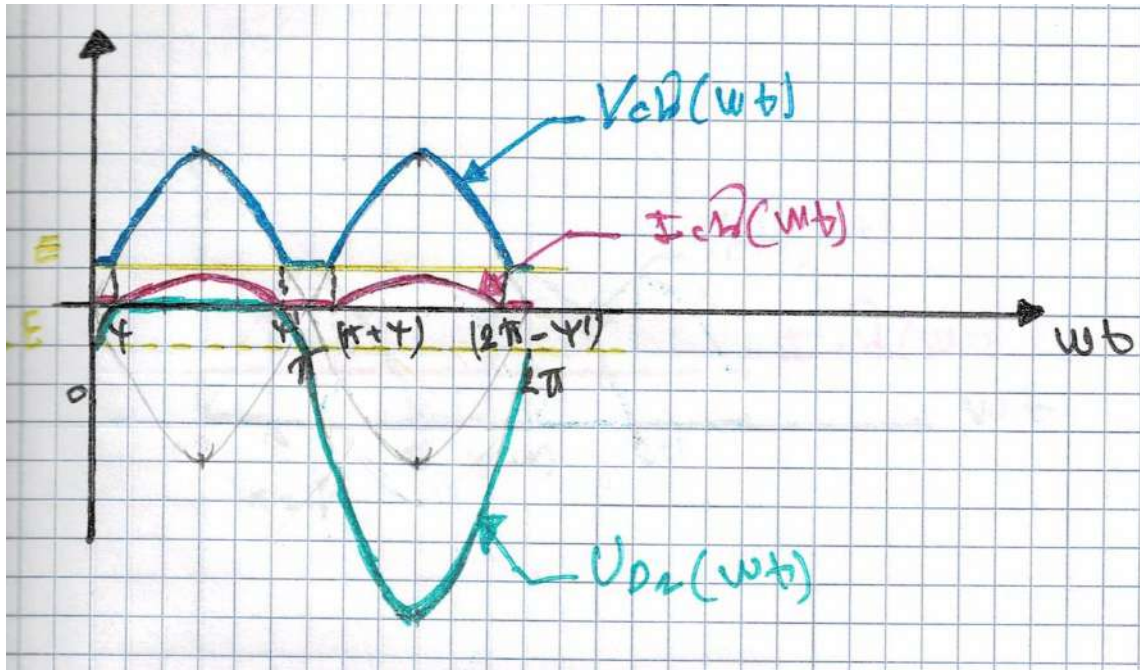


Figure 4.4.S

Afin de représenter graphiquement l'évolution de la tension aux bornes de la diode D_1 , il est nécessaire de trouver son équation lorsque la diode est en mode passant et lorsqu'elle est bloquée.

- ✚ La diode D_1 est passante dans l'intervalle $\psi < \omega t < \psi'$, ce qui entraîne une tension nulle aux bornes de la diode D_1 ($V_{D_1} = 0$ V).
- ✚ Au-delà de l'intervalle $\psi < \omega t < \psi'$, la diode D_1 est bloquée. En appliquant la loi des mailles, nous obtenons :

➤ Dans les intervalles
$$\begin{cases} 0 < \omega t < \psi \\ \psi' < \omega t < \pi + \psi \\ 2\pi - \psi' < \omega t < 2\pi \end{cases}$$

$$V_1 - V_{D_1} - V_{Ch} = 0$$

$$\Rightarrow V_{D_1} = V_1 - V_{Ch}$$

Par ailleurs, on a :

$$\begin{cases} V_{Ch} = E + R I_{Ch} \\ I_{Ch} = 0 \text{ A} \end{cases}$$

Finalement, on aboutit à :

$$V_{D_1} = V_1 - E$$

➤ Dans l'intervalle $\pi - \psi < wt < 2\pi - \psi'$

$$V_1 - V_{D_1} - V_{Ch} = 0$$

On a aussi :

$$\begin{cases} V_{Ch} = V_2 \\ V_2 = V_1 \end{cases}$$

A la fin, nous parvenons à :

$$V_{D_1} = -2 V_1 = -2 V_{max}$$

c)

Calcul de la tension de charge moyenne

La formule utilisée pour calculer la tension de charge moyenne est la suivante :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 2 \left[\frac{1}{2\pi} \left(\int_0^\psi E \, dwt + \int_\psi^{\psi'} V_1 (wt) \, dwt + \int_{\psi'}^\pi E \, dwt \right) \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 2 \left[\frac{1}{2\pi} \left([E [wt]_0^\psi] + [V_{max}[-\cos wt]_\psi^{\psi'}] + [E [wt]_{\psi'}^\pi] \right) \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{\pi} [E \psi + V_{max}(-\cos \psi' + \cos \psi) + E (\pi - \psi')]]$$

En outre, nous avons :

$$\psi' = \pi - \psi$$

En substituant l'expression l'angle ψ' par son expression, nous trouvons :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{\pi} [(2 E \psi) + V_{max}(-\cos(\pi - \psi) + \cos \psi)]$$

Calcul de l'angle ψ

$$\psi = \arcsin \frac{E}{V_{max}}$$

AN :

$$\psi = \arcsin \frac{20}{155} = 7,2^\circ$$

$$\psi = 7,2^\circ$$

En remplaçant les valeurs des grandeurs V_{max} , E , et ψ , on trouve que la tension moyenne de charge est égale à 99,5 V

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 99,5 \text{ V}$$

Calcul du courant de charge moyen

Le courant de charge moyen est calculé en utilisant la formule ci-après :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}} - E}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{99,5 - 20}{10} = 7,9 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 7,9 \text{ A}$$

d) Tension maximale appliquée aux bornes de la diode D_1

Pour déterminer la tension maximale appliquée aux bornes de la diode D_1 , il est nécessaire d'utiliser l'équation trouvée dans la question c.

$$V_{D_1} = V_1 - E$$

Du fait que :

$$\begin{cases} V_1 \text{ max} = -155 \text{ V} \\ E = 20 \text{ V} \end{cases}$$

AN :

$$V_{D_1} = -155 - 20 = -175 \text{ V}$$

$$V_{D_1} = -175 \text{ V}$$

Exercice N°5

a) Calcul de la tension de charge moyenne et du courant de charge moyen

Pour effectuer le calcul la tension de charge moyenne et le courant de charge moyen, il est nécessaire de tracer leurs formes d'ondes.

Formes d'ondes

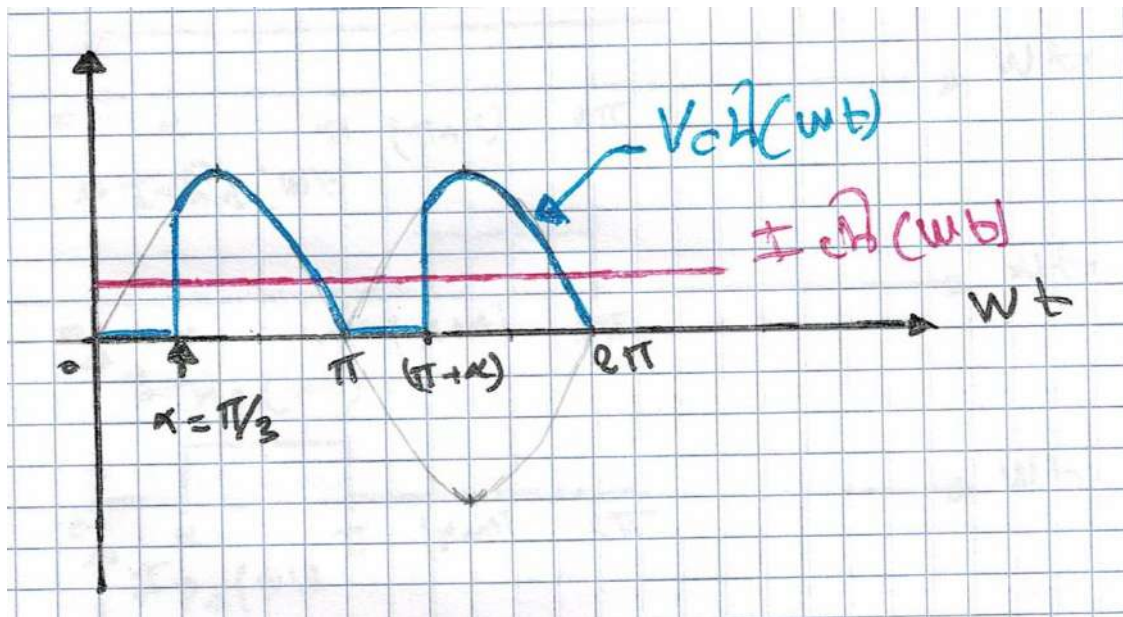


Figure 4.5.S

Calcul de la tension de charge moyenne

La formule employée pour le calcul de la tension moyenne de charge est la suivante :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{max} \sin \omega t \, d\omega t$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\alpha} V_{max} \sin \omega t \, d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} V_{max} \sin \omega t \, d\omega t \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{2\pi} \left[2 \left(\int_0^{\alpha} V_{max} \sin \omega t \, d\omega t \right) \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} ([-\cos \omega t]_0^{\alpha})$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

AN :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{100\sqrt{2}}{\pi} (1 + 0,5) = 47,74 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 47,74 \text{ V}$$

Calcul du courant de charge moyen

Pour obtenir le courant de charge moyen, on utilise la formule ci-dessous :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}}}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{47,74}{1} = 47,74 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 47,74 \text{ A}$$

b) Formes d'ondes

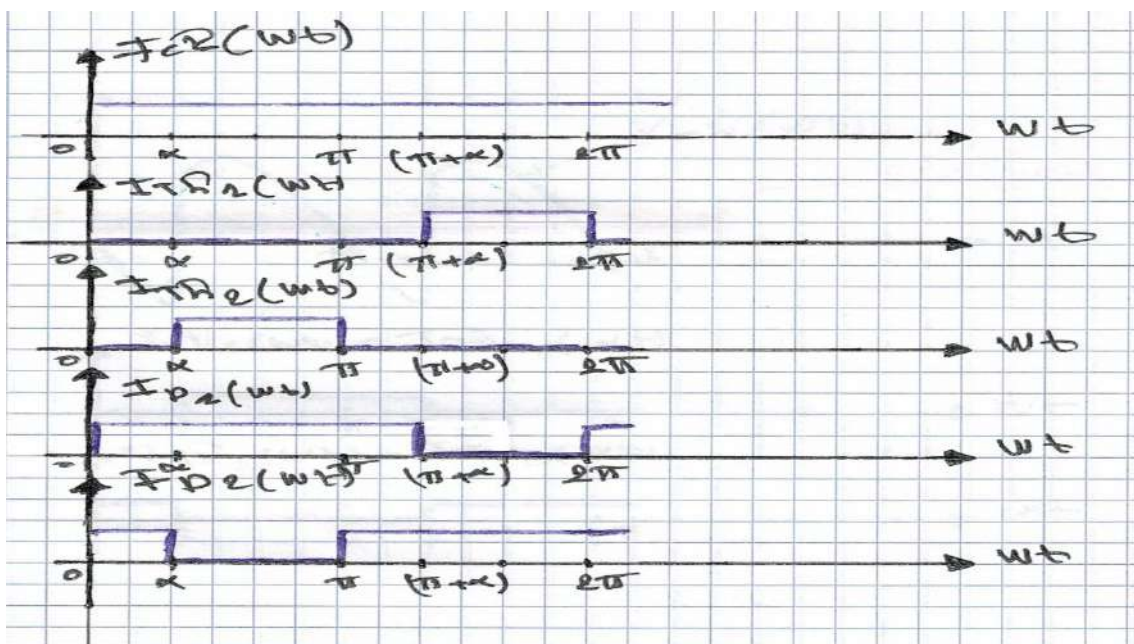


Figure 4.6.S

c) Calcul des courants $I_{Th1 \text{ moyen}}$ et $I_{Th1 \text{ efficace}}$

En se basant sur la forme d'onde du courant I_{th1} illustrée sur la figure 4.5, il est possible de calculer ses valeurs moyenne et efficace."

✚ Calcul du courant $I_{th1 \text{ moyen}}$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{Ch \text{ moyen}}(wt) dt$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I_{Ch \text{ moyen}} dt$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{2\pi} [2\pi - (\pi + \alpha)]$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{2\pi} \left[2\pi - \left(\pi + \frac{\pi}{3} \right) \right]$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{2\pi} \left[2\pi - \frac{4\pi}{3} \right]$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{3}$$

AN :

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{47,74}{3} = 15,91 \text{ A}$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = 15,91 \text{ A}$$

✚ Calcul du courant $I_{th1 \text{ efficace}}$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{Ch \text{ moyen}}^2 (wt) dt}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I_{Ch \text{ moyen}}^2 (wt) dt}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{I_{Ch \text{ moyen}}^2}{2\pi} [2\pi - (\pi + \alpha)]}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{I_{Ch \text{ moyen}}^2}{2\pi} \left[2\pi - \frac{4\pi}{3} \right]}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{I_{Ch \text{ moyen}}^2}{3}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{\sqrt{3}}$$

AN :

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \frac{47,74}{\sqrt{3}} = 27,56 \text{ A}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = 27,56 \text{ A}$$

d) Formes d'ondes

Avant de tracer les formes d'ondes, il est nécessaire de vérifier la condition d'amorçage des thyristors. Les thyristors deviennent passants seulement si $\alpha > \psi$.

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\pi}{3} \\ \psi = \arcsin \frac{40}{100\sqrt{2}} = 14.42^\circ \end{cases} \Rightarrow \alpha > \psi$$

La condition est vérifiée, et les thyristors s'amorcent.

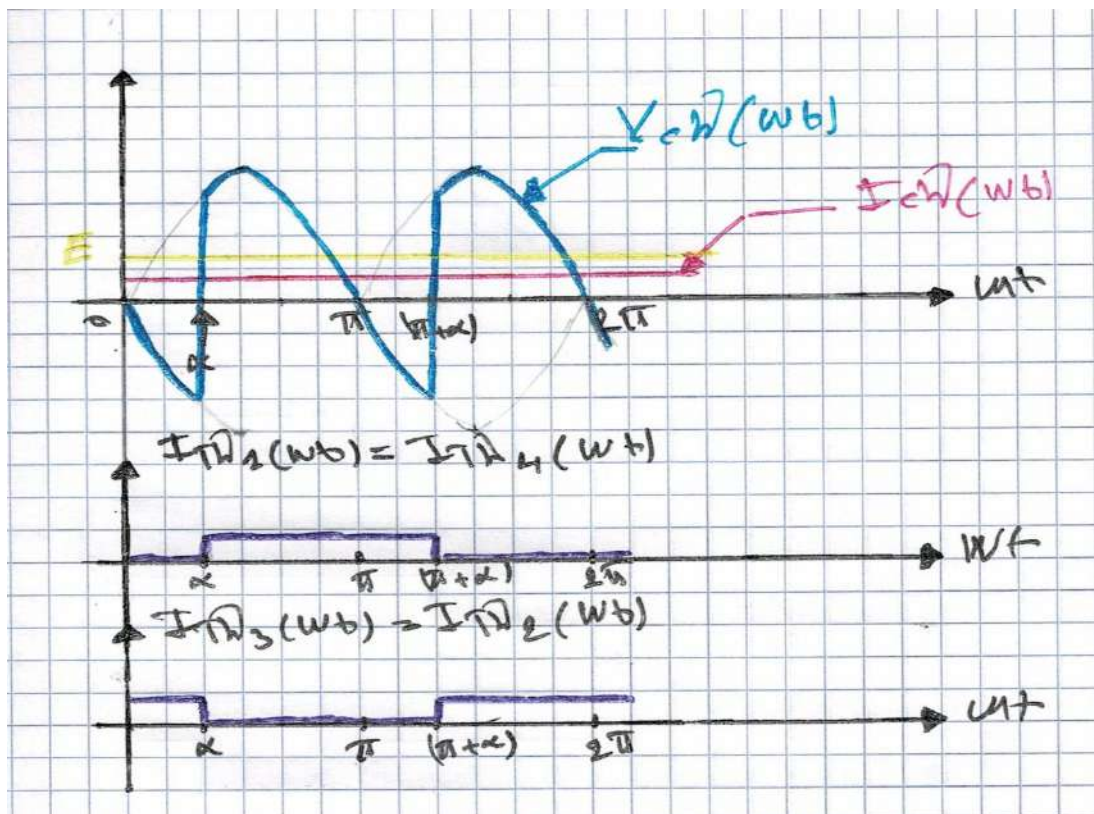


Figure 4.7.S

Exercice N°6

a) Calcul de la valeur efficace de la tension appliquée entre M et N

Pour calculer la tension efficace aux bornes M et N , nous suivons la méthode suivante. Tout d'abord, nous calculons la tension moyenne aux bornes P et Q (tension à la sortie du pont redresseur) en utilisant le courant moyen traversant l'inducteur et la résistance r (loi d'Ohm). Ensuite, en appliquant la formule correspondant à la tension moyenne relative à un pont redresseur non commandé $PD2$, nous déterminons la tension efficace aux bornes M et N .

Calcul de la tension moyenne aux bornes P et Q

La tension moyenne aux bornes P et Q pour le pont redresseur non commandé $PD2$ qui alimente l'inducteur est exprimée par l'équation suivante :

$$V_{PQ \text{ moyenne}} = r I_{PQ \text{ moyen}}$$

AN :

$$V_{PQ \text{ moyenne}} = 0,2 \times 75 = 15 \text{ V}$$

$$V_{PQ \text{ moyenne}} = 15 \text{ V}$$

Calcul de la tension efficace aux bornes M et N

La tension moyenne aux bornes P et Q est également égale à :

$$V_{PQ \text{ moyenne}} = \frac{2 V_{max}}{\pi}$$

A partir de cette dernière équation, on peut déterminer la tension V_{max} .

$$V_{max} = \frac{V_{PQ \text{ moyenne}} \pi}{2}$$

AN :

$$V_{max} = \frac{15 \pi}{2} = 23,6 \text{ V}$$

$$V_{max} = 23,6 \text{ V}$$

La tension efficace appliquée entre M et N est égale au quotient la tension maximale et la valeur de $\sqrt{2}$.

$$V_{MN \text{ efficace}} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

AN :

$$V_{MN \text{ efficace}} = \frac{23,6}{\sqrt{2}} = 16,69 \text{ V}$$

$$V_{MN \text{ efficace}} = 16,69 \text{ V}$$

b) On commande les thyristors par une impulsion à l'instant $\frac{T}{6}$.

- 1) A l'instant $\frac{T}{6}$ la tension d'alimentation V est positive donc c'est le thyristor Th_1 qui conduit.
- 2) Tant que la tension d'alimentation V reste positive, c'est la diode D_2 qui conduit.

La tension aux bornes C et D est égale à la tension d'alimentation.

$$V_{CD} = V = V_{AB}$$

- 3) Contrairement à une charge résistive ou le courant s'annulait en même temps que la tension, sur une charge inductive le courant garde le même sens même lorsque la tension d'alimentation s'inverse.

Par conséquent le thyristor reste en mode de conduction.

Afin de bloquer le thyristor en mode de conduction, il est nécessaire débloquent l'autre thyristor.

4) Formes d'ondes

Les thyristors reçoivent une impulsion de commande à l'instant $T/6$.

$$\alpha = \frac{T}{6} = \frac{\pi}{3} \text{ rad} = 60^\circ$$

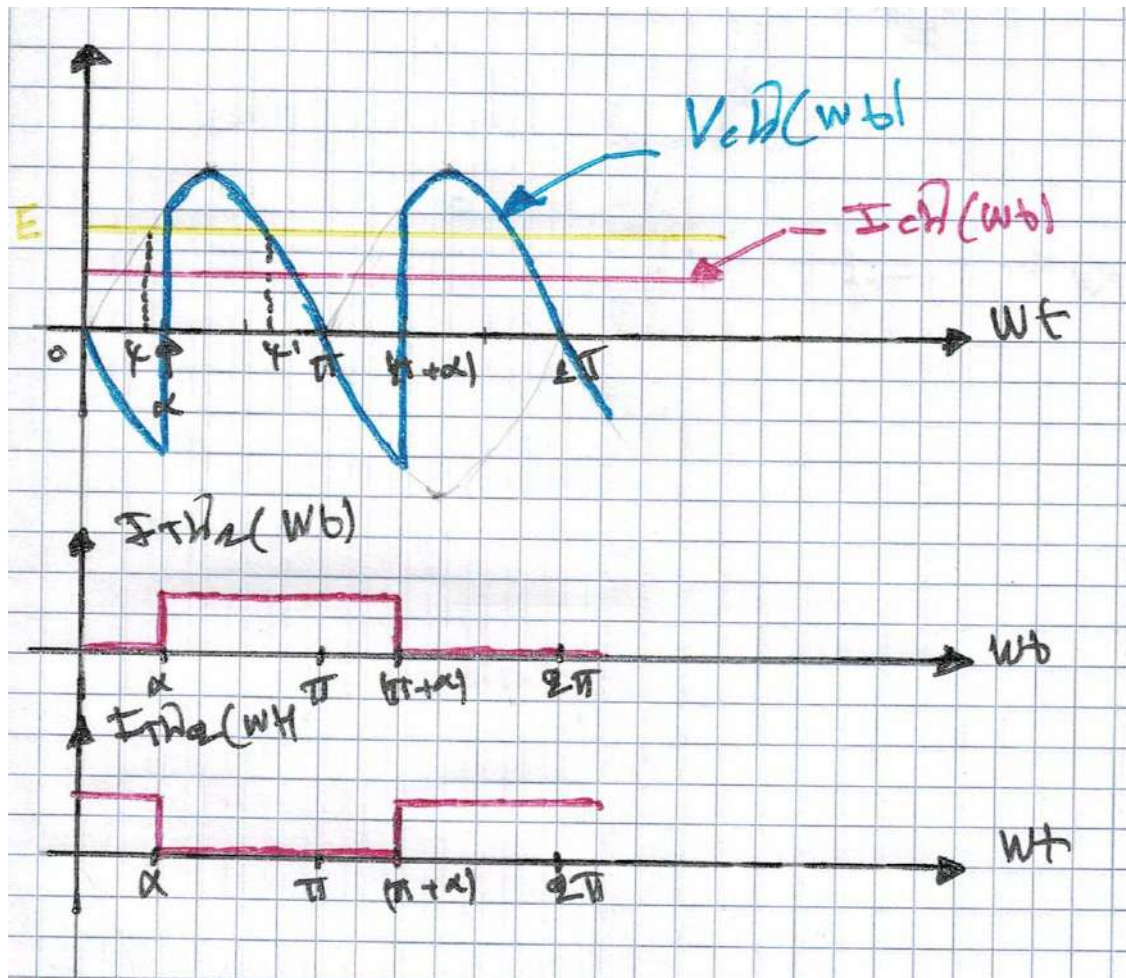


Figure 4.8.S

c) Calcul de la fem (E) du moteur

La détermination de la force électromotrice du moteur se fait en calculant la tension moyenne aux bornes C et D . Cette tension possède deux expressions distinctes : la première est déduite du circuit en utilisant la loi des mailles, tandis que la deuxième correspond à la tension moyenne de sortie du pont redresseur $PD2$ mixte dans notre circuit.

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \begin{cases} E + R I_{CD \text{ moyen}} \\ \frac{1}{2\pi} \left[2 \left(\int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi + \frac{\pi}{3}} V_{max} \sin \omega t \, d\omega t \right) \right] \end{cases}$$

On calcule d'abord la tension moyenne aux bornes C et D en utilisant la deuxième expression. Ensuite, en remplaçant le résultat de la tension moyenne aux bornes C et D dans la première expression, on détermine la force électromotrice.

Calcul de la tension moyenne aux bornes C et D

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \frac{1}{2\pi} \left[2 \left(\int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi+\frac{\pi}{3}} V_{max} \sin wt \, dwt \right) \right]$$

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} \left(\int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi+\frac{\pi}{3}} \sin wt \, dwt \right)$$

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} \left([-\cos wt]_{\frac{\pi}{3}}^{\pi+(\pi/3)} \right)$$

AN :

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \frac{380 \sqrt{2}}{\pi} \left([-\cos wt]_{\frac{\pi}{3}}^{4\pi/3} \right) = 171 \, V$$

$$V_{CD \text{ moyenne}} = 171 \, V$$

Calcul de la tension moyenne aux bornes C et D

$$V_{CD \text{ moyenne}} = E + R I_{CD \text{ moyen}}$$

$$E = V_{CD \text{ moyenne}} - R I_{CD \text{ moyen}}$$

AN :

$$V_{CD \text{ moyenne}} = 171 - 0,3 \times 63 = 152,16 \, V$$

$$V_{CD \text{ moyenne}} = 152,16 \, V$$

FICHE DE TD N°4

Redressement monophasé double alternance commandé et non commandé

Objectifs

- ✚ *Savoir le fonctionnement des montages redresseurs monophasés double alternance P2 et PD2.*
- ✚ *Analyser l'évolution des grandeurs de sortie du pont redresseur monophasé double alternance et l'évolution des grandeurs relatives aux interrupteurs de puissance (diode, thyristor).*
- ✚ *Etudier l'influence des différentes charges sur l'évolution des grandeurs de sortie du pont redresseur double simple.*

Enoncés

Fiche de travaux dirigés N° 4

Redressement monophasé double alternance non commandé et commandé

Exercice N°1

On considère le montage redresseur en pont de diodes ci- après. Il est alimenté par la tension $V(wt) = V_m \sin(wt)$ (Volt). Il débite dans un moteur un courant continu. Il est supposé que ce courant reste constant et équivaut à 2 A. Les quatre diodes sont supposées parfaites.

On donne : $V_m = 100V$, $R = 10\Omega$, $\theta_e = 4\pi/3$ (rad), $E = 60V$.

- Quel élément de la charge permet de réaliser la condition courant constant?
 Comment doit-il être ? Quel nom lui donne-t-on ?
- Tracer les formes d'ondes de
 - ✚ La tension aux bornes de la charge.
 - ✚ Le courant qui traverse la charge.
 - ✚ Le courant qui traverse la diode D_1
 - ✚ La tension aux bornes de la diode D_1
 - ✚ Le courant débité par la source.
- Calculez la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge?
- Calculez la valeur moyenne du courant dans la diode D_1 ?
- Calculez, en le justifiant, la valeur efficace du courant I_S ?

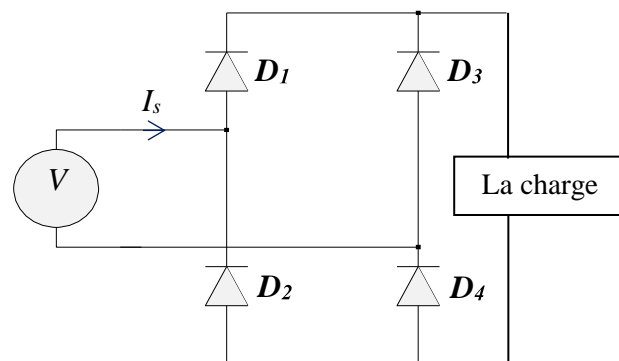


Figure 4.1.E

Exercice N°2

On veut obtenir une tension unidirectionnelle réglable à partir d'une tension sinusoïdale :

$$V_{AB} = 220 \sqrt{2} \sin wt \quad (w = \frac{2\pi}{T}, T: \text{période}).$$

Pour cela, on réalise un pont de Greatz mixte comme l'indique le schéma du montage ci-après :

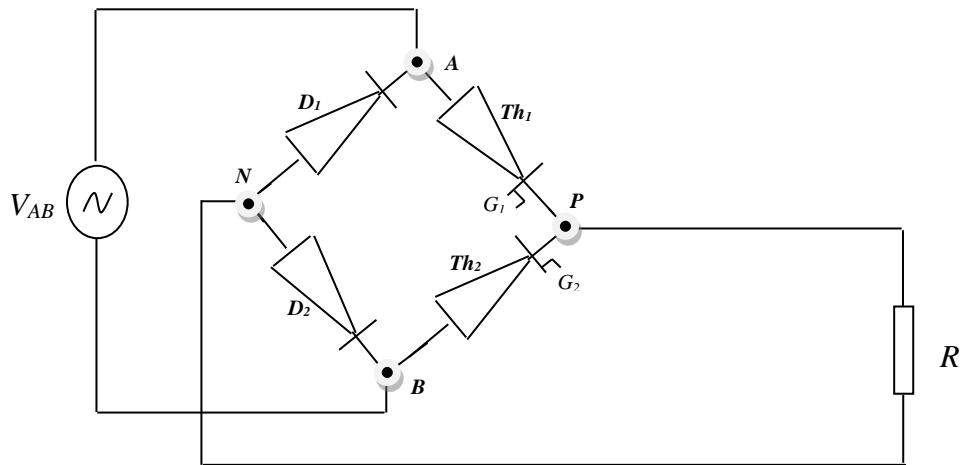


Figure 4.2.E

Les thyristors Th_1 , Th_2 , les diodes D_1 , D_2 sont supposés parfaits. Le dispositif de commande envoie au même instant et à chaque alternance une impulsion dans les circuits d'amorçage (G_1, G_2) des deux thyristors. On appelle $\alpha = \omega t$ l'angle correspondant à l'intervalle de temps τ compris entre l'instant où la tension U_{AB} passe par zéro et l'instant où l'impulsion est appliquée aux circuits d'amorçage.

- la tension V_{AB} étant positive, pourquoi le Th_2 ne s'amorce-t-il pas en recevant l'impulsion de commande ? pourquoi n'est-il nécessaire d'utiliser quatre thyristors pour ce pont ?
- Donner le plus correctement possible l'allure de l'oscillogramme : $U_{PN}(wt)$ avec $\alpha = \omega \frac{T}{12}$.
- Donner l'expression de U_{PN} moyenne.
- Calculer V_{PN} moyenne lorsque $\alpha = 0^\circ$.
- Pour quelle valeur de α la tension U_{PN} moyenne est égale à 169V.

Exercice N°3

Soit le montage redresseur représenté à la figure ci-dessous qui débite sur une charge du type résistive inductive ($R-L$) ; la valeur de la self est suffisamment grande pour supposer que le courant est sans ondulation.

- Dessiner en régime permanent la tension de charge, le courant de charge, la tension inverse aux bornes du thyristor et les courants du secondaire du transformateur.
- Calculer l'angle de retard à l'amorçage si le courant de charge moyen est égal à 7 A, et une puissance moyenne de charge de 0,5 KW.

Avec :

- ✚ Le thyristor reçoit l'impulsion de la gâchette avec un décalage de $\pi/2$ (*rad*).
- ✚ L'angle d'extinction du courant est égal à $3\pi/2$ (*rad*).
- ✚ Les tensions au secondaire du transformateur sont égales à $V_1(t) = 150 \sin wt$ (Volt),
 $V_2(t) = 150 \sin(wt - \pi)$ (Volt)
- ✚ La fréquence du réseau électrique est égale à 50 Hz.

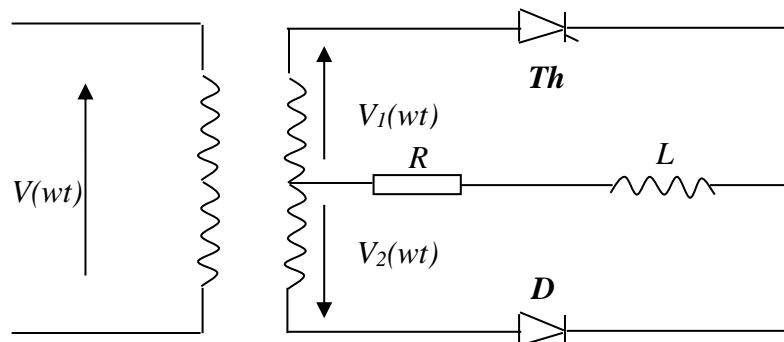


Figure 4.3.E

Exercice N°4

Considérons le schéma de montage redresseur suivant :

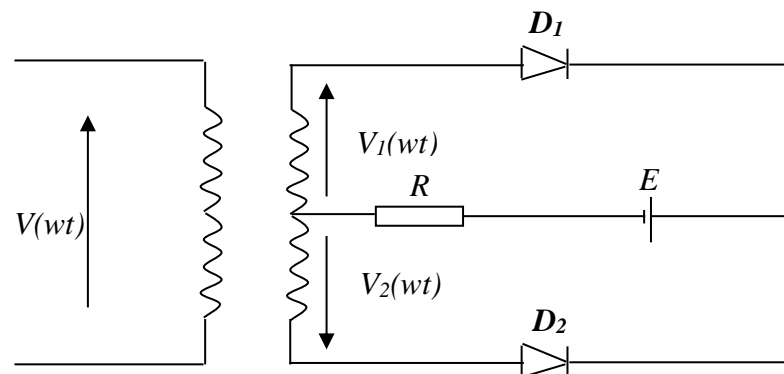


Figure 4.4.E

On dispose des informations suivantes :

$$V_1(wt) = 155 \sin(wt) \text{ (Volt).}$$

$$V_2(wt) = 155 \sin(wt - \pi) \text{ (Volt).}$$

$$E = 20V.$$

$$R = 10\Omega.$$

- Etablir l'expression de la tension aux bornes de la charge.
- Dessiner la tension aux bornes de la charge, le courant qui traverse la charge et la tension inverse aux bornes de la diode D_1 .
- Calculer la tension de charge moyenne et le courant de charge moyen.
- Donner la tension maximale appliquée aux bornes de la diode D_1

Exercice N°5

Soit un pont redresseur monophasé mixte (figure ci-après). La tension à la sortie du transformateur est égale à $100V$. Les composants semi-conducteurs sont parfaits ou idéaux. L'angle de retard à l'amorçage des thyristors est égal à $\pi/3$ (rad).

- Calculer la tension de charge moyenne et le courant de charge moyen.
- Dessiner $I_{th1}(wt)$, $I_{th2}(wt)$, $I_{D1}(wt)$ et $I_{D2}(wt)$.
- Calculer les courants $I_{th1\text{ moyen}}$ et $I_{th1\text{ efficace}}$.
- Les diodes D_1 et D_2 sont maintenant remplacées par des thyristors et la charge devient un moteur à courant continu avec $E=40V$. Tracer les formes d'ondes des courants $I_{Ch}(wt)$, $I_{Th1}(wt)$, $I_{Th2}(wt)$, $I_{Th3}(wt)$ et $I_{Th4}(wt)$.

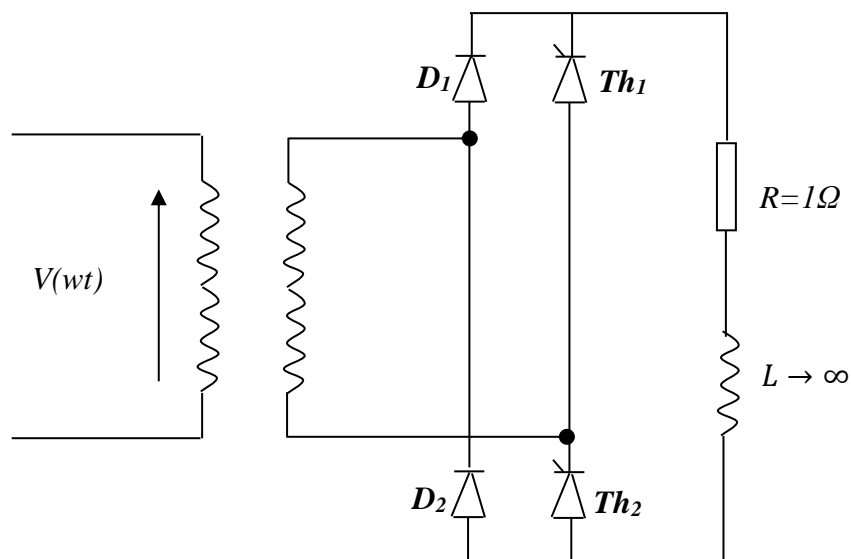


Figure 4.5.E

Exercice N°6

On alimente un moteur à courant continu par le montage représenté sur la figure 4.6. La tension d'alimentation a pour expression $V(wt) = \sqrt{2} 380 \sin wt$ (Volt). Les interrupteurs de

puissance des convertisseurs statiques sont supposés parfaits. La bobine L , supposée pure, présente une inductance suffisante pour que le courant qui la parcourt soit considéré comme constant.

- a) Calculer avec démonstration la valeur efficace de la tension appliquée entre M et N pour faire passer dans l'inducteur du moteur entre P et Q un courant de 75 A , supposé constant grâce à l'inductance de la bobine inductrice. La résistance de l'inducteur est égale à $0,2\ \Omega$.
- b) On commande les thyristors par une impulsion à l'instant $\frac{T}{6}$.
 - 1) Quel est celui qui amorce ? Pourquoi ?
 - 2) Tant que la tension V reste positive, quelle diode conduit ? Que devient la tension aux bornes C et D ?
 - 3) Le thyristor conducteur cesse-t-il de l'être quand V change de sens ? Que faut-il donc pour le bloquer ?
 - 4) Tracer les formes d'ondes de la tension aux bornes C et D , le courant qui traverse l'induit du moteur, les courants qui traversent les thyristors.
- c) Calculer la fem (E) du moteur sachant que le courant moyen qui traverse l'induit du moteur vaut 63 A et la résistance de l'induit est égale à $0,3\ \Omega$.

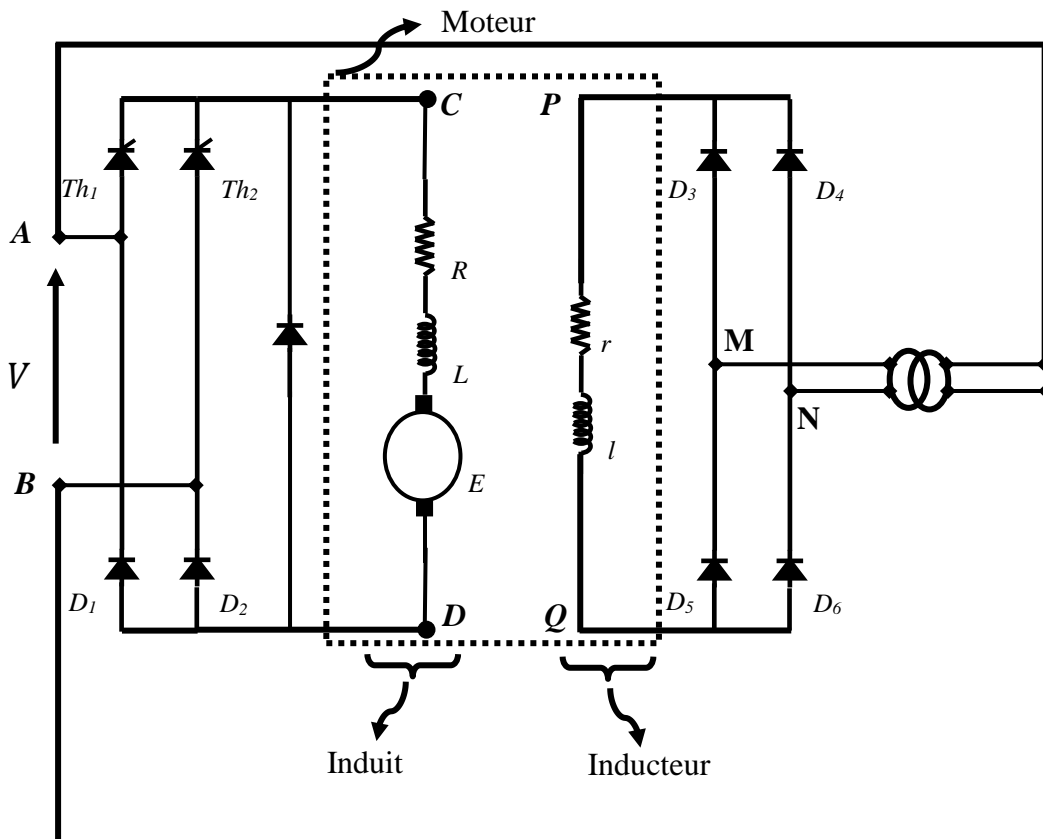


Figure 4.6.E

Solutions

Fiche de travaux dirigés N° 4

Redressement monophasé double alternance non commandé et commandé

Exercice N°1

- a) La bobine permet de réaliser la condition courant constant.
L'inductance de la bobine doit être de forte valeur ($L \rightarrow \infty$)
Elle est appelée bobine de lissage.
- b) Formes d'ondes

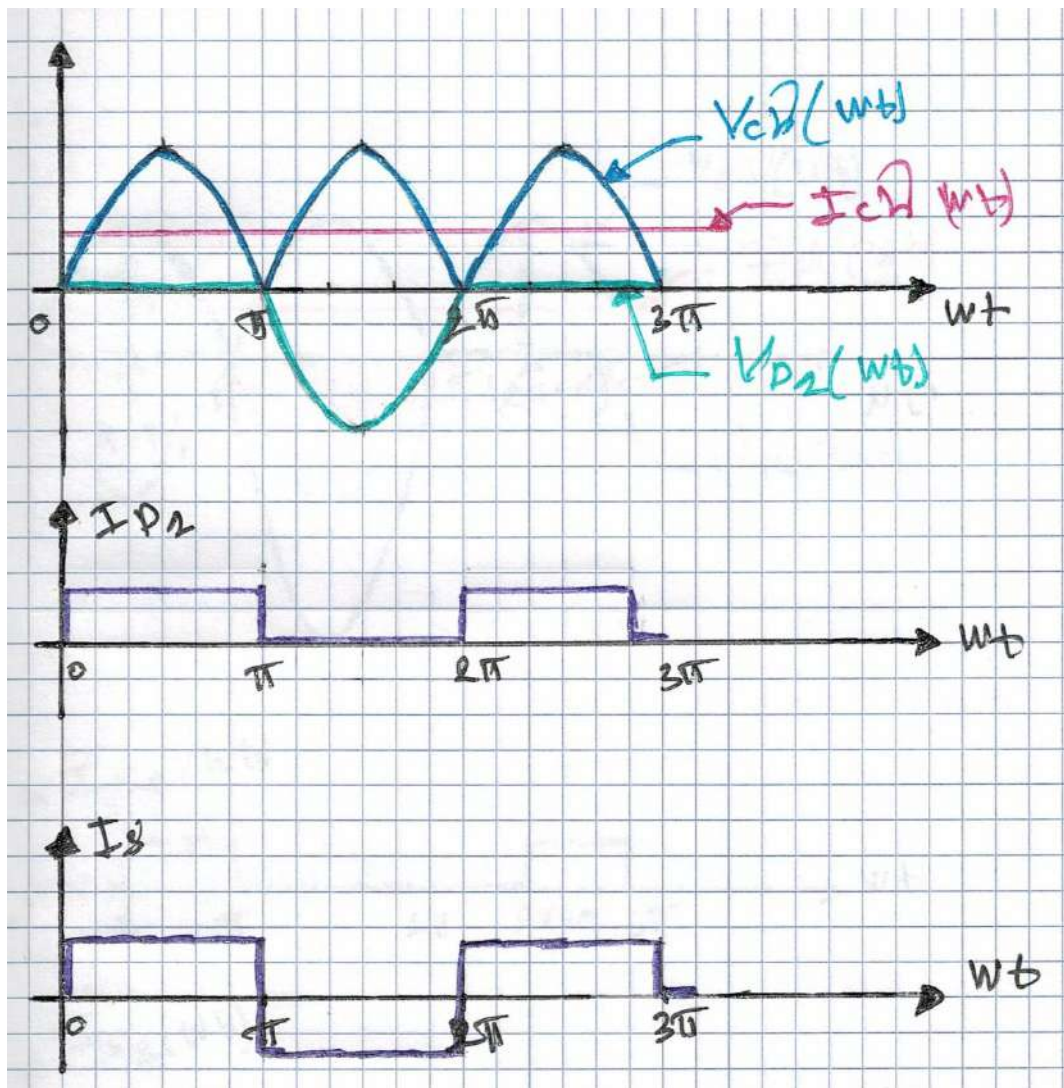


Figure 4.1.S

c) Calcul de la tension de charge moyenne

Pour calculer la tension moyenne de charge, on utilise la formule suivante :

$$\begin{aligned}V_{Ch \text{ moyenne}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{max} \sin wt \, dwt \\V_{Ch \text{ moyenne}} &= \frac{1}{2\pi} 2 \int_0^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt \\V_{Ch \text{ moyenne}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt = \frac{V_{max}}{\pi} 2 \\V_{Ch \text{ moyenne}} &= \frac{V_{max}}{\pi} [-\cos wt]_0^{\pi} = \frac{V_{max}}{\pi} 2\end{aligned}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{100}{\pi} 2 = 63,66 \, V$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 63,66 \, V$$

d) Calcul du courant moyen traversant la diode D_1

Le courant moyen qui traverse la diode D_1 est calculé à l'aide de la formule ci-après :

$$\begin{aligned}I_{D_1 \text{ moyen}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{D_1} (wt) \, dwt \\I_{D_1 \text{ moyen}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{Ch} (wt) \, dwt \\I_{D_1 \text{ moyen}} &= \frac{I_{Ch}}{2\pi} [-\cos wt]_0^{\pi} = \frac{I_{Ch}}{2}\end{aligned}$$

AN :

$$I_{D_1 \text{ moyen}} = \frac{2}{2} = 1 \, A$$

$$I_{D_1 \text{ moyen}} = 1 \, A$$

e) Calcul du courant I_S efficace

$$I_{S \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_S^2(\omega t) d\omega t}$$

$$I_{S \text{ efficace}}^2 = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^\pi I_{ch}^2(\omega t) d\omega t + \int_\pi^{2\pi} (-I_{ch}^2)(\omega t) d\omega t \right]$$

$$I_{S \text{ efficace}}^2 = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^\pi I_{ch}^2(\pi - 0) + \int_\pi^{2\pi} (-I_{ch}^2)(2\pi - \pi) d\omega t \right]$$

$$I_{S \text{ efficace}}^2 = \frac{I_{ch}^2}{2\pi} [\pi + 2\pi + \pi] = I_{ch}^2$$

$$I_{S \text{ efficace}} = \sqrt{I_{ch}^2}$$

AN :

$$I_{S \text{ efficace}} = I_{ch} = 2 \text{ A}$$

$$I_{S \text{ efficace}} = 2 \text{ A}$$

Exercice N°2

a)

Si la tension V_{AB} est positive, le thyristor Th_2 ne peut pas conduire car cela entraînerait une tension V_{AB} aux bornes de P et A , bloquant ainsi nécessairement la diode $D1$ et empêchant tout courant de circuler dans le circuit. Le thyristor Th_2 reste donc désamorçé. Cependant, le thyristor Th_1 s'amorce dans cette condition et amorce également la conduction de la diode $D2$ simultanément. Lorsque la tension U_{AB} devient négative, Th_2 s'amorce et $D1$ commence à conduire.

b) **Forme d'onde de U_{PN}**

Avant de tracer la forme d'onde, il est nécessaire de calculer l'angle d'amorçage des thyristors (α).

$$\begin{cases} \alpha = \omega \frac{T}{12} \\ \omega = \frac{2\pi}{T} \end{cases} \Rightarrow \alpha = \frac{T}{6} = \frac{\pi}{6} = 30^\circ$$

$$\alpha = \frac{T}{6} = \frac{\pi}{6} = 30^\circ$$

Lorsque Th_1 et $D2$ conduisent, U_{AB} est positive et $V_{PN} = V_{AB}$. Lorsque le courant s'annule Th_1 et $D2$ se bloquent, il faut attendre l'impulsion suivante pour que Th_2 et $D1$ soit passants.

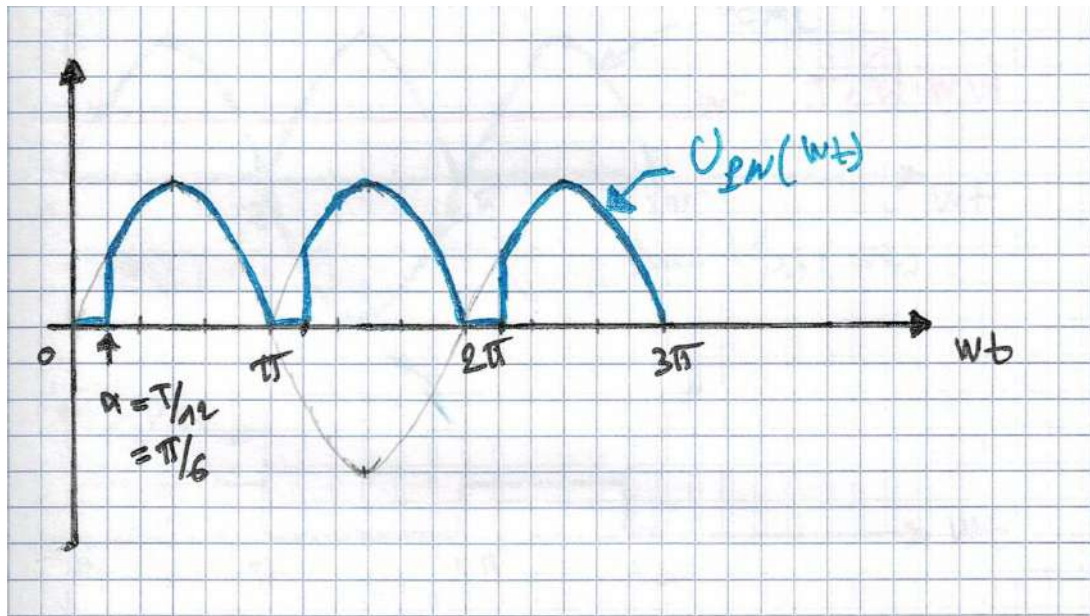


Figure 4.2.S

c) Expression de V_{PN} moyenne

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{2\pi} V_{max} \sin wt \, dwt$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{1}{2\pi} 2 \int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [-\cos wt]_{\alpha}^{\pi}$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

d) Calcul de V_{PN} moyenne pour un angle d'amorçage des thyristors qui est égal à 0°

$$\alpha = 0^\circ \Rightarrow \cos \alpha = 1$$

En remplace ce résultat dans l'équation trouvée dans la question précédente :

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + 1]$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{2 V_{max}}{\pi}$$

AN :

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{2 \cdot 220 \sqrt{2}}{\pi} = 198,17 \text{ V}$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = 198,17 \text{ V}$$

e) **Calcul de l'angle d'amorçage des thyristors pour une tension $V_{PN \text{ moyenne}}$ égale 169 V**

Le calcul de cette tension nécessite l'utilisation de l'expression trouvée dans la question C

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

$$V_{PN \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} + \frac{V_{max}}{\pi} \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{V_{PN \text{ moyenne}} - \frac{V_{max}}{\pi}}{\frac{V_{max}}{\pi}}$$

AN :

$$\cos \alpha = \frac{169 - \frac{220 \sqrt{2}}{\pi}}{\frac{220 \sqrt{2}}{\pi}} = 0,705$$

$$\cos \alpha = 1 \quad \Rightarrow \quad \alpha = 45,12^\circ$$

$$\alpha = 45,12^\circ$$

Exercice N°3

a) Formes d'ondes

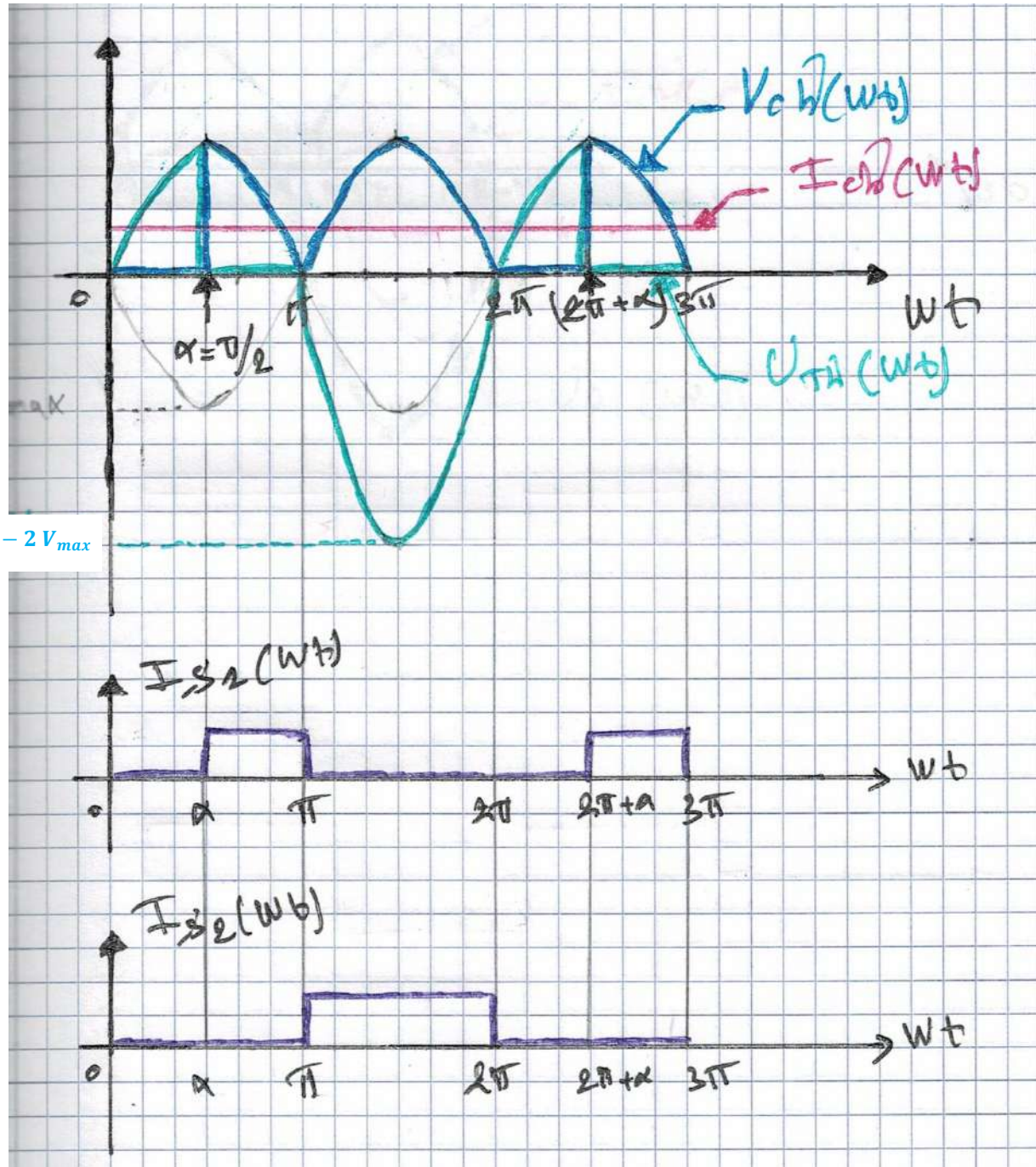


Figure 4.3.S

b) Calcul de l'angle de retard à l'amorçage du thyristor

À l'aide de la formule permettant le calcul de la puissance de charge moyenne, nous trouvons la valeur de la tension de charge moyenne. Puis, en utilisant cette tension, nous déterminons l'angle d'amorçage du thyristor.

Calcul de la tension de charge moyenne

$$P_{Ch\ moyenne} = V_{Ch\ moyenne} \times I_{Ch\ moyenne}$$

$$\Rightarrow V_{Ch\ moyenne} = \frac{P_{Ch\ moyenne}}{I_{Ch\ moyenne}}$$

AN :

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{0,5 \cdot 10^3}{7} = 71,43\ V$$

$$V_{Ch\ moyenne} = 71,43\ V$$

Calcul de l'angle de retard à l'amorçage

À partir de la forme d'onde de la tension de charge, nous obtenons l'expression permettant de calculer sa valeur moyenne.

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt + \int_{\pi}^{2\pi} V_{max} \sin (wt - \pi) \, dwt \right]$$

En notation mathématique, la fonction $\sin (wt - \pi)$ peut également s'écrire :

$$\sin (wt - \pi) = - \sin (wt)$$

Donc :

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt + \int_{\pi}^{2\pi} -V_{max} \sin (wt) \, dwt \right]$$

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{V_{max}}{2\pi} [[-\cos wt]_{\alpha}^{\pi} - [-\cos wt]_{\pi}^{2\pi}]$$

$$V_{Ch\ moyenne} = \frac{V_{max}}{2\pi} [3 + \cos \alpha]$$

$$\Rightarrow \cos \alpha = \frac{= 71,43 \times 2\pi}{V_{max}} - 3$$

AN :

$$\cos \alpha = \frac{V_{ch \text{ moyenne}} \times 2\pi}{150} - 3 = 2,99 - 3 = -0,01$$

$$\cos \alpha = -0,01 \Rightarrow \alpha = 90,75^\circ$$

$$\alpha = 90,75^\circ$$

Exercice N°4

a) Expression de la tension aux bornes de la charge

Afin de déterminer l'expression de la tension aux bornes de la charge, une analyse du fonctionnement de notre circuit est nécessaire.

$$\color{red}{\oplus} \quad 0 < \omega t < \pi$$

$$\text{Nous avons : } \begin{cases} V_1 > 0 \\ V_2 < 0 \end{cases}$$

Cela implique que la diode D_1 est en mode passant et que la diode D_2 est bloquée. La tension aux bornes de la charge est égale à la tension V_1 .

$$V_{Ch} = V_1$$

$$\color{red}{\oplus} \quad \pi < \omega t < 2\pi$$

$$\text{Nous avons : } \begin{cases} V_1 < 0 \\ V_2 > 0 \end{cases}$$

Ce constat indique que la diode D_1 est bloquée, tandis que la diode D_2 est en mode passant. Par conséquent, la tension aux bornes de la charge est égale à la tension V_2 .

$$V_{Ch} = V_2$$

b) Formes d'ondes

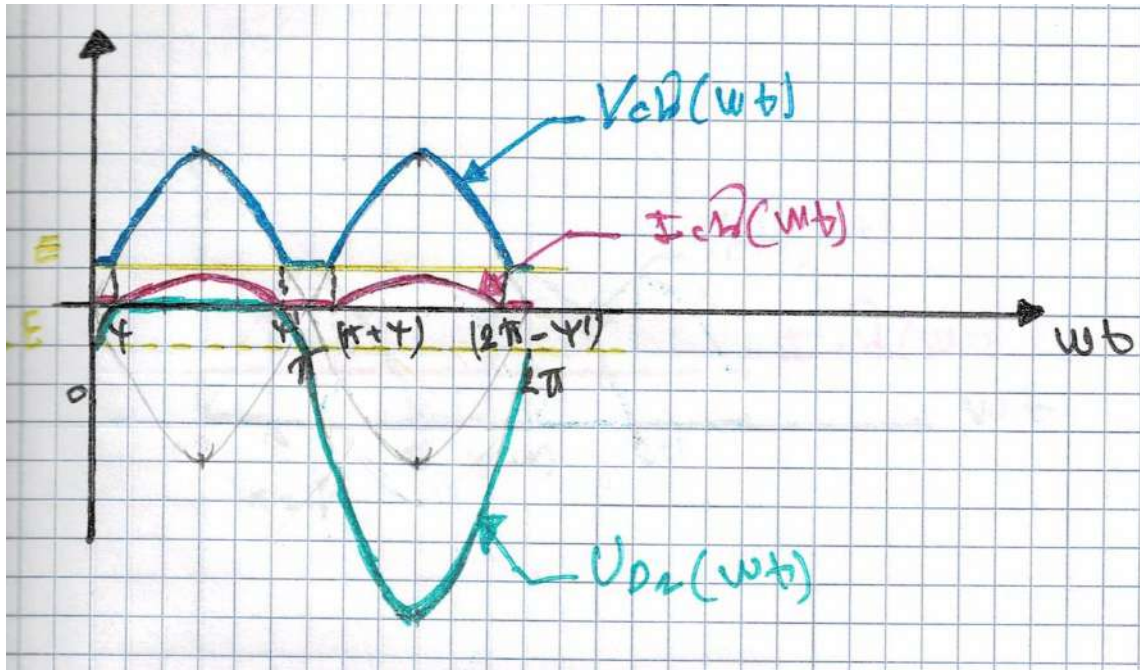


Figure 4.4.S

Afin de représenter graphiquement l'évolution de la tension aux bornes de la diode D_1 , il est nécessaire de trouver son équation lorsque la diode est en mode passant et lorsqu'elle est bloquée.

- ✚ La diode D_1 est passante dans l'intervalle $\psi < \omega t < \psi'$, ce qui entraîne une tension nulle aux bornes de la diode D_1 ($V_{D_1} = 0 V$).
- ✚ Au-delà de l'intervalle $\psi < \omega t < \psi'$, la diode D_1 est bloquée. En appliquant la loi des mailles, nous obtenons :

➤ Dans les intervalles $\begin{cases} 0 < \omega t < \psi \\ \psi' < \omega t < \pi + \psi \\ 2\pi - \psi' < \omega t < 2\pi \end{cases}$

$$V_1 - V_{D_1} - V_{Ch} = 0$$

$$\Rightarrow V_{D_1} = V_1 - V_{Ch}$$

Par ailleurs, on a :

$$\begin{cases} V_{Ch} = E + R I_{Ch} \\ I_{Ch} = 0 A \end{cases}$$

Finalement, on aboutit à :

$$V_{D1} = V_1 - E$$

➤ Dans l'intervalle $\pi - \psi < wt < 2\pi - \psi'$

$$V_1 - V_{D1} - V_{Ch} = 0$$

On a aussi :

$$\begin{cases} V_{Ch} = V_2 \\ V_2 = V_1 \end{cases}$$

A la fin, nous parvenons à :

$$V_{D1} = -2 V_1 = -2 V_{max}$$

c)

Calcul de la tension de charge moyenne

La formule utilisée pour calculer la tension de charge moyenne est la suivante :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 2 \left[\frac{1}{2\pi} \left(\int_0^\psi E \, dwt + \int_\psi^{\psi'} V_1 (wt) \, dwt + \int_{\psi'}^\pi E \, dwt \right) \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 2 \left[\frac{1}{2\pi} \left([E [wt]_0^\psi] + [V_{max}[-\cos wt]_\psi^{\psi'}] + [E [wt]_{\psi'}^\pi] \right) \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{\pi} [E \psi + V_{max}(-\cos \psi' + \cos \psi) + E (\pi - \psi')]]$$

En outre, nous avons :

$$\psi' = \pi - \psi$$

En substituant l'expression l'angle ψ' par son expression, nous trouvons :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{\pi} [(2 E \psi) + V_{max}(-\cos(\pi - \psi) + \cos \psi)]$$

Calcul de l'angle ψ

$$\psi = \arcsin \frac{E}{V_{max}}$$

AN :

$$\psi = \arcsin \frac{20}{155} = 7,2^\circ$$

$$\psi = 7,2^\circ$$

En remplaçant les valeurs des grandeurs V_{max} , E , et ψ , on trouve que la tension moyenne de charge est égale à 99,5 V

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 99,5 \text{ V}$$

Calcul du courant de charge moyen

Le courant de charge moyen est calculé en utilisant la formule ci-après :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}} - E}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{99,5 - 20}{10} = 7,9 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 7,9 \text{ A}$$

d) Tension maximale appliquée aux bornes de la diode D_1

Pour déterminer la tension maximale appliquée aux bornes de la diode D_1 , il est nécessaire d'utiliser l'équation trouvée dans la question c.

$$V_{D_1} = V_1 - E$$

Du fait que :

$$\begin{cases} V_{1 \text{ max}} = -155 \text{ V} \\ E = 20 \text{ V} \end{cases}$$

AN :

$$V_{D_1} = -155 - 20 = -175 \text{ V}$$

$$V_{D_1} = -175 \text{ V}$$

Exercice N°5

a) Calcul de la tension de charge moyenne et du courant de charge moyen

Pour effectuer le calcul la tension de charge moyenne et le courant de charge moyen, il est nécessaire de tracer leurs formes d'ondes.

Formes d'ondes

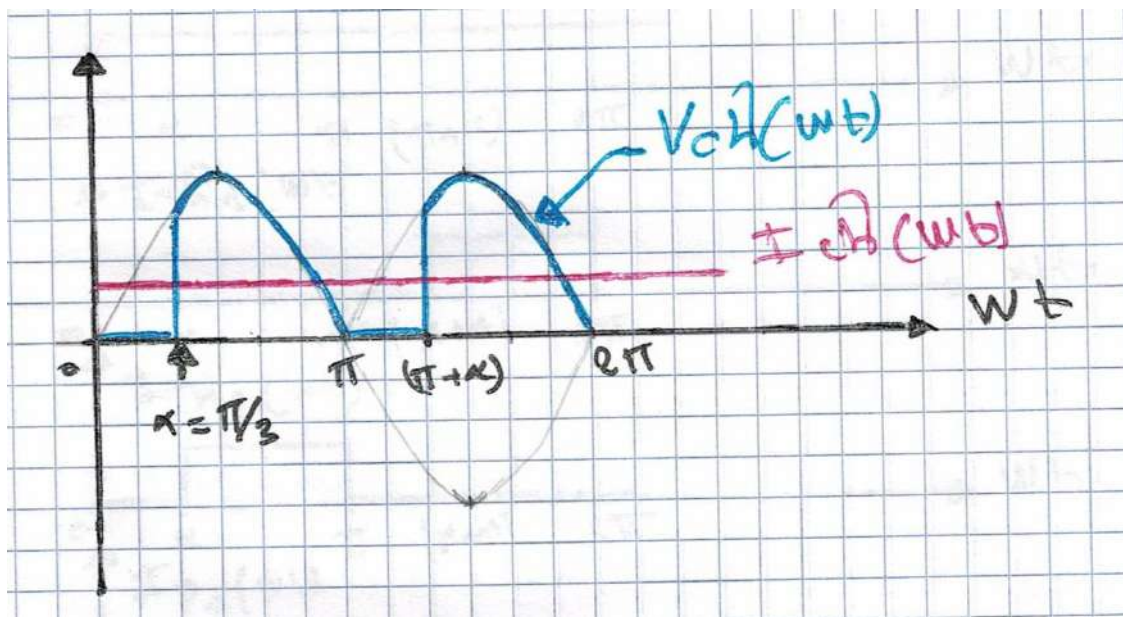


Figure 4.5.S

Calcul de la tension de charge moyenne

La formule employée pour le calcul de la tension moyenne de charge est la suivante :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{max} \sin \omega t \, d\omega t$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\alpha} V_{max} \sin \omega t \, d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} V_{max} \sin \omega t \, d\omega t \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{2\pi} \left[2 \left(\int_0^{\alpha} V_{max} \sin \omega t \, d\omega t \right) \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} ([-\cos \omega t]_0^{\alpha})$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

AN :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{100\sqrt{2}}{\pi} (1 + 0,5) = 47,74 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 47,74 \text{ V}$$

Calcul du courant de charge moyen

Pour obtenir le courant de charge moyen, on utilise la formule ci-dessous :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}}}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{47,74}{1} = 47,74 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 47,74 \text{ A}$$

b) Formes d'ondes

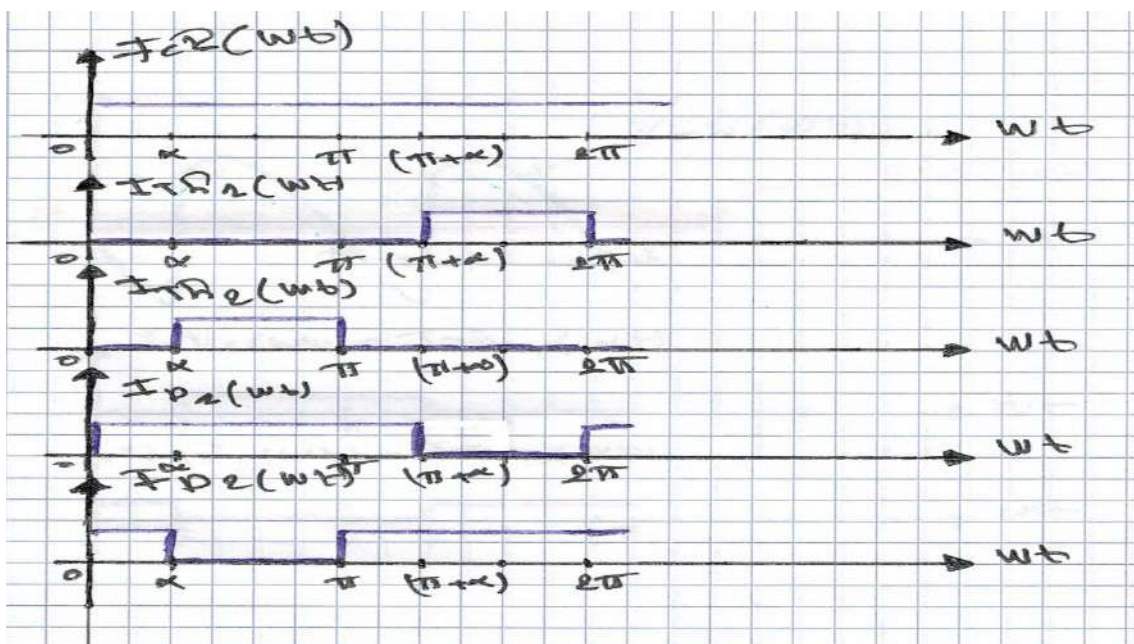


Figure 4.6.S

c) Calcul des courants $I_{Th1 \text{ moyen}}$ et $I_{Th1 \text{ efficace}}$

En se basant sur la forme d'onde du courant I_{th1} illustrée sur la figure 4.5, il est possible de calculer ses valeurs moyenne et efficace."

✚ Calcul du courant $I_{th1 \text{ moyen}}$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{Ch \text{ moyen}}(wt) dt$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I_{Ch \text{ moyen}} dt$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{2\pi} [2\pi - (\pi + \alpha)]$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{2\pi} \left[2\pi - \left(\pi + \frac{\pi}{3} \right) \right]$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{2\pi} \left[2\pi - \frac{4\pi}{3} \right]$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{3}$$

AN :

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{47,74}{3} = 15,91 \text{ A}$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = 15,91 \text{ A}$$

✚ Calcul du courant $I_{th1 \text{ efficace}}$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{Ch \text{ moyen}}^2 (wt) dt}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I_{Ch \text{ moyen}}^2 (wt) dt}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{I_{Ch \text{ moyen}}^2}{2\pi} [2\pi - (\pi + \alpha)]}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{I_{Ch \text{ moyen}}^2}{2\pi} \left[2\pi - \frac{4\pi}{3} \right]}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{I_{Ch \text{ moyen}}^2}{3}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{\sqrt{3}}$$

AN :

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \frac{47,74}{\sqrt{3}} = 27,56 \text{ A}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = 27,56 \text{ A}$$

d) Formes d'ondes

Avant de tracer les formes d'ondes, il est nécessaire de vérifier la condition d'amorçage des thyristors. Les thyristors deviennent passants seulement si $\alpha > \psi$.

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\pi}{3} \\ \psi = \arcsin \frac{40}{100\sqrt{2}} = 14.42^\circ \end{cases} \Rightarrow \alpha > \psi$$

La condition est vérifiée, et les thyristors s'amorcent.

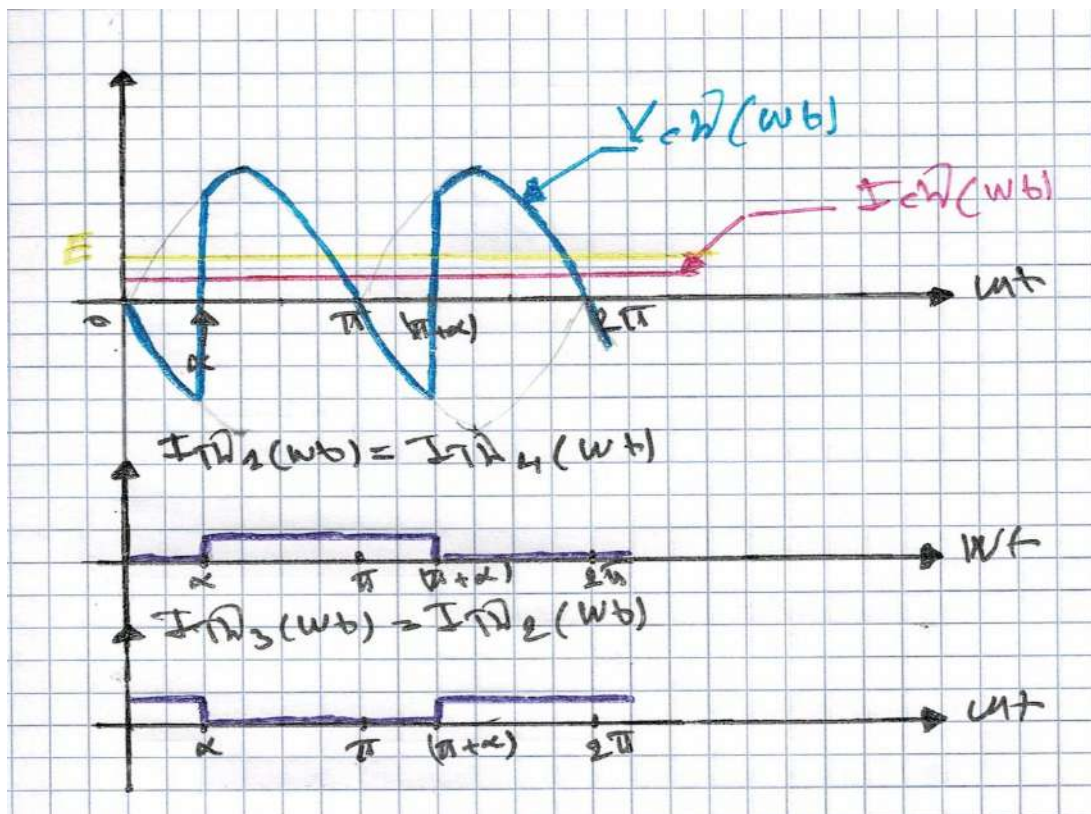


Figure 4.7.S

Exercice N°6

a) Calcul de la valeur efficace de la tension appliquée entre M et N

Pour calculer la tension efficace aux bornes M et N , nous suivons la méthode suivante. Tout d'abord, nous calculons la tension moyenne aux bornes P et Q (tension à la sortie du pont redresseur) en utilisant le courant moyen traversant l'inducteur et la résistance r (loi d'Ohm). Ensuite, en appliquant la formule correspondant à la tension moyenne relative à un pont redresseur non commandé $PD2$, nous déterminons la tension efficace aux bornes M et N .

Calcul de la tension moyenne aux bornes P et Q

La tension moyenne aux bornes P et Q pour le pont redresseur non commandé $PD2$ qui alimente l'inducteur est exprimée par l'équation suivante :

$$V_{PQ \text{ moyenne}} = r I_{PQ \text{ moyen}}$$

AN :

$$V_{PQ \text{ moyenne}} = 0,2 \times 75 = 15 \text{ V}$$

$$V_{PQ \text{ moyenne}} = 15 \text{ V}$$

Calcul de la tension efficace aux bornes M et N

La tension moyenne aux bornes P et Q est également égale à :

$$V_{PQ \text{ moyenne}} = \frac{2 V_{max}}{\pi}$$

A partir de cette dernière équation, on peut déterminer la tension V_{max} .

$$V_{max} = \frac{V_{PQ \text{ moyenne}} \pi}{2}$$

AN :

$$V_{max} = \frac{15 \pi}{2} = 23,6 \text{ V}$$

$$V_{max} = 23,6 \text{ V}$$

La tension efficace appliquée entre M et N est égale au quotient la tension maximale et la valeur de $\sqrt{2}$.

$$V_{MN \text{ efficace}} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

AN :

$$V_{MN \text{ efficace}} = \frac{23,6}{\sqrt{2}} = 16,69 \text{ V}$$

$$V_{MN \text{ efficace}} = 16,69 \text{ V}$$

b) On commande les thyristors par une impulsion à l'instant $\frac{T}{6}$.

- 1) A l'instant $\frac{T}{6}$ la tension d'alimentation V est positive donc c'est le thyristor Th_1 qui conduit.
- 2) Tant que la tension d'alimentation V reste positive, c'est la diode D_2 qui conduit.

La tension aux bornes C et D est égale à la tension d'alimentation.

$$V_{CD} = V = V_{AB}$$

- 3) Contrairement à une charge résistive ou le courant s'annulait en même temps que la tension, sur une charge inductive le courant garde le même sens même lorsque la tension d'alimentation s'inverse.

Par conséquent le thyristor reste en mode de conduction.

Afin de bloquer le thyristor en mode de conduction, il est nécessaire débloquent l'autre thyristor.

4) Formes d'ondes

Les thyristors reçoivent une impulsion de commande à l'instant $T/6$.

$$\alpha = \frac{T}{6} = \frac{\pi}{3} \text{ rad} = 60^\circ$$

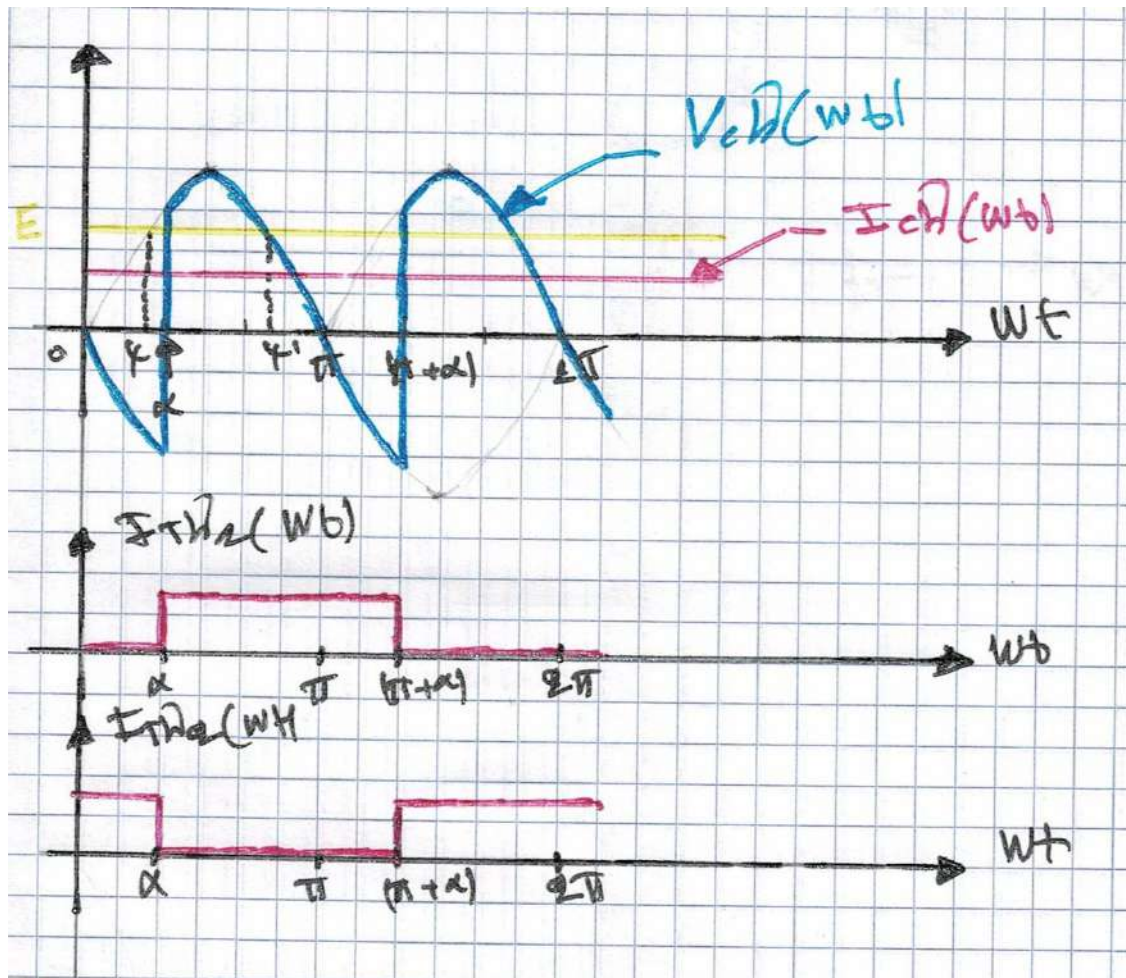


Figure 4.8.S

c) Calcul de la fem (E) du moteur

La détermination de la force électromotrice du moteur se fait en calculant la tension moyenne aux bornes C et D. Cette tension possède deux expressions distinctes : la première est déduite du circuit en utilisant la loi des mailles, tandis que la deuxième correspond à la tension moyenne de sortie du pont redresseur PD2 mixte dans notre circuit.

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \begin{cases} E + R I_{CD \text{ moyen}} \\ \frac{1}{2\pi} \left[2 \left(\int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi+\frac{\pi}{3}} V_{max} \sin wt \, dwt \right) \right] \end{cases}$$

On calcule d'abord la tension moyenne aux bornes C et D en utilisant la deuxième expression. Ensuite, en remplaçant le résultat de la tension moyenne aux bornes C et D dans la première expression, on détermine la force électromotrice.

Calcul de la tension moyenne aux bornes C et D

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \frac{1}{2\pi} \left[2 \left(\int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi+\frac{\pi}{3}} V_{max} \sin wt \, dwt \right) \right]$$

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} \left(\int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi+\frac{\pi}{3}} \sin wt \, dwt \right)$$

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \frac{V_{max}}{\pi} \left([-\cos wt]_{\frac{\pi}{3}}^{\pi+\frac{\pi}{3}} \right)$$

AN :

$$V_{CD \text{ moyenne}} = \frac{380 \sqrt{2}}{\pi} \left([-\cos wt]_{\frac{\pi}{3}}^{4\pi/3} \right) = 171 \text{ V}$$

$$V_{CD \text{ moyenne}} = 171 \text{ V}$$

Calcul de la force électromotrice E

$$V_{CD \text{ moyenne}} = E + R I_{CD \text{ moyen}}$$

$$E = V_{CD \text{ moyenne}} - R I_{CD \text{ moyen}}$$

AN :

$$V_{CD \text{ moyenne}} = 171 - 0,3 \times 63 = 152,16 \text{ V}$$

$$V_{CD \text{ moyenne}} = 152,16 \text{ V}$$

FICHE DE TD N°5

Redressement triphasé commandé et non commandé

Objectifs

- + *Comprendre le fonctionnement des montages redresseurs triphasés P3 et PD3.*
- + *Examiner l'évolution des paramètres de sortie du pont redresseur triphasé ainsi que celle des paramètres associés aux interrupteurs de puissance (diode, thyristor).*
- + *Etudier l'influence des différentes charges sur l'évolution des paramètres de sortie du pont redresseur triphasé.*

Enoncés

Fiche de travaux dirigés N° 5

Redressement triphasé non commandé et commandé

Exercice N°1

Un montage redresseur triphasé commandé de type parallèle est alimenté par une source de tension sinusoïdale de 12 V , 50 Hz . Ce montage est utilisé pour charger une batterie de fem (E) égale à 12 V et de résistance interne $0,1\ \Omega$. Les thyristors sont supposés parfaits et de même caractéristiques. La source d'alimentation est équilibrée.

- Donner le schéma du montage.
- Calculer les angles d'amorçage.
- Tracer la forme d'onde de la tension aux bornes de la batterie.

Exercice N°2

Un variateur de vitesse d'un moteur est constitué d'un redresseur qui permet d'obtenir une tension continue à partir du réseau de SONELGAZ. La figure ci-après représente le pont redresseur à diodes du variateur de vitesse. v_1 , v_2 et v_3 sont les 3 tensions simples du réseau de valeur efficace $V = 230\text{V}$. Les 6 diodes du pont sont supposées idéales. On suppose que le courant i dans la charge est tel que $i = I = \text{constante}$.

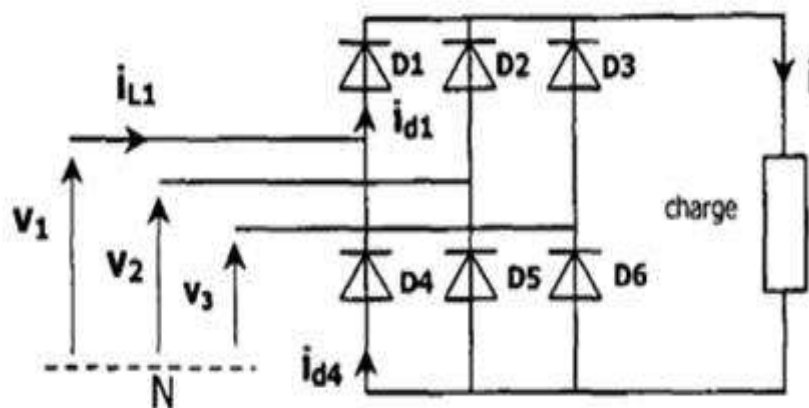


Figure 5.1.E

- Représenter les intervalles de conduction des diodes pour une période.
- Représenter pour un intervalle de temps égal à une période tracé les formes d'ondes:
 - ✚ La tension et le courant de la charge.
 - ✚ La tension aux bornes de la diode D_1 .
 - ✚ le courant de ligne i_{L1} .

- c) Calculer la tension de charge moyenne.
- d) Calculer le taux d'ondulation de la tension et le courant de la charge.

Exercice N°3

Nous souhaitons fournir une alimentation en courant continu à une charge de type RL . La figure ci-après montre le schéma synoptique de cette alimentation avec la charge.

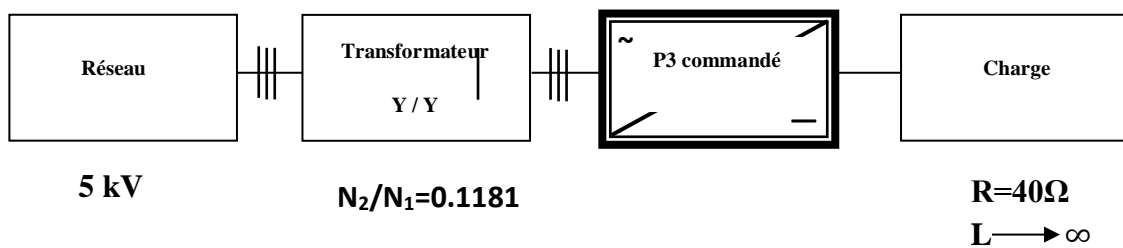


Figure 5.2.E

- a) Donner le schéma du montage.
- b) Si $\alpha=0^\circ$ calculer la tension de charge moyenne.
- c) Si $\alpha=\pi/6$ (rad) tracer les formes d'ondes de la tension aux bornes de la charge, le courant qui la traverse la charge et le courant la deuxième phase du secondaire.
- d) Si on ajoute une diode de roue libre au montage(DRL), déterminer le courant moyen qui traverse le thyristor relié avec la deuxième phase du secondaire et le courant moyen qui traverse la DRL.

Exercice N°4

Soit un montage $P3$ (simple voie) à trois diodes parfaites alimente une charge résistive de valeur égale à 1Ω et dont le fusible mis en série avec la diode D_3 (voir figure ci-dessous) est grillé.

- a) Tracer les formes d'ondes de la tension de charge, courant de charge et calculer leurs valeurs moyennes dans cette situation.
- b) Calculer le courant moyen traversant chaque diode.
- c) Si on ajoute une diode de récupération à ce montage, calculer le courant moyen qui traverse la charge et le courant qui traverse la diode de récupération.

Avec :

$$V_1(wt) = 100\sqrt{2} \sin wt \quad (\text{Volt})$$

$$V_2(wt) = 100\sqrt{2} \sin (wt-120^\circ) \quad (\text{Volt})$$

$$V_3(wt) = 100\sqrt{2} \sin (wt-240^\circ) \quad (\text{Volt})$$

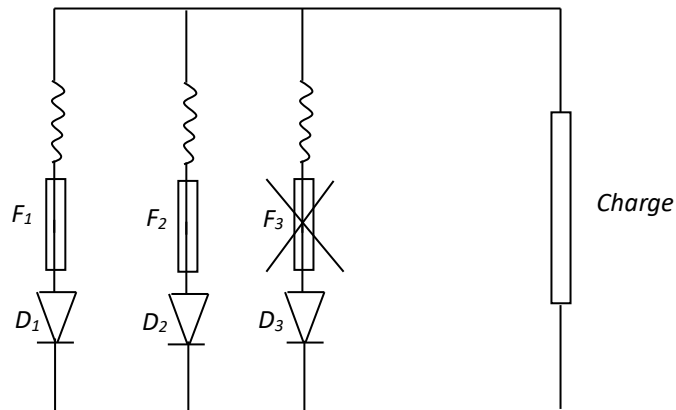


Figure 5.2.E

Exercice N°5

Soit le schéma synoptique suivant :

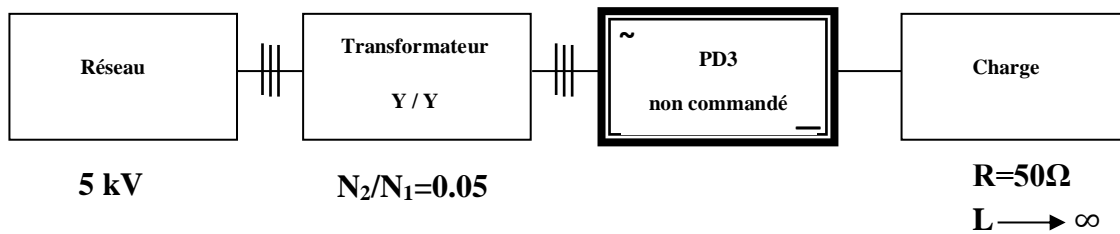


Figure 5.3.E

- Donner le schéma du montage.
- Tracer les formes d'ondes de la tension de charge, courant de charge, courant de la deuxième phase du secondaire du transformateur et le courant qui traverse la diode reliée avec la troisième phase à cathode commune.
- Calculer la tension de charge moyenne et le courant de charge moyen.
- Calculer le rendement du montage sachant que la tension de seuil d'une diode est égale à 0.7 V et que la résistance dynamique vaut 0.05Ω .

Solutions

Fiche de travaux dirigés N° 5

Redressement triphasé non commandé et commandé

Exercice N°1

a) Schéma du montage

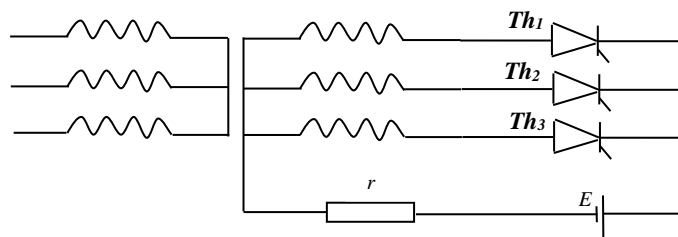


Figure 5.1.S

b) Calcul des angles d'amorçage des thyristors

Le premier thyristor (Th_1) ne peut être amorcé qu'à partir du moment :

$$V_{max} \sin wt = E$$

\Rightarrow

$$wt = \text{arc sin} \frac{E}{V_{max}}$$

AN :

$$wt = \text{arc sin} \frac{12}{12\sqrt{2}} = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$$

$$\alpha_1 = wt = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$$

$$\alpha_1 = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$$

La source d'alimentation est équilibrée, ce qui implique que les tensions et les courants sont répartis uniformément entre les différentes branches. De plus, les angles de retard d'amorçage des thyristors sont également égaux.

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$$

c) **Forme d'onde de la tension aux bornes de la batterie**

Le retard est compté par rapport à la commutation naturelle des diodes qui est égale à $\frac{\pi}{6}$ rad.

Les thyristors s'amorce réellement à partir de $(\frac{\pi}{6} + \alpha)$.

$$\frac{\pi}{6} + \alpha = 60^\circ + 45^\circ = 75^\circ$$

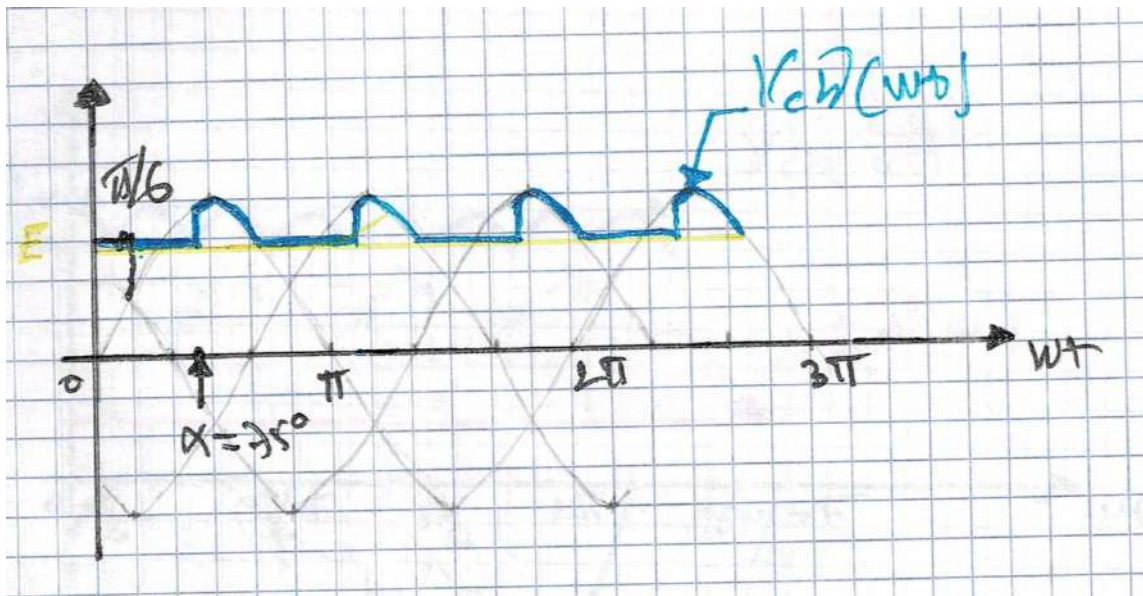


Figure 5.2.S

Exercice N°2

a) **Les intervalles de conduction des diodes**

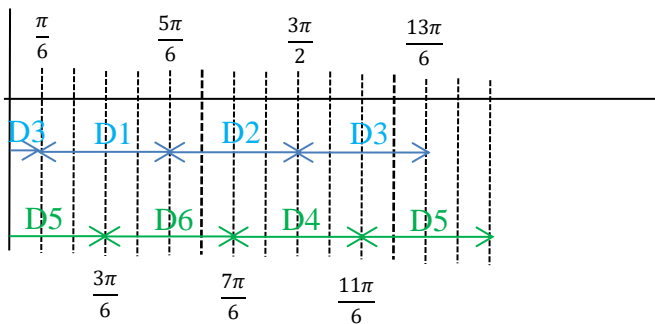


Figure 5.3.S

b) Formes d'ondes

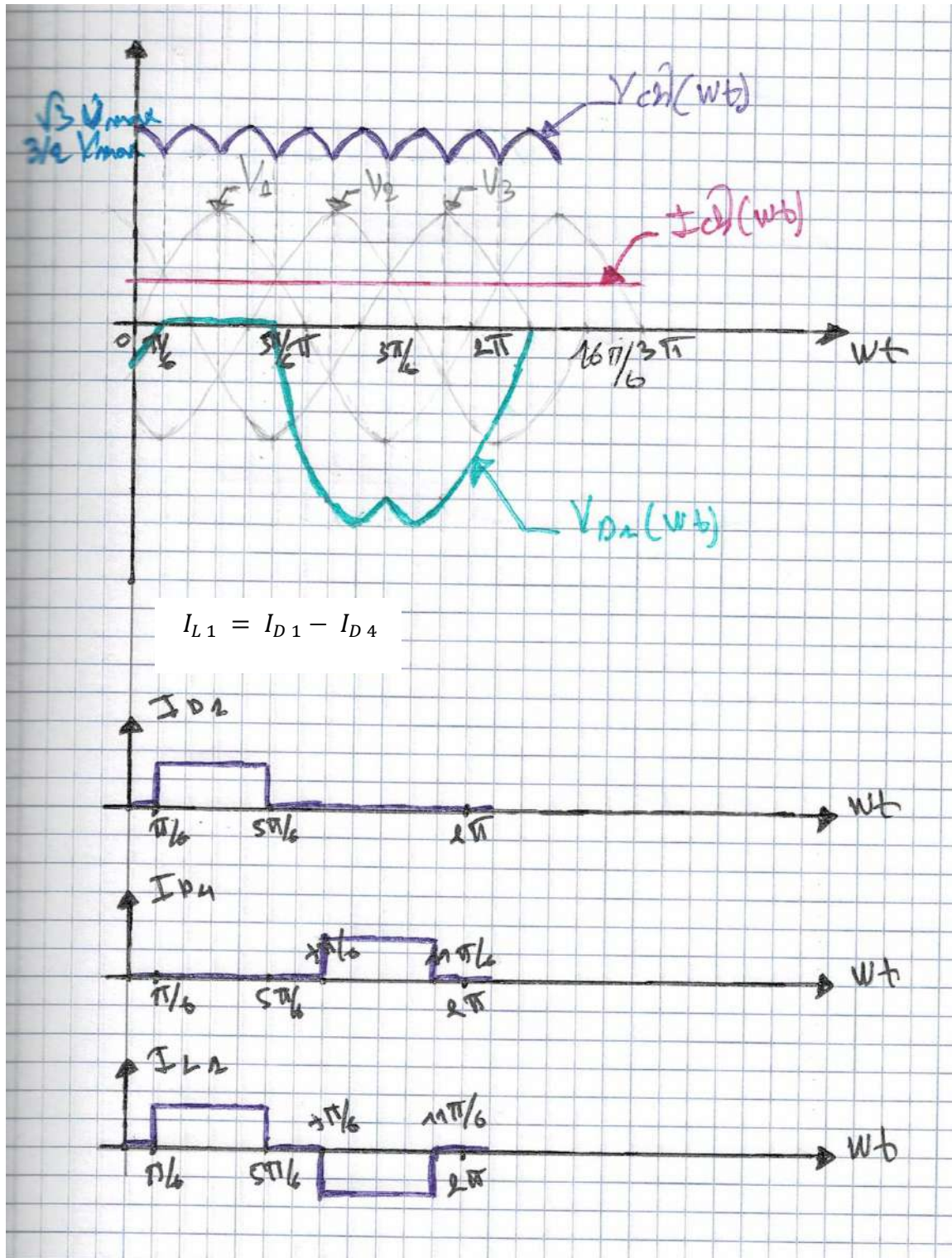


Figure 5.4.S

c) Calcul de la tension de charge moyenne

La formule permettant de calculer la tension de charge moyenne pour un montage *PD3* non commandé est la suivante :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{3 \sqrt{3} V_{max}}{\pi}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{3 \sqrt{3} 230 \sqrt{2}}{\pi} = 538,16 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 538,16 \text{ V}$$

d) Calcul du taux d'ondulation

✚ Courant de charge

Le courant de charge est constant (sans ondulation), cela implique que le taux d'ondulation est égal à zéro ($\beta = 0 \%$).

$$\beta = 0 \%$$

✚ Tension de charge

La formule qui permet le calcul du taux d'ondulation relatif à la tension est :

$$\beta = \frac{V_{Ch \text{ max}} - V_{Ch \text{ min}}}{2 V_{Ch \text{ moyenne}}}$$

Les valeurs maximale ($V_{Ch \text{ max}}$) et minimale ($V_{Ch \text{ min}}$) de la tension de charge sont obtenues en observant la forme d'onde de la tension.

$$V_{Ch \text{ max}} = \sqrt{3} V_{max}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ max}} = \sqrt{3} \sqrt{2} 230 = 563,28 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ max}} = 563,28 \text{ V}$$

$$V_{Ch \ min} = \frac{3}{2} V_{max}$$

AN :

$$V_{Ch \ min} = \frac{3}{2} \sqrt{2} 230 = 487,90 \text{ V}$$

$$V_{Ch \ max} = 487,90 \text{ V}$$

Finalement, nous obtenons que le taux d'ondulation qui correspondant à la tension de charge est égal à 7 %.

$$\beta = 7 \%$$

Exercice N°3

a) Schéma du montage

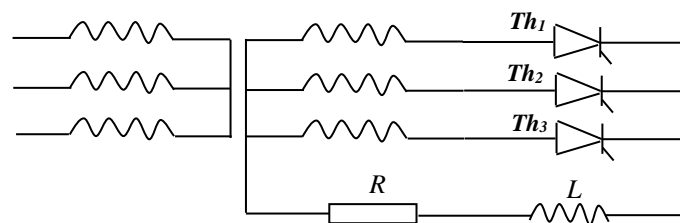


Figure 5.5.S

b) Calcul de la tension de charge moyenne pour $\alpha=0^\circ$

La formule qui permet de calculer la tension de charge moyenne pour un montage P3 commandé est:

$$V_{Ch \ moyenne} = \frac{3 \sqrt{3} V_{max}}{2\pi} \cos \alpha$$

La valeur de la tension du secondaire du transformateur est inconnue (V_{max}). Pour déterminer cette valeur, il est nécessaire d'utiliser la formule du rapport du transformateur.

$$k = \frac{V_S}{V_P} = \frac{V_{max}}{V_P}$$

Avec :

V_S : La tension au secondaire du transformateur.

V_P : La tension au primaire du transformateur.

$$V_{max} = k V_P$$

AN :

$$V_{max} = \frac{0,1185 \ 5000 \ \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 482 \ V$$

$$V_{max} = 482 \ V$$

En substituant la tension maximale dans la formule de calcul de la tension de charge moyenne, nous obtenons une valeur de 400 V.

$$V_{Ch \ moyenne} = 400 \ V$$

c) Formes d'ondes pour $\alpha = \pi/6 \ rad$

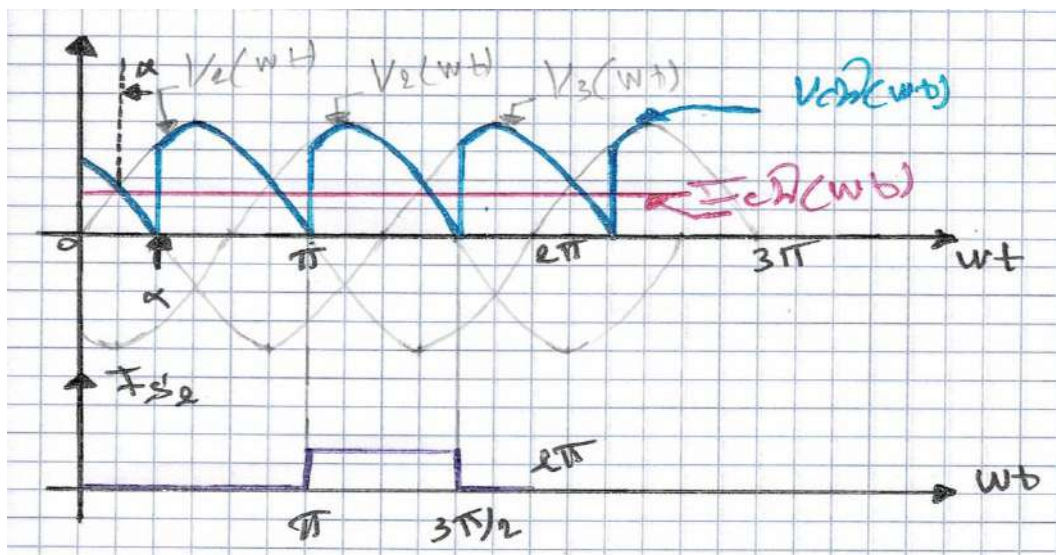


Figure 5.6.S

d)

La diode de roue libre (*DRL*) n'a aucun impact sur ce montage en raison de la polarité positive de la tension de charge. Cela signifie que la présence de la *DRL* n'affecte pas les valeurs de la tension de charge moyenne et du courant de charge moyen, qui restent inchangées.

Calcul des courants

✚ Le courant moyen qui traverse la *DRL*

Puisque la *DRL* n'a aucun impact sur le montage en question, cela signifie que le courant qui la traverse est nul.

$$I_{DRL \text{ moyen}} = 0 \text{ A}$$

✚ Le courant moyen qui traverse le thyristor relié avec la deuxième phase

Pour déterminer ce courant, il est nécessaire de calculer la tension de charge moyenne et le courant de charge moyen.

Calcul de la tension de charge moyenne

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{3 \sqrt{3} V_{max}}{2\pi} \cos \alpha$$

AN :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{3 \sqrt{3} 482}{2\pi} \cos (\pi/6) = 346,60 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 346,60 \text{ V}$$

Calcul du courant de charge moyen

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}}}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{346,60}{40} = 8,66 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 8,66 \text{ A}$$

Dans un montage *P3* le courant qui traverse le thyristor est égal au courant de sortie du transformateur (I_S).

$$I_{S \text{ moyen}} = I_{Th \text{ moyen}}$$

Étant donné que le réseau utilisé pour alimenter le montage redresseur $P3$ est équilibré, cela signifie que les courants qui parcourent thyristors sont égaux. Ainsi, le courant qui traverse un seul thyristor est égal au courant de charge moyen divisé par trois.

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = I_{Th2 \text{ moyen}} = I_{Th3 \text{ moyen}}$$

et
$$I_{Th \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{3}$$

On utilisant ces trois derniers résultats on trouve que courant moyen qui traverse le thyristor relié avec la deuxième phase est égal à :

$$I_{S2 \text{ moyen}} = I_{Th2 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{3}$$

AN :

$$I_{S2 \text{ moyen}} = \frac{8,66}{3} = 2,89 \text{ A}$$

$$I_{S2 \text{ moyen}} = 2,89 \text{ A}$$

Exercice N°4

a) Formes d'ondes

Étant donné que le fusible F_3 , qui est en lien avec la diode D_3 , est grillé, cela signifie que le courant qui traverse cette diode est nul.

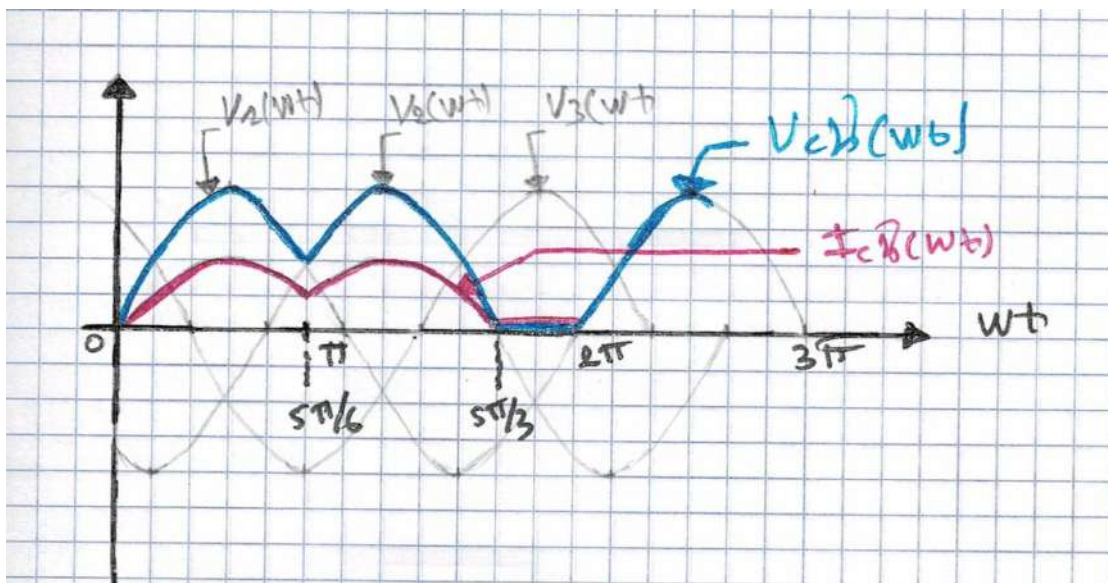


Figure 5.7.S

Calcul de la tension de charge moyenne

La formule utilisée pour le calcul de la tension de charge moyenne est la suivante :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{5\pi/6} V_{1 \text{ max}} \sin wt \, dwt \right]$$
$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{V_{1 \text{ max}}}{\pi} [-\cos wt]_0^{5\pi/6}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{100 \sqrt{2}}{\pi} [0,866 + 1] = 84 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 84 \text{ V}$$

Calcul du courant de charge moyen

Pour déterminer le courant moyen de charge, on utilise la formule suivante :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}}}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{84}{1} = 84 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 84 \text{ A}$$

b) Calcul des courants moyens traversant chaque diode

En se basant sur la forme de la courbe du courant de charge, on peut calculer les valeurs moyennes des courants traversant chaque diode de la manière suivante.

Courant moyen traversant la diode D_1

$$I_{D1 \text{ moyen}} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{5\pi/6} \frac{V_{1 \text{ max}}}{R} \sin wt \, dwt \right]$$
$$I_{D1 \text{ moyen}} = \frac{V_{1 \text{ max}}}{2\pi R} [-\cos wt]_0^{5\pi/6} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{2}$$

AN :

$$I_{D1 \text{ moyen}} = \frac{84}{2} = 42 \text{ A}$$

$$I_{D1 \text{ moyen}} = 42 \text{ A}$$

✚ Courant moyen traversant la diode D_2

$$I_{D2 \text{ moyen}} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{5\pi/6}^{5\pi/3} \frac{V_2 \text{ max}}{R} \sin wt \, dwt \right]$$

$$I_{D2 \text{ moyen}} = \frac{V_2 \text{ max}}{2\pi R} [-\cos wt]_{5\pi/6}^{5\pi/3} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{2}$$

AN :

$$I_{D2 \text{ moyen}} = \frac{84}{2} = 42 \text{ A}$$

$$I_{D2 \text{ moyen}} = 42 \text{ A}$$

✚ Courant moyen traversant la diode D_3

Du fait que le fusible F_3 est grillé, il en découle que le courant moyen traversant la diode D_3 est nul.

$$I_{D3 \text{ moyen}} = 0 \text{ A}$$

c)

Étant donné que la tension de charge est positive, la diode de récupération (*DRL*) n'a aucun rôle à jouer dans ce montage. Par conséquent, la *DRL* reste inactive et n'affecte pas le fonctionnement du montage. Les valeurs des grandeurs de la tension de charge moyenne et du courant de charge moyen restent inchangées, et le courant moyen traversant la *DRL* est nul.

$$I_{DRL \text{ moyen}} = 0 \text{ A}$$

et

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 84 \text{ A}$$

Exercice N°5

a) Schéma du montage

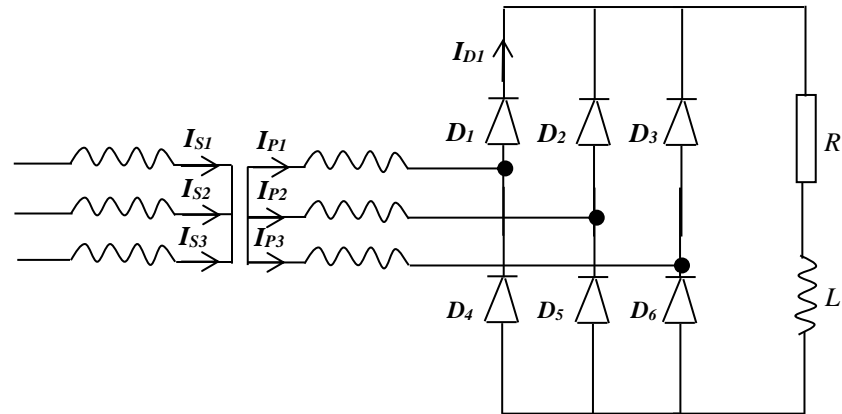


Figure 5.8.S

b) Formes d'ondes

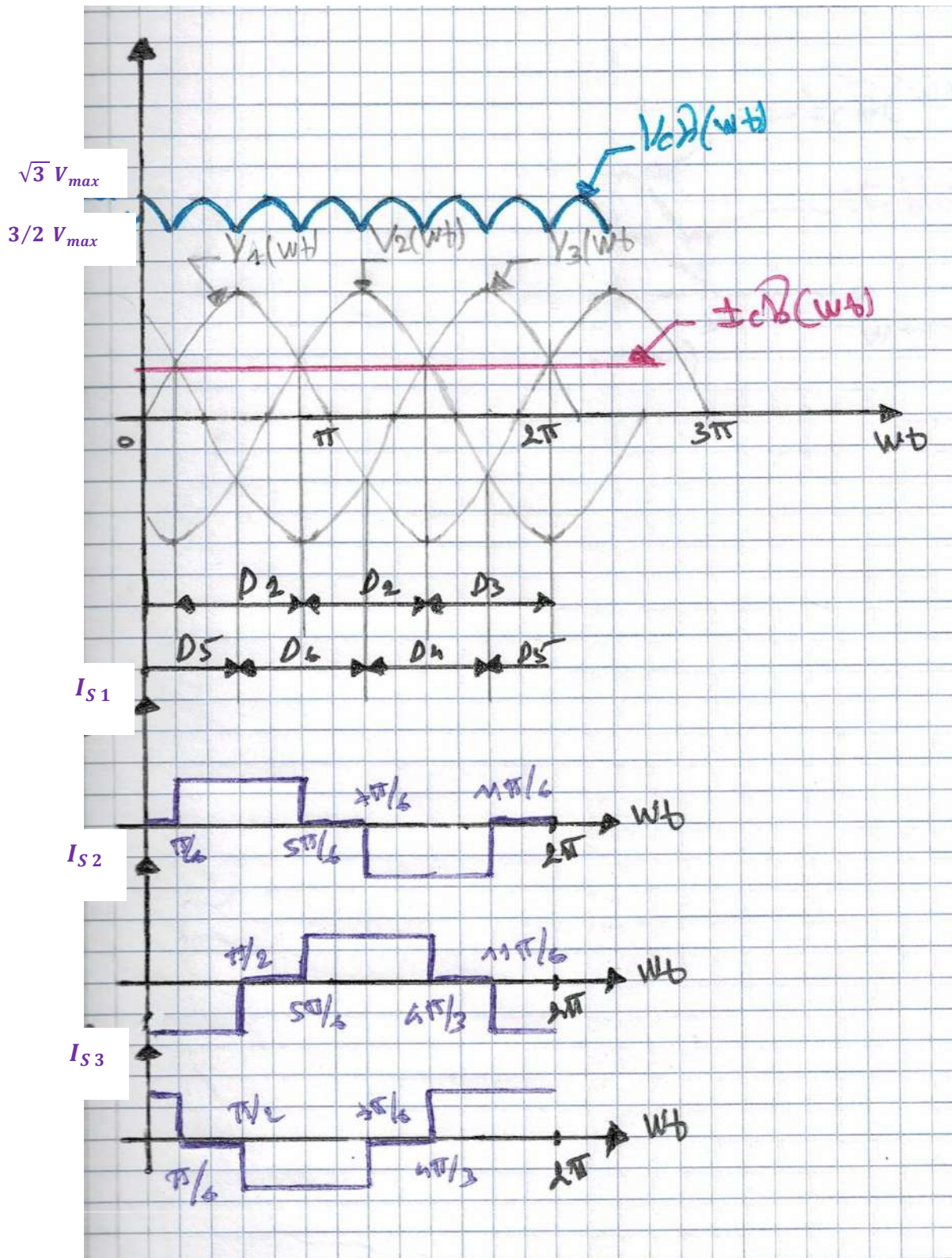


Figure 5.9.S

c)

Calcul la tension de charge moyenne

La formule utilisée pour déterminer la tension moyenne de charge est la suivante :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{3 \sqrt{3} V_{max}}{\pi}$$

Pour trouver la valeur de la tension au secondaire du transformateur, il est essentiel d'appliquer la formule du rapport de transformation du transformateur, étant donné que cette tension reste inconnue.

$$V_{max} = k V_p$$

AN :

$$V_{max} = \frac{0,05 \ 5000 \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 204,28 \text{ V}$$

$$V_{max} = 204,28 \text{ V}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{3 \sqrt{3} 204,28}{\pi} = 337,78 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 337,78 \text{ V}$$

Calcul du courant de charge moyen

Afin de calculer le courant moyen de charge, on applique la formule ci-dessous :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}}}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{337,78}{50} = 6,75 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 6,75 \text{ A}$$

d) Calcul du rendement du pont redresseur

Pour calculer le rendement du pont redresseur, nous avons besoin de connaître la puissance de sortie et la puissance d'entrée du pont redresseur. Le rendement est défini comme le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée.

$$\eta = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}}$$

✚ Calcul de la puissance de sortie

Pour calculer la puissance de sortie, nous devons connaître la tension continue moyenne à la sortie du pont redresseur et le courant de sortie correspondant. Il est possible de calculer cette puissance en se basant sur l'équation suivante :

$$P_{\text{sortie}} = V_{Ch \text{ moyenne}} I_{Ch \text{ moyen}}$$

AN :

$$P_{\text{sortie}} = 337,78 \times 6,75 = 2278,8 \text{ W}$$

$$P_{\text{sortie}} = 2278,8 \text{ W}$$

✚ Calcul de la puissance d'entrée

La formule ci-dessous permet de calculer la puissance d'entrée du pont redresseur.

$$P_{\text{entrée}} = P_{\text{sortie}} + P_C$$

Avec :

P_C : Pertes par conduction d'une diode.

On peut calculer les pertes par conduction d'une diode en utilisant la formule suivante :

$$P_C = E_0 I_{D \text{ moyen}} + R_0 (I_{D \text{ efficace}})^2$$

Avec :

E_0 : La tension de seuil d'une diode.

R_0 : La résistance dynamique d'une diode.

Calcul du courant moyen traversant la diode D_1

La formule employée pour obtenir le courant moyen traversant la diode D_1 est la suivante :

$$I_{D1 \text{ moyen}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_{Ch \text{ moyen}} dwt$$
$$I_{D1 \text{ moyen}} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{2\pi} [wt]_{\pi/6}^{5\pi/6} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{3}$$

AN :

$$I_{D1 \text{ moyen}} = \frac{6,75}{3} = 2,25 \text{ A}$$

$$I_{D1 \text{ moyen}} = 2,25 \text{ A}$$

Calcul du courant efficace traversant la diode D_1

En se basant sur la formule ci-dessous, on peut calculer le courant efficace traversant la diode D_1 .

$$I_{D1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (I_{Ch \text{ moyen}})^2 dwt}$$
$$I_{D1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(I_{Ch \text{ moyen}})^2}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} [wt]_{\pi/6}^{5\pi/6} dwt} = \frac{I_{Ch \text{ moyen}}}{\sqrt{3}}$$

AN :

$$I_{D1 \text{ efficace}} = \frac{6,75}{\sqrt{3}} = 3,89 \text{ A}$$

$$I_{D1 \text{ efficace}} = 3,89 \text{ A}$$

Finalement, nous trouvons les pertes par conduction d'une diode sont égales à 2,33W.

$$P_{C D1} = 2,33 \text{ W}$$

En substituant ce dernier résultat dans la formule permettant le calcul du rendement, on obtient que ce dernier est égal à 99,4%.

$$\eta = 99,4\%$$

FICHE DE TD N°6

Les gradateurs

Objectifs

- + Acquérir une compréhension approfondie des concepts de base des montages gradateurs, y compris leur fonctionnement et leurs applications.
- + Etudier comment les montages gradateurs modifient les formes d'ondes (tension, courant) et examiner leurs influences sur des différentes charges raccordées à leurs sorties.
- + Examiner différentes topologies de montages gradateurs, afin de comprendre comment ils permettent de contrôler la puissance électrique fournie à une charge.

Enoncés

Fiche de travaux dirigés N° 6

Montages gradateurs

Exercice N°1

Un montage gradateur monophasé, tel qu'illustré ci-dessous, est relié à une charge qui est purement résistive ($R = 10 \Omega$). Lorsque la tension d'entrée est de $100V$ en courant alternatif à $50Hz$ et l'angle de retard à l'amorçage des thyristors est $\alpha = \pi/2$ (rad). Déterminer :

- La valeur efficace de la tension de charge.
- La valeur efficace de courant traversant un des thyristors ainsi que sa valeur moyenne.

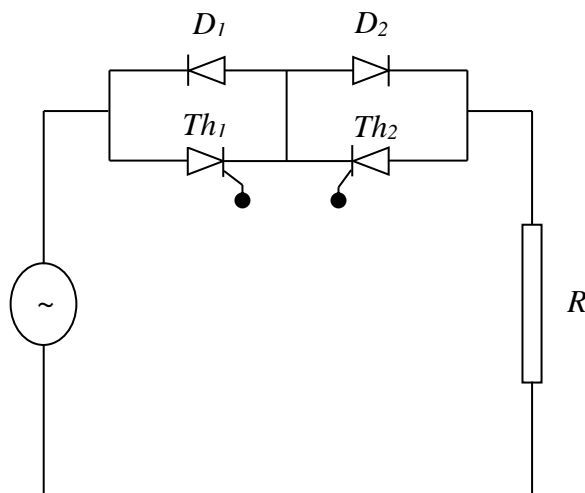


Figure 6.1.E

Exercice N°02

Soit un montage gradateur formé Th_1 et Th_2 montés en antiparallèles et débite sur une charge résistive-inductive. La tension d'alimentation est $V(wt) = 220 \sqrt{2} \sin wt$ (Volt). L'angle de retard à l'amorçage des thyristors est $\alpha = \pi/2$ (rad). On donne $R = 5 \Omega$, $L = 9.5 mH$, l'angle d'extinction du courant est $\theta_e = 7\pi/6$ (rad).

- Dessiner le schéma du montage.
- Tracer les formes d'ondes de la tension aux bornes de la charge, le courant qui traverse la charge.
- Calculer la tension de charge efficace.
- Déduire de courant de charge efficace.

Exercice N°03

On alimente un fer à repasser, de résistance $R=100\Omega$ par le dispositif ci-dessous. La tension d'alimentation est $V(wt)= V \sqrt{2} \sin wt$ (Volts) de valeur efficace $V=220V$, de période T . Le

thyristor $N^{\circ}1$ est amorcé à l'instant t_0 de l'alternance positive, le thyristor $N^{\circ}2$ est amorcé à l'instant $t_0 + t/2$ de l'alternance négative. Les thyristors sont parfaits.

- I. Pour $t_0 = T/4$.
 - a) Représenter la tension d'alimentation, la tension aux bornes de la charge.
 - b) Quelle est la valeur efficace de la tension de charge ?
 - c) Quel type d'appareil utiliser pour mesure cette valeur ?
 - d) Quelle est la valeur moyenne de de la tension de charge?
 - e) Calculer la puissance fournie à la charge.
- II. t_0 variant de 0 à $t T/2$.
 - a) Pour quelle valeur de t_0 la valeur efficace de la tension de charge est-elle maximale ?
 - b) Pour quelle valeur de t_0 la valeur efficace de la tension de charge est-elle minimale ?
 - c) Quelles sont ces valeurs (valeurs max et min)?
 - d) Quelles sont les tensions inverses max supportées par les thyristors ?

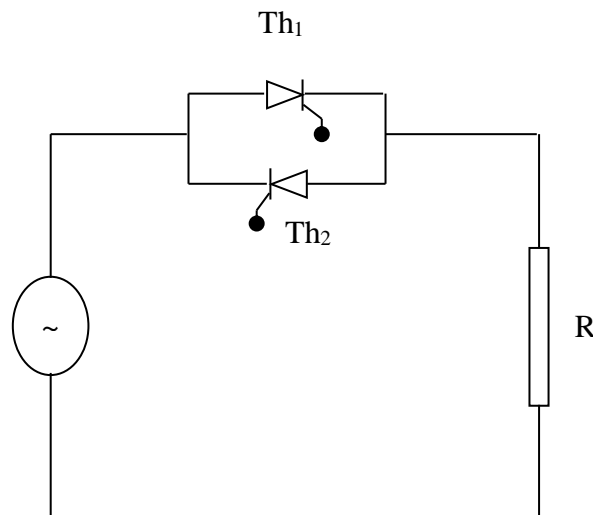


Figure 6.2.E

Exercice N°04

On veut réaliser la commande en puissance réglable dans une charge résistive R_u en utilisant un Triac. Le Triac, équivalent à un thyristor bidirectionnel, a une résistance négligeable à l'état conducteur. Le circuit de commande, qui comporte la diode bidirectionnelle ou Diac, envoie des impulsions de courant sur la gâchette G du triac. La première impulsion positive a lieu à l'instant t_0 . La première impulsion négative a lieu à l'instant $t_0 + T/2$. La tension V est sinusoïdale, de valeur efficace $220V$, de fréquence $50Hz$, de période T .

- a) Calculer la valeur à donner à la charge R_u pour limiter la valeur maximale du courant à $3,1 A$.
- b) On dispose un ampèremètre en série avec R_u pour mesurer l'intensité efficace du courant dans la charge.
 - 1) Pour quelle valeur de courant la dérivation de l'ampèremètre sera maximale.
 - 2) Déterminer la puissance moyenne consommée par la charge.
- c) La première impulsion de gâchette ayant lieu à l'instant $t_0=T/4$, représenter graphiquement les tensions $V(\omega t)$ et $V_{R_u}(\omega t)$.
- d) Pour $t_0=T/4$, quelle est l'indication de l'ampèremètre ? calculer la nouvelle puissance moyenne dissipée dans la charge.
- e) Quel est le rôle de ce montage ?

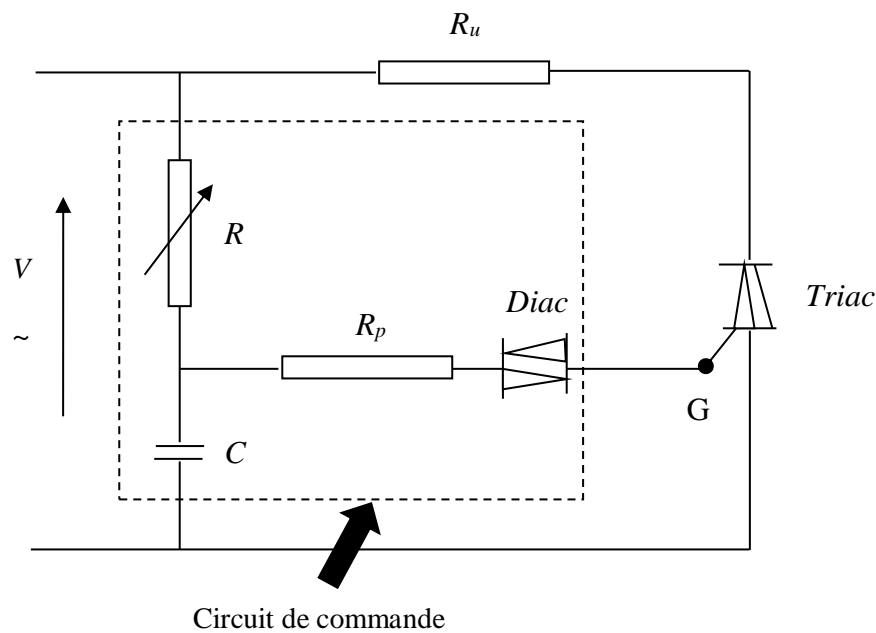


Figure 6.3.E

Exercice N°05

Un gradateur triphasé à thyristors alimente trois résistances de valeur égale $R = 10,6 \Omega$ d'un four électrique. Ce gradateur est constitué par un interrupteur bidirectionnel, formé de deux thyristors tête-bêche, placé en série avec la résistance R . On obtient ainsi trois dipôles qui sont montés soit en étoile avec fil neutre, soit en triangle.

Le réseau d'alimentation est triphasé de fréquence $50 Hz$, et la valeur efficace de la tension phase-neutre vaut $V = 230 V$.

- a) Expliquer pourquoi la commande des thyristors est possible en montage triangle.

- b) On décide tout d'abord de commander le gradateur en agissant sur l'angle de retard à l'amorçage. On le notera α_1 dans le cas d'un montage étoile et α_2 dans le cas d'un montage triangle.
- 1) Exprimer la puissance active $P_1(\alpha_1)$ en fonction de V et de R dans le cas du montage étoile.
 - 2) Exprimer la puissance active $P_2(\alpha_2)$ en fonction de V et de R dans le cas du montage triangle.
 - 3) Donner la relation entre α_1 et α_2 pour que $P_1 = P_2$.
- c) On décide maintenant de commander le gradateur en agissant sur le rapport cyclique du train d'ondes (δ). On le notera δ_1 dans le cas d'un montage étoile et δ_2 dans le cas d'un montage triangle.
- 1) Exprimer la puissance active $P_1(\delta_1)$ en fonction de V et de R dans le cas du montage étoile
 - 2) Exprimer la puissance active $P_2(\delta_2)$ en fonction de V et de R dans le cas du montage triangle
 - 3) Donner la relation entre δ_1 et δ_2 pour que $P_1 = P_2$.
- d) Comparer les deux modes de commande.

Solutions

Fiche de travaux dirigés N° 6

Montages gradateurs

Exercice N°1

a) Calcul de la valeur efficace de la tension de charge

Avant de déterminer la tension efficace de la charge, il est nécessaire de tracer la forme d'onde de cette tension. Cela peut être accompli en effectuant une analyse de circuit approfondie en utilisant les principes fondamentaux des lois de Kirchhoff.

Analyse du circuit

$$\color{red}{+} \quad 0 < \omega t < \alpha \quad \text{et} \quad \pi < \omega t < \pi + \alpha$$

Les deux thyristors se trouvent dans un état bloqué, ce qui signifie que la tension aux bornes de la charge ainsi que le courant qui la traverse sont tous les deux égaux à zéro

$$V_{Ch} = 0 \text{ V}$$

$$I_{Ch} = 0 \text{ A}$$

$$\color{red}{+} \quad \alpha < \omega t < \pi$$

Le thyristor Th_1 et la diode D_2 sont en mode de conduction (passants), tandis que le thyristor Th_2 et la diode D_1 sont en mode de blocage.

Selon la loi des mailles, on peut écrire :

$$V_{Th1} + V_{D2} + V_{Ch} = V$$

Donc:

$$V_{Ch} = V$$

$$\color{red}{+} \quad \pi + \alpha < \omega t < 2\pi$$

Dans cet intervalle, le thyristor Th_2 et la diode D_1 sont en état de conduction, par contre, le thyristor Th_1 et la diode D_2 sont en état blocage.

En se référant à la loi des mailles, on peut formuler ceci :

$$V_{Th2} + V_{D1} + V_{Ch} = V$$

Finalement, nous obtenons:

$$V_{Ch} = V$$

Formes d'ondes

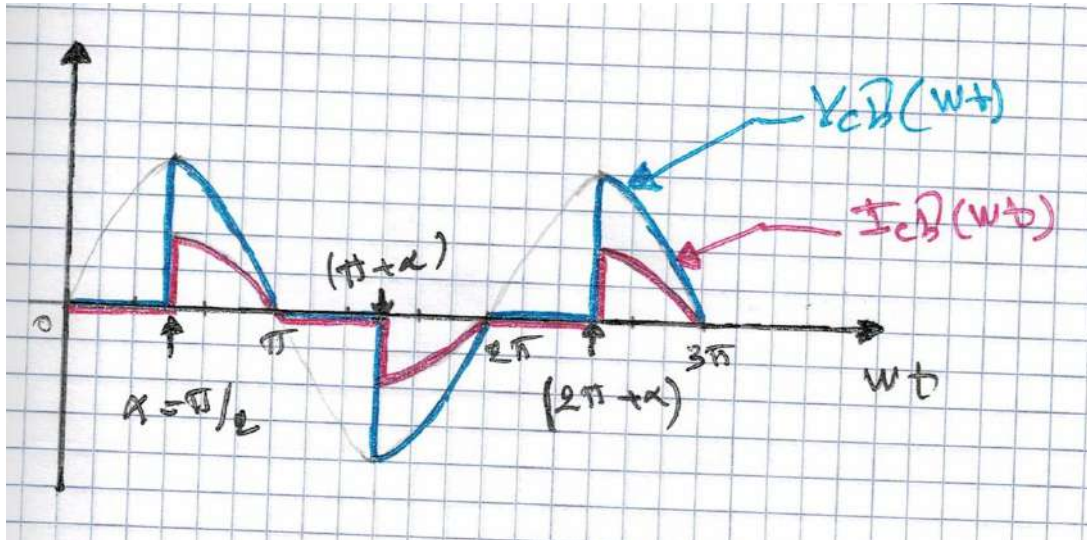


Figure 6.1.S

La formule employée pour déterminer la tension de charge efficace est la suivante :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{max}^2 \sin^2 \omega t \, d\omega t}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V\sqrt{2})^2}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t \, d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} (-\sin^2 \omega t) \, d\omega t \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V\sqrt{2})^2}{2\pi} 2 \left[\int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t \, d\omega t \right]}$$

Avec : $\sin^2 = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V\sqrt{2})^2}{2\pi} 2 \left[\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \, d\omega t \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V\sqrt{2})^2}{2\pi} 2 \left[\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1}{2} \, d\omega t - \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\pi} \cos 2\omega t \, d\omega t \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{\pi} \left[\int_{\pi/2}^{\pi} \frac{1}{2} dwt - \frac{1}{2} \int_{\pi/2}^{\pi} \cos 2wt dwt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{\pi} \left[\int_{\pi/2}^{\pi} \frac{1}{2} dwt - \frac{1}{2} \int_{\pi/2}^{\pi} \cos 2wt dwt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{\pi} \left[\frac{1}{2} \left(\pi - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin 2\pi}{2} - \frac{\sin \pi}{2} \right) \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{\pi} \left[\frac{\pi}{4} \right]} = \frac{V \sqrt{2}}{2}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \frac{100 \sqrt{2}}{2} = 70,71 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = 70,71 \text{ V}$$

b)

Les valeurs efficace et moyenne du courant qui traverse le thyristor Th_1 et le thyristor Th_2 sont égaux.

Calcul du courant $I_{Th1 \text{ efficace}}$

Afin de calculer le courant $I_{Th1 \text{ efficace}}$, nous utilisons la formule ci-dessous :

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \frac{\int_{\alpha}^{\pi} V_{max}^2 \sin^2 wt dwt}{R^2}}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{2\pi R^2} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin^2 wt dwt}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{2\pi R^2} \left(\frac{\pi}{4} \right)} = \sqrt{\frac{(V)^2}{4 R^2}}$$

AN :

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(100)^2}{4 \cdot 10^2}} = 5 \text{ A}$$

$$I_{Th1 \text{ efficace}} = 5 A$$

Calcul du courant $I_{Th1 \text{ moyen}}$

Le calcul de la valeur moyenne du courant I_{Th1} s'effectue en utilisant la formule suivante :

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \sin wt \, dwt}{R}$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{V_{max}}{2 \pi R} \int_{\alpha}^{\pi} \sin wt \, dwt$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{V_{max}}{2 \pi R} [-\cos wt]_{\pi/2}^{\pi}$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{V_{max}}{2 \pi R}$$

AN :

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = \frac{100 \sqrt{2}}{2 \pi 10} = 2,25 A$$

$$I_{Th1 \text{ moyen}} = 2,25 A$$

Exercice N°2

a) Schéma du montage

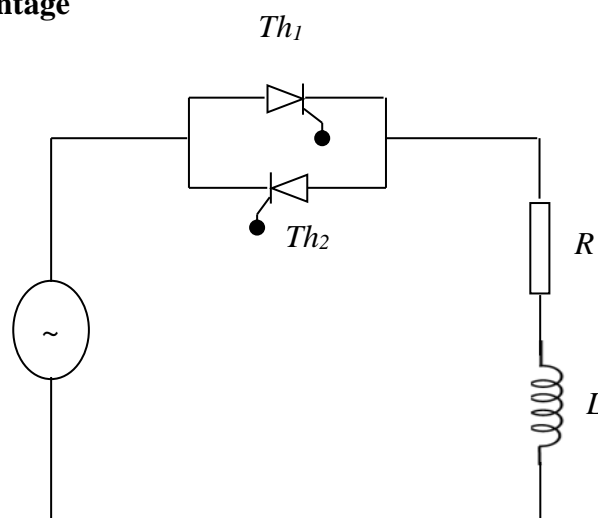


Figure 6.2.S

b) Formes d'ondes

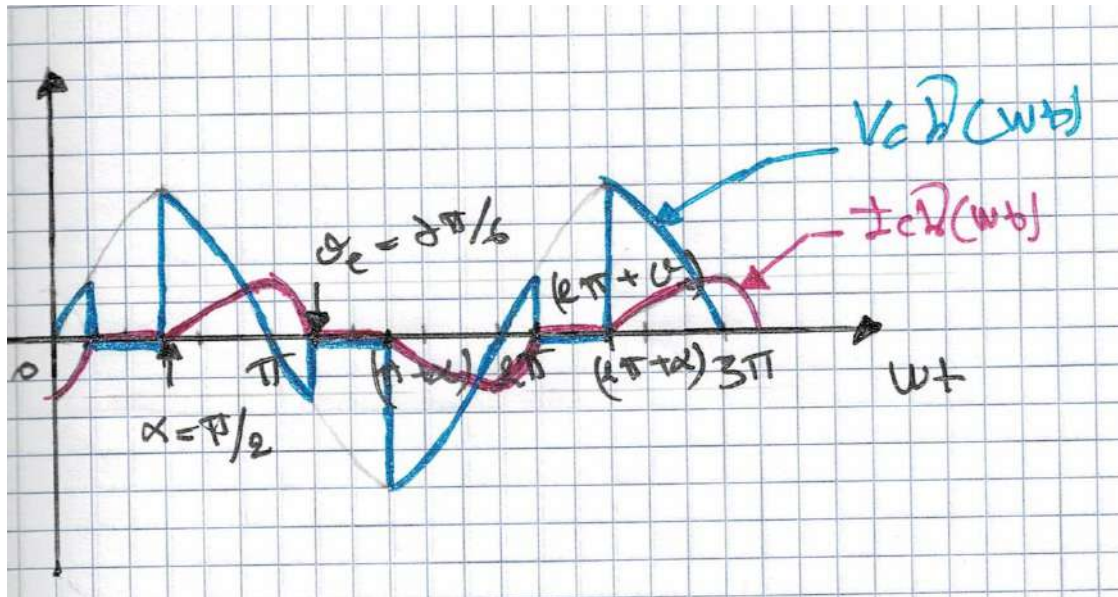


Figure 6.3.S

c) Calcul de la tension de charge efficace

En se basant sur la forme d'onde de la tension de charge et en utilisant la formule permettant de calculer sa valeur efficace, on peut écrire que :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{2\pi} \left[2 \int_{\alpha}^{\theta_e} \sin^2 wt \, dwt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\theta_e} \sin^2 wt \, dwt \right]}$$

Avec : $\sin^2 = \frac{1 - \cos 2wt}{2}$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\theta_e} 1 \, dwt - \int_{\alpha}^{\theta_e} \cos 2wt \, dwt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{2\pi} \left[(\theta_e - \alpha) - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_e) + \frac{1}{2} (\sin 2\alpha) \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V\sqrt{2})^2}{2\pi} \left[\left(\frac{7\pi}{6} - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{2} \left(\sin 2\left(\frac{7\pi}{6}\right)\right) + \frac{1}{2} \left(\sin 2\left(\frac{\pi}{2}\right)\right) \right]}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(220\sqrt{2})^2}{2\pi} \left[\left(\frac{4\pi}{6}\right) - \frac{1}{2} \left(\sin\left(\frac{14\pi}{6}\right)\right) + \frac{1}{2} \left(\sin(\pi)\right) \right]} = 159,98 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = 159,98 \text{ V}$$

d) Calcul du courant de charge efficace

Le courant de charge efficace est calculé en appliquant l'expression ci-après :

$$I_{Ch \text{ efficace}} = \frac{V_{Ch \text{ efficace}}}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ efficace}} = \frac{159,98}{5} = 32 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 32 \text{ A}$$

Exercice N°3

I. Pour $t_0 = T/4$.

a) Formes d'ondes

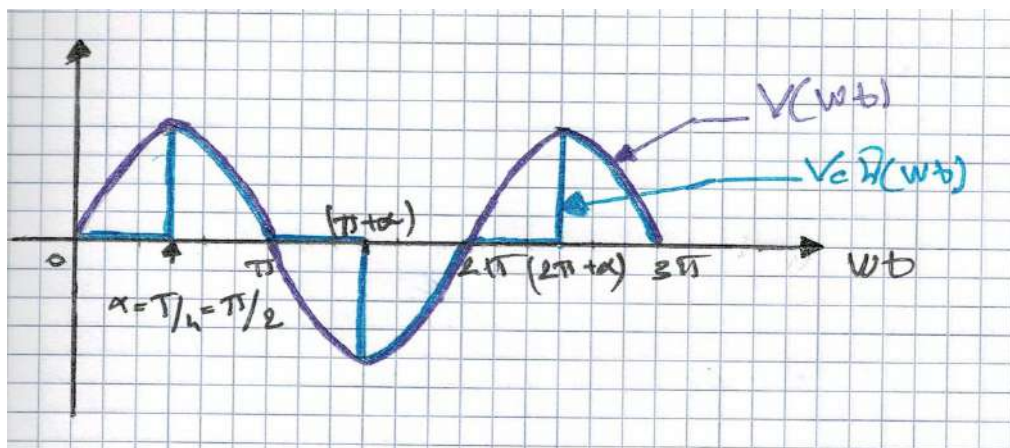


Figure 6.4.S

b) Calcul de la tension de charge efficace

La formule utilisée pour calculer la tension de charge efficace est la suivante :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{max}^2 \sin^2 wt \, dwt}$$

$$\text{On a : } t_0 = \frac{T}{4} \Rightarrow wt = \frac{\pi}{2}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V\sqrt{2})^2}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 wt \, dwt + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} (-\sin^2 wt) \, dwt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V\sqrt{2})^2}{2\pi} 2 \left[\int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 wt \, dwt \right]}$$

$$\text{Avec : } \sin^2 = \frac{1 - \cos 2wt}{2}$$

Finalement, on trouve que :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \frac{220}{\sqrt{2}} = 156 \, V$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = 156 \, V$$

c)

L'appareil qui permet la mesure de la tension efficace est le voltamètre ferromagnétique (analogique) ou bien appareil R.M.S (Root Mean Square) (numérique).

d) Calcul de la tension de charge moyenne

En observant la configuration de la forme d'onde de la tension de charge, il est évident que la tension de charge moyenne est nulle, car la forme d'onde présente deux aires égales, l'une positive et l'autre négative.

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 0 \, V$$

e) Calcul de la puissance fournie à la charge

La puissance fournie à la charge est déterminée en utilisant la formule suivante :

$$P_{Ch} = \frac{V_{Ch \text{ efficace}}^2}{R}$$

AN :

$$P_{Ch} = \frac{156^2}{100} = 242 \text{ W}$$

$$P_{Ch} = 242 \text{ W}$$

II. t_0 varie de 0 à $T/2$

- a) La valeur efficace de la tension de charge est maximale si $t_0 = 0s$.
- b) La valeur efficace de la tension de charge est minimale si $t_0 = T/2s$.
- c) Ces valeurs sont :

➤ $t_0 = 0 \text{ s} \Rightarrow V_{Ch \text{ efficace max}} = V = 220 \text{ V}.$

➤ $t_0 = T/2 \text{ s} \Rightarrow V_{Ch \text{ efficace min}} = 0 \text{ V}.$

- d) Les tensions inverses max supportées par les thyristors sont égaux à :

$$V_{inverse} = |\mp V \sqrt{2}|$$

AN :

$$V_{inverse} = |\mp V \sqrt{2}| = |\mp 311 \text{ V}|$$

$$V_{inverse} = |\mp 311 \text{ V}|$$

Exercice N°4

- a) **Calcul de la résistance de charge R_u**

Lorsque le Triac est en état de conduction, cela entraîne que :

$$V = V_{Ch} = V_{Ru}$$

La tension maximale sera donc : $V \sqrt{2}$.

On en déduit :

$$V \sqrt{2} = I_{Ch \ max} R_u$$
$$\Rightarrow R_u = \frac{V \sqrt{2}}{I_{max}}$$

AN :

$$R_u = \frac{220 \sqrt{2}}{3,1} = 100,36 \ \Omega$$

$$R_u = 100,36 \ \Omega$$

b) On dispose un ampèremètre en série avec R_u pour mesurer l'intensité efficace du courant dans la charge

1) Calcul du courant de charge maximale

La valeur du courant pour laquelle la déviation de l'ampèremètre atteint son maximum est calculée à l'aide de la formule ci-dessous :

$$I_{Ch \ efficace} = \frac{V}{R_u}$$

AN :

$$I_{Ch \ efficace} = \frac{220}{100,36} = 2,19 \ A$$

$$I_{Ch \ efficace} = 2,19 \ A$$

2) Calcul de la puissance moyenne consommée par la charge

La formule utilisée pour calculer la puissance moyenne absorbée par la charge est la suivante :

$$P_{Ch \ moyenne} = I_{Ch \ efficace}^2 R_u$$

AN :

$$P_{Ch \ moyenne} = 2,19^2 \ 100,36 = 481,34 \ W$$

$$P_{Ch \ moyenne} = 481,34 \ W$$

c) Formes d'ondes pour $t_0=T/4$

$$t_0 = \frac{T}{4} \Rightarrow \omega t = \frac{\pi}{2}$$

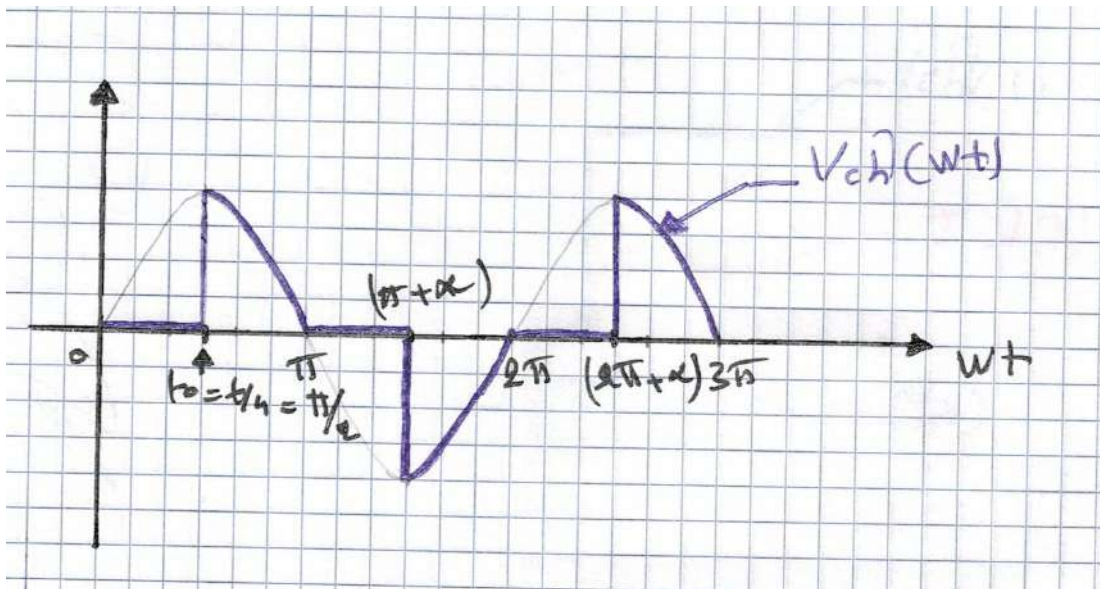


Figure 6.5.S

d) Pour $t_0=T/4$

L'indication de l'ampèremètre reflète la valeur efficace du courant traversant la charge. Pour déterminer ce courant, il est nécessaire de calculer d'abord la tension efficace de la charge. Ensuite, en utilisant la loi d'Ohm, on peut calculer le courant correspondant.

Calcul de la tension de charge efficace

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{max}^2 \sin^2 \omega t \, d\omega t}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V\sqrt{2})^2}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t \, d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} (-\sin^2 \omega t) \, d\omega t \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V\sqrt{2})^2}{2\pi} 2 \left[\int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t \, d\omega t \right]}$$

Avec : $\sin^2 = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{2\pi} 2 \left[\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos 2wt}{2} dwt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{2\pi} 2 \left[\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1}{2} dwt - \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\pi} \cos 2wt dwt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{\pi} \left[\int_{\pi/2}^{\pi} \frac{1}{2} dwt - \frac{1}{2} \int_{\pi/2}^{\pi} \cos 2wt dwt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{\pi} \left[\int_{\pi/2}^{\pi} \frac{1}{2} dwt - \frac{1}{2} \int_{\pi/2}^{\pi} \cos 2wt dwt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{\pi} \left[\frac{1}{2} \left(\pi - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin 2\pi}{2} - \frac{\sin \pi}{2} \right) \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{(V \sqrt{2})^2}{\pi} \left[\frac{\pi}{4} \right]} = \frac{V \sqrt{2}}{2} = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

AN :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \frac{220}{\sqrt{2}} = 155,56 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = 155,56 \text{ V}$$

Calcul du courant de charge efficace

$$I_{Ch \text{ efficace}} = \frac{V_{Ch \text{ efficace}}}{R_u}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ efficace}} = \frac{155,56}{100,36} = 1,55 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ efficace}} = 1,55 \text{ A}$$

Calcul de la nouvelle puissance moyenne consommée par la charge

La puissance absorbée par la charge est déterminée en utilisant la même formule que celle utilisée dans la question b.2.

$$P_{Ch\ moyenne} = I_{Ch\ efficace}^2 R_u$$

AN :

$$P_{Ch\ moyenne} = 1,55^2 \cdot 100,36 = 241,11\ W$$

$$P_{Ch\ moyenne} = 241,11\ W$$

e) Rôle du montage :

Ce montage permet de générer une tension alternative à valeur efficace réglable à partir d'une tension alternative de valeur efficace fixe et de fréquence constante.

Exercice N°5

- a) La commande des thyristors est réalisable dans un schéma en triangle, car chaque dipôle de chaque branche fonctionne de manière autonome par rapport aux autres. Cela entraîne le fonctionnement de trois gradateurs monophasés distincts.
- b) On décide tout d'abord de commander le gradateur en agissant sur l'angle de retard à l'amorçage. On le notera α_1 dans le cas d'un montage étoile et α_2 dans le cas d'un montage triangle.

1) Relation de la puissance active $P_1(\alpha_1)$ en fonction de V et de R dans le cas du montage étoile

La formule suivante permet de calculer la puissance moyenne consommée par la charge (résistance) dans une configuration en étoile pour une seule phase :

$$p_1 = \frac{V^2}{R} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_1}{2\pi} \right)$$

Pour un gradateur triphasé la puissance moyenne consommée par la charge dans une configuration en étoile est égale à :

$$P_1 = \frac{3V^2}{R} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_1}{2\pi} \right)$$

2) Relation de la puissance active $P_2(\alpha_2)$ en fonction de V et de R dans le cas du montage triangle

Pour un montage triangle on modifie la relation précédente en remplaçant la tension simple par la tension composée (V par $\sqrt{3} V$).

$$P_2 = \frac{9 V^2}{R} \left(1 - \frac{\alpha_2}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_2}{2\pi} \right)$$

3) Relation entre α_1 et α_2 pour que $P_1 = P_2$

Pour que $P_1 = P_2$, il faut que :

$$\frac{3 V^2}{R} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_1}{2\pi} \right) = \frac{9 V^2}{R} \left(1 - \frac{\alpha_2}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_2}{2\pi} \right)$$

$$15,11 \cdot 10^3 \left(1 - \frac{\alpha_1}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_1}{2\pi} \right) = 45,34 \cdot 10^3 \left(1 - \frac{\alpha_2}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_2}{2\pi} \right)$$

$$\left(1 - \frac{\alpha_1}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_1}{2\pi} \right) = \frac{45,34}{15,11} \left(1 - \frac{\alpha_2}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_2}{2\pi} \right)$$

$$\left(-\frac{\alpha_1}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_1}{2\pi} \right) = 3 \left(-\frac{\alpha_2}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_2}{2\pi} \right)$$

Nous pouvons simplifier en isolant les termes avec α_1 et α_2 :

$$-\frac{\alpha_1}{\pi} + 3 \frac{\alpha_2}{\pi} = -\frac{\sin 2\alpha_1}{2\pi} + \frac{3 \sin 2\alpha_2}{2\pi}$$

Ensuite, nous pouvons multiplier tout l'équation par π pour éliminer les dénominateurs :

$$-\alpha_1 + 3\alpha_2 = -\frac{\sin 2\alpha_1}{2} + \frac{3 \sin 2\alpha_2}{2}$$

- c) On décide maintenant de commander le gradateur en agissant sur le rapport cyclique du train d'ondes. On le notera δ_1 dans le cas d'un montage étoile et δ_2 dans le cas d'un montage triangle.

1) Relation de la puissance active $P_1(\delta_1)$ en fonction de V et de R dans le cas du montage étoile

Dans un gradateur triphasé, la puissance moyenne consommée par la charge dans une configuration en étoile est donnée par :

$$P_1 = 3 \left(\frac{V}{R} \right)^2 \delta_1$$

2) Relation de la puissance active $P_2(\delta_2)$ en fonction de V et de R dans le cas du montage triangle

De manière similaire à la commande précédente, dans le cas d'un montage en triangle, la relation de la puissance est ajustée en remplaçant la tension simple par la tension composée (V par $\sqrt{3} V$).

$$P_2 = 9 \left(\frac{V}{R} \right)^2 \delta_2$$

3) Relation entre δ_1 et δ_2 pour que $P_1 = P_2$

Pour que $P_1 = P_2$, il faut que :

$$3 \left(\frac{V}{R} \right)^2 \delta_1 = 9 \left(\frac{V}{R} \right)^2 \delta_2$$

$$\delta_1 = 3 \delta_2$$

d) Comparaison entre les deux techniques de commande

L'utilisation d'une commande par train d'ondes est plus pratique et facile à mettre en œuvre, cependant, la méthode de commande basée sur un angle de retard à l'amorçage offre une flexibilité nettement supérieure (beaucoup plus souple).

FICHE DE TD N°7

Les hacheurs

Objectifs

- + *Développer une connaissance approfondie des concepts essentiels liés aux montages hacheurs, comprenant leur mécanisme de fonctionnement.*
- + *Etudier la façon dont les montages hacheurs altèrent les propriétés des signaux en termes de formes d'ondes (tension, courant) et évaluer les répercussions de ces modifications sur différentes charges connectées à leurs sorties.*

Enoncés

Fiche de travaux dirigés N° 7

Les hacheurs

Exercice N°1

Soit un hacheur dévolteur ; débitant sur une charge résistive 50Ω et alimenté par une tension de 50V. Le rapport cyclique étant égal à 0.2 et la fréquence de hachage est égale à 100Hz.

- Dessiner le montage du convertisseur.
- Tracer les formes d'ondes de la tension aux bornes de la charge ainsi que du courant qui la traverse.
- Calculer la tension de charge moyenne, le courant de charge moyen, le courant de charge maximal et le courant de charge minimal.
- Calculer le temps de fermeture (t_f).

Exercice N°02

L'induit d'un moteur est alimenté par un hacheur représenté par la figure ci-dessous. La tension U_{AB} est représentée sur la figure 7.1.E. Ce dispositif comprend :

- ✚ Une source de tension continue : $E=240 V$.
- ✚ Un interrupteur H .
- ✚ Une diode.
- ✚ Une inductance.

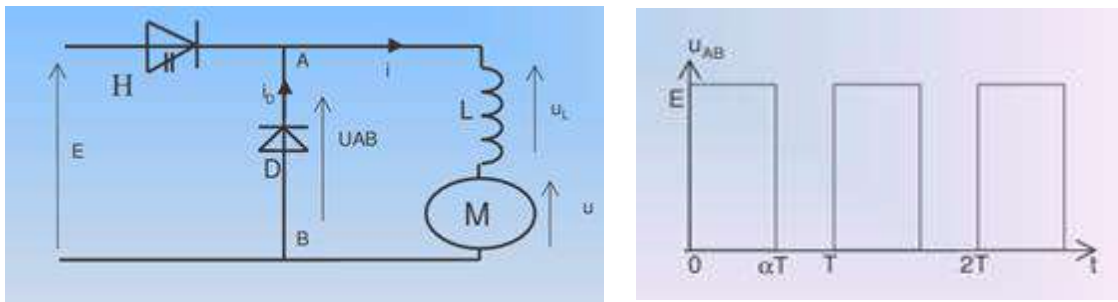


Figure 7.1.E

- Avec quel composant électronique peut-on réaliser l'interrupteur H ?
- Comment appelle-t-on le coefficient δ ? comment le définit-on ?
- Quel est le rôle de l'inductance L ?
- Quel est le rôle de la diode ?
- Etablir l'expression de la tension moyenne aux bornes du moteur.

- f) Pour quelle valeur de α aura-t-on la tension moyenne au niveau du moteur égale à 220V.

Exercice N°03

Considérons le schéma illustré dans la figure ci-après. Il comporte des interrupteurs de puissance qui constituent un convertisseur continu-continu et qui n'est pas réversible à la fois en courant et en tension.

- Préciser le type de convertisseur.
- Est-il nécessaire que les interrupteurs (K_1 et K_2) fonctionnent de manière complémentaire dans leur commande ? Veuillez fournir une justification à votre réponse.
- Distinguer les interrupteurs individuels (K_1 et K_2) requis pour mettre en œuvre ce convertisseur.
- Déduire le schéma de principe ainsi que les composants à semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ce convertisseur.

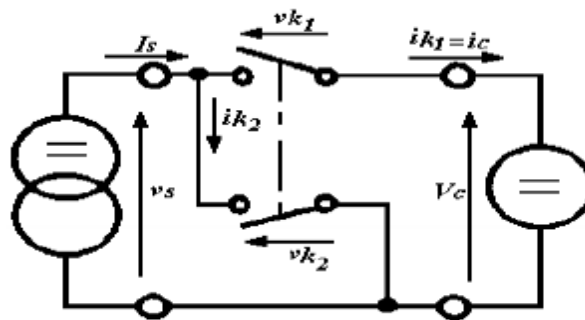


Figure 7.2.E

Exercice N°04

Soit le montage suivant :

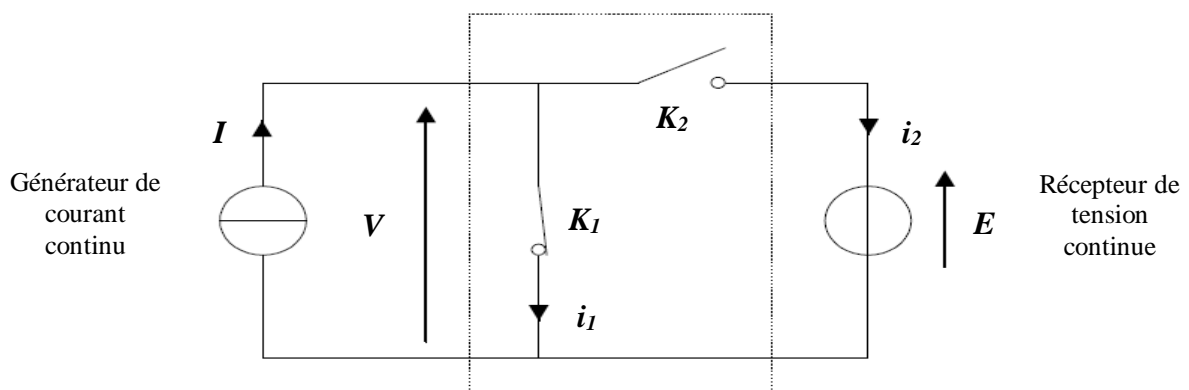


Figure 7.3.E

Les interrupteurs de puissance K_1 et K_2 sont supposés parfaits.

- a) Pour les séquences de conduction des interrupteurs représentés sur la figure ci-après, tracé les formes d'ondes de la tension aux bornes du générateur de courant continu et les courants i_1, i_2 .

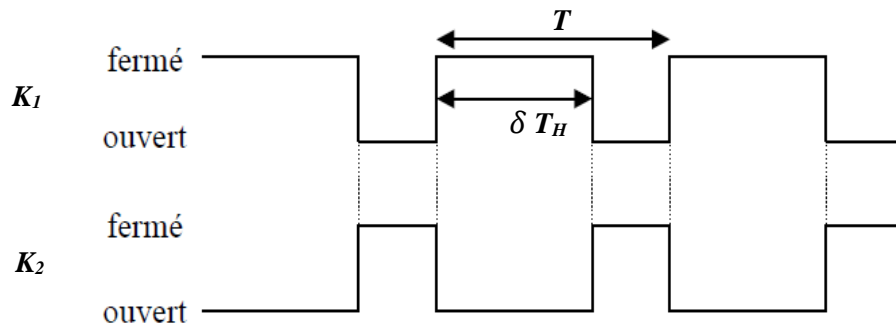


Figure 7.4.E

- b) Trouver l'expression qui relie entre la tension $V_{moyenne}$, le rapport cyclique et la tension aux bornes du récepteur.

Exercice N°05

Une source de tension continue V d'impédance interne négligeable est reliée par un montage hacheur à deux semi-conducteurs commandés K_1, K_2 et deux diodes D_1, D_2 à une source de courant de f.é.m E , d'inductance L dont on néglige la résistance.

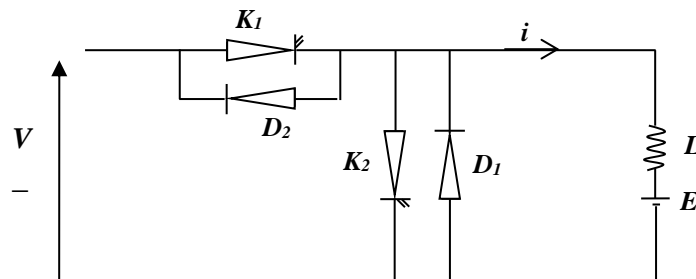


Figure 7.5.E

Hacheur série

Le semi-conducteur K_2 continuellement bloqué, on rend, au cours de chaque période T , le semi-conducteur C conducteur pendant l'intervalle $[0, \delta_1 T]$.

- ✓ Calculer le rapport E/V quand le courant i est toujours positif.

✚ Hacheur parallèle

Le semi-conducteur K_1 toujours bloqué, on rend, au cours de chaque période T , le semi-conducteur K_2 conducteur pendant l'intervalle $[(1 - \delta_2)T, T]$. Comme pour la hacheur série :

- ✓ Calculer le rapport E/V quand le courant i' est toujours négatif.

Exercice N°06

Un hacheur est utilisé pour alimenter un moteur à courant continu à partir d'une source de tension continue, avec une force électromotrice (f.e.m.) E , une résistance R_a , et une inductance L_a . Les interrupteurs de puissance, considérés comme idéaux, commutent sur une période T . Les paires d'interrupteurs (K_1, K_4) et (K_2, K_3) sont commandées de manière complémentaire avec un rapport cyclique δ . Les interrupteurs (K_1, K_4) sont fermés pendant l'intervalle $[0, \delta T]$, tandis que les interrupteurs (K_2, K_3) sont fermés pendant l'intervalle $[\delta T, T]$.

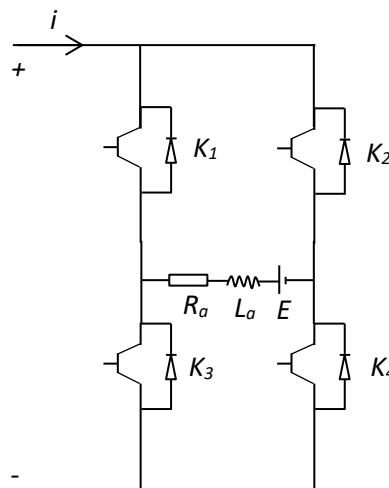


Figure 7.6.E

- a) Quel est le rôle des diodes disposées en antiparallèle avec les thyristors et quel mode de commande est utilisé pour ces interrupteurs ?
- b) Décrivez le fonctionnement de ce convertisseur en analysant son circuit, puis tracez la forme d'onde de tension aux bornes de la charge.
- c) Trouver les expressions permettant de calculer des valeurs moyennes de la tension aux bornes de la charge et du courant traversant la charge.
- d) Déduire avec explication, dans combien de quadrants ce convertisseur est réversible.

Solutions

Fiche de travaux dirigés N° 7

Les hacheurs

Exercice N°1

a) Schéma du montage

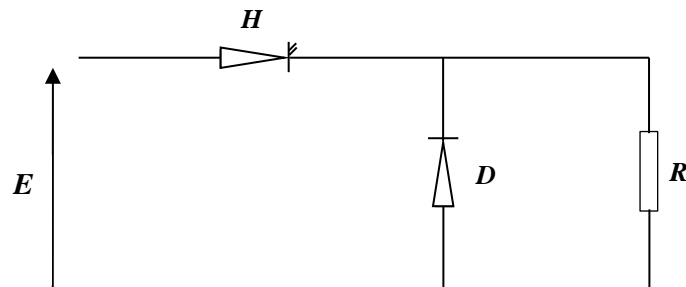


Figure 7.1.S

b) Formes d'ondes

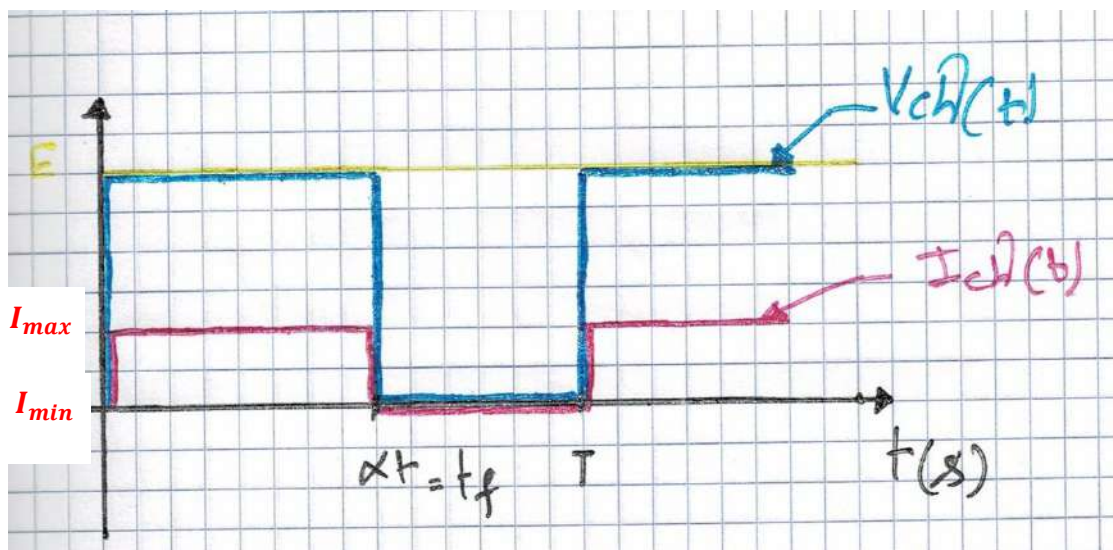


Figure 7.2.S

c) Les calculs sont effectués en se basant sur les résultats indiqués dans les graphiques (formes d'ondes).

Calcul de la tension de charge moyenne

La formule utilisée pour calculer la tension de charge $V_{moyenne}$ est :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{Ch}(t) dt$$
$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} E dt$$
$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{E}{T} [\delta T - 0] = \delta E$$

AN :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 0,2 \cdot 50 = 10 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 10 \text{ V}$$

Calcul du courant de charge moyen

La formule employée pour calculer le courant de charge moyen $I_{Ch \text{ moyen}}$ est :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}}}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ moyen}} = \frac{10}{50} = 0,2 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ moyen}} = 0,2 \text{ A}$$

Calcul du courant de charge maximal

En se basant sur la courbe du courant de charge, le courant de charge maximal est déterminé en utilisant la formule suivante :

$$I_{Ch \text{ max}} = \frac{E}{R}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ max}} = \frac{50}{50} = 1 \text{ A}$$

$$I_{Ch \text{ max}} = 1 \text{ A}$$

Calcul du courant de charge minimal

En observant la courbe du courant de charge, on constate que le courant de charge minimal est égal à zéro.

$$I_{Ch \ min} = 0 \ A$$

d) Calcul du temps de fermeture

Le calcul du temps de fermeture s'effectue en utilisant la formule du rapport cyclique. Ce dernier est donné par l'expression suivante :

$$\delta = \frac{t_f}{T}$$

$$\Rightarrow t_f = \delta T \quad \text{avec} \quad T = \frac{1}{f}$$

AN :

$$t_f = 0,2 \frac{1}{100} = 2 \cdot 10^{-3} \ s = 2 \ ms$$

$$t_f = 2 \cdot 10^{-3} \ s = 2 \ ms$$

Exercice N°2

- Il est possible de réaliser l'interrupteur H en utilisant soit un transistor (comme un bipolaire, un MOSFET ou un IGBT), soit un thyristor.
- le coefficient δ est appelé le rapport cyclique.
On le définit par une fraction de la période correspondant à la durée pendant laquelle l'interrupteur H est en position fermée.
- Le rôle de l'inductance L est de lisser le courant qui circule à travers le moteur.
- La diode D garantit la continuité du courant au sein le moteur.
- Expression de la tension moyenne aux bornes du moteur**

La tension U_{AB} aux bornes du moteur est calculée en se basant sur la courbe de la tension aux bornes du moteur.

$$U_{AB \ moyenne} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{AB}(t) dt$$

$$U_{AB \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} E dt$$

$$U_{AB \text{ moyenne}} = \frac{E}{T} [\delta T - 0] = \delta E$$

$$U_{AB \text{ moyenne}} = \delta E$$

- f) Le rapport cyclique est calculé en utilisant l'expression de la tension moyenne aux bornes du moteur

Pour $U_{AB \text{ moyenne}} = 220 \text{ V}$

$$U_{AB \text{ moyenne}} = \delta E$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{U_{AB \text{ moyenne}}}{E}$$

AN :

$$\delta = \frac{220}{240} = 0,916$$

$$\delta = 0,916$$

Exercice N°03

- a) Le type de convertisseur est un hacheur parallèle.
b) Effectivement, il est requis que les interrupteurs (K_1 et K_2) soient commandés de manière complémentaire.

La justification de cette nécessité réside dans l'objectif d'éviter une mise en circuit ouvert de la source et un court-circuit de la charge.

- c) Identification des interrupteurs (K_1 et K_2) requis pour mettre en œuvre ce convertisseur.

Les grandeurs de références sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Courant de la source} \quad (I_S) \\ \text{Tension aux bornes de la charge} \quad (V_C) \end{array} \right.$$

✚ Etat (1) : état de repos

Dans cette étape la source doit être mise en court-circuit et la charge doit être en circuit ouvert. L'interrupteur k_1 doit être en position ouverte, par contre l'interrupteur k_2 doit être en position fermée. Par conséquent, nous avons:

$$\begin{cases} v_{k_1} = -V_C \\ i_{k_1} = i_C = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} v_{k_2} = 0 \\ i_{k_2} = I_S \end{cases}$$

✚ Etat (2) : état de fonctionnement

Un courant circule à travers la charge. L'interrupteur k_1 doit être en position fermée, tandis que l'interrupteur k_2 doit être en position ouverte. En conséquence, nous avons ainsi :

$$\begin{cases} v_{k_1} = 0 \\ i_{k_1} = I_S \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} v_{k_2} = V_C \\ i_{k_2} = 0 \end{cases}$$

Selon ces résultats on trace les caractéristiques statiques des interrupteurs K_1 et K_2 .

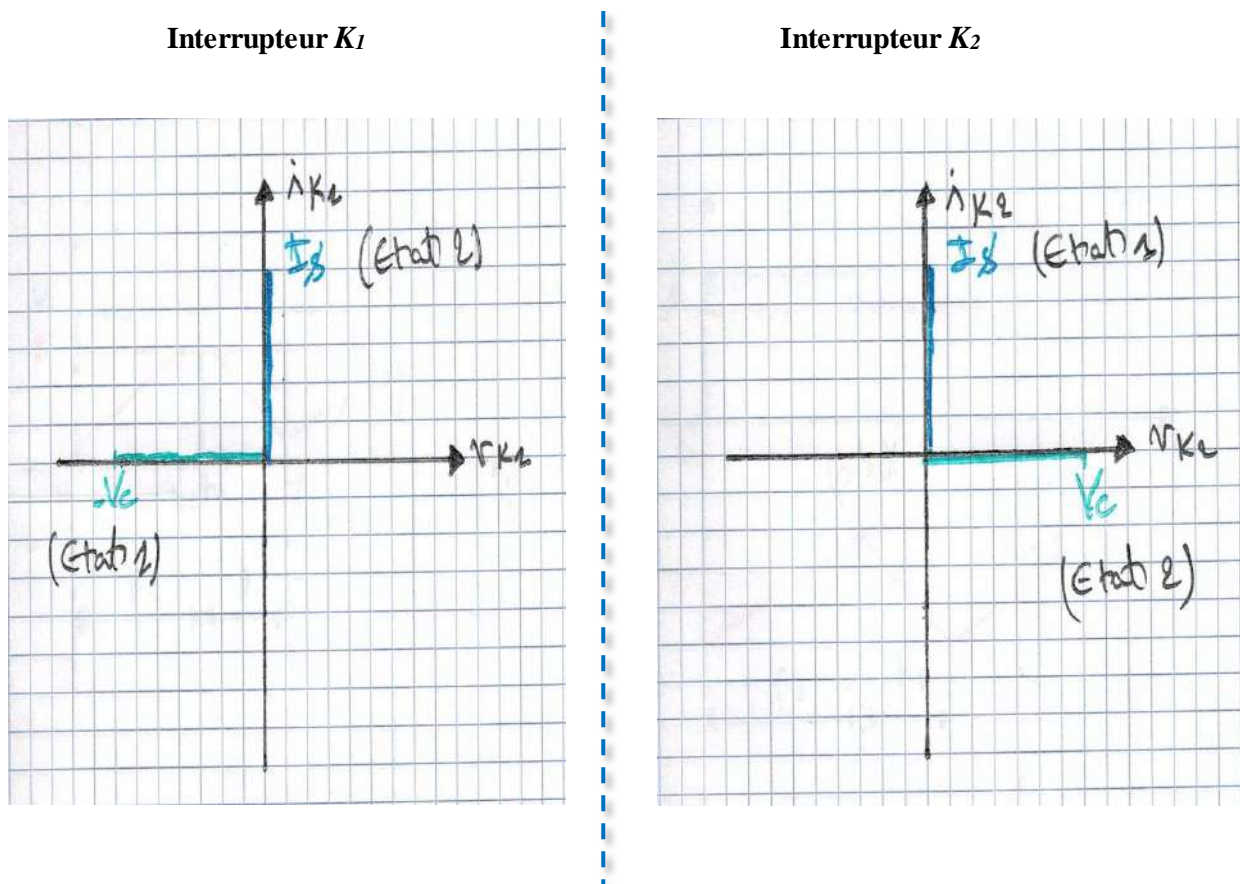


Figure 7.3.S

D'après les caractéristiques statiques relevées des interrupteurs, il est déduit que l'interrupteur K_1 est une diode tandis que l'interrupteur K_2 est un transistor.

d) Schéma de principe avec les composants à semi-conducteurs

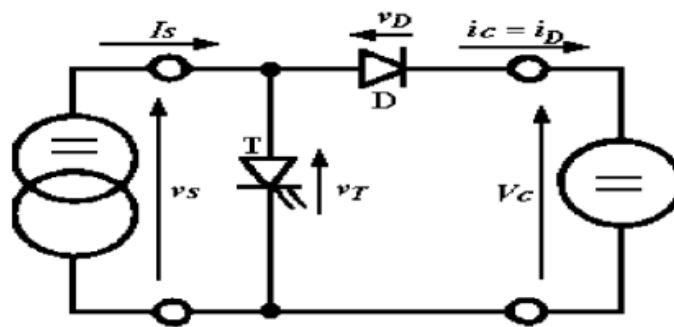


Figure 7.4.S

Exercice N°04

a) Formes d'ondes

Les formes d'ondes sont tracées en fonction des séquences de commutation des interrupteurs.

Selon les séquences de commutation :

✚ Dans l'intervalle $0 < t < \delta T$

L'interrupteur K_1 est à l'état passant (il est en position fermée), tandis que l'interrupteur K_2 est à l'état bloquée (il se trouve en position ouverte).

En conséquence :

- La tension aux bornes du générateur de courant est nulle.

$$V = 0$$

- Le courant i_1 est égal au courant délivré par le générateur de courant.

$$i_1 = I$$

- Le courant i_2 est nul.

$$i_2 = 0$$

✚ Dans l'intervalle $\delta T < t < T$

L'interrupteur K_1 est en position bloquée, alors que l'interrupteur K_2 est en position fermée.

Par conséquent :

- La tension aux bornes du générateur de courant est égale à la tension aux bornes du récepteur (E).

$$V = E$$

- Le courant i_1 est nul (l'interrupteur K_1 est ouvert).

$$i_1 = 0$$

- Le courant i_2 équivaut au courant fourni par le générateur de courant.

$$i_1 = I$$

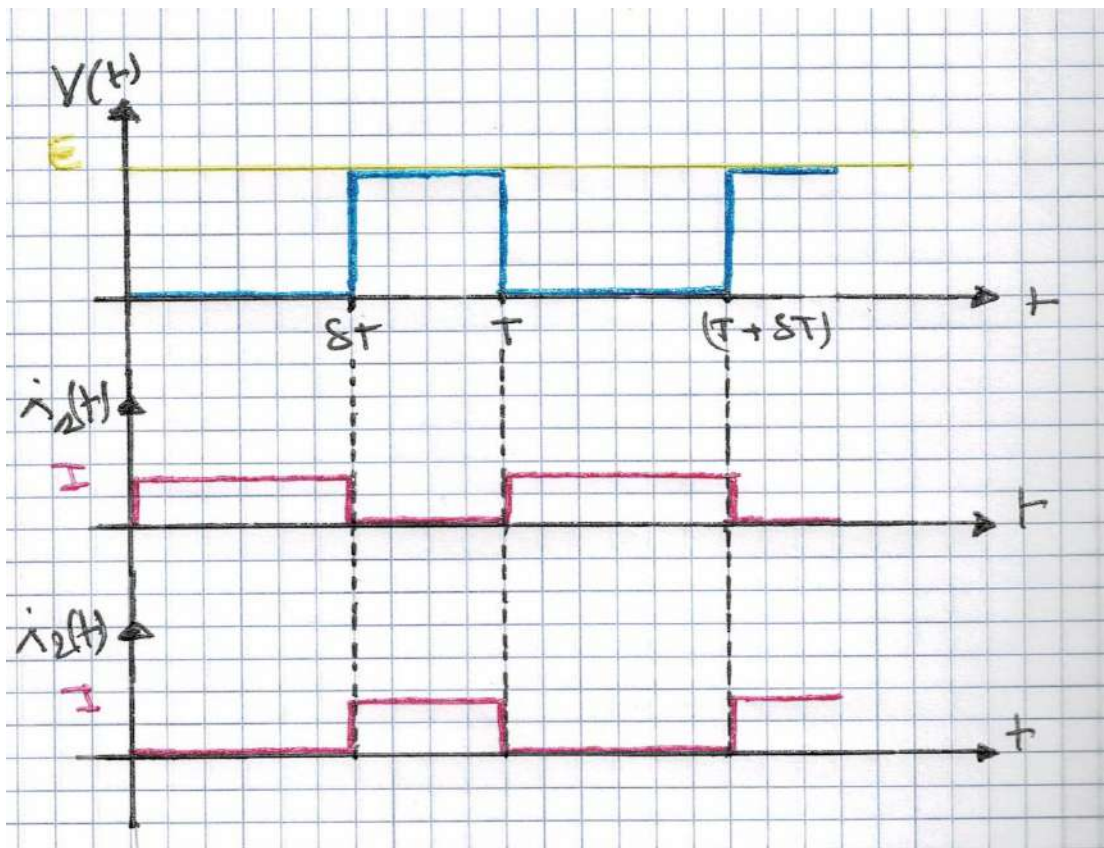


Figure 7.5.S

b) La relation relie entre la tension $V_{moyenne}$, le rapport cyclique et la tension aux bornes du récepteur

En se basant sur la courbe de la tension observée aux bornes du générateur de courant, sa valeur moyenne est calculée de la manière suivante :

$$V_{moyenne} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$$

$$V_{moyenne} = \frac{1}{T} \int_{\delta T}^T E dt$$

$$V_{moyenne} = \frac{E}{T} [T - \delta T] = E [1 - \delta]$$

$$V_{moyenne} = E [1 - \delta]$$

Exercice N°05

✚ Hacheur série

Lorsque le courant i est toujours positif, cela signifie que la diode D_I est polarisée en avant et que le semi-conducteur K_I est conducteur. Dans ce cas, la relation courant-tension pour une inductance est utilisée :

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

➤ $0 < t < \delta_1 T$

Dans cet intervalle interrupteur K_I est passant, tandis que la diode D_I bloquée. La tension aux bornes de la charge égale a la tension V .

➤ $\delta_1 T < t < T$

Dans ce deuxième intervalle la diode D_I est passante K_I et interrupteur K_I est bloqué. La tension aux bornes de la charge est nulle.

Le traçage de la forme d'onde du courant i' est basé sur la résolution de deux équations différentielles relatives pour les deux intervalles.

➤ $0 < t < \delta_1 T$

L'équation différentielle est :

$$L \frac{di}{dt} + E = V$$

➤ $\delta_1 T < t < T$

L'équation différentielle est :

$$L \frac{di}{dt} = -E$$

En utilisant la méthodologie mathématique rappelée dans le paragraphe I.1.2, les solutions des deux équations différentielles précédentes peuvent être formulées comme suit :

✚ Pour l'équation $L \frac{di}{dt} + E = V$, le processus de résolution aboutit à l'expression :

$$i(t) = \frac{1}{L} (Vt - Et) + i_0$$

✚ Dans le cas de l'équation $L \frac{di}{dt} = -E$, la solution générale est donnée par :

$$i(t) = \frac{E}{L} + i_0$$

Les constantes d'intégration dans chaque cas peuvent être déterminées en fonction des conditions initiales spécifiques du problème. Ainsi, ces formulations représentent respectivement les solutions générales des équations différentielles avec les constantes d'intégration ajustées selon les conditions initiales fournies.

Formes d'ondes

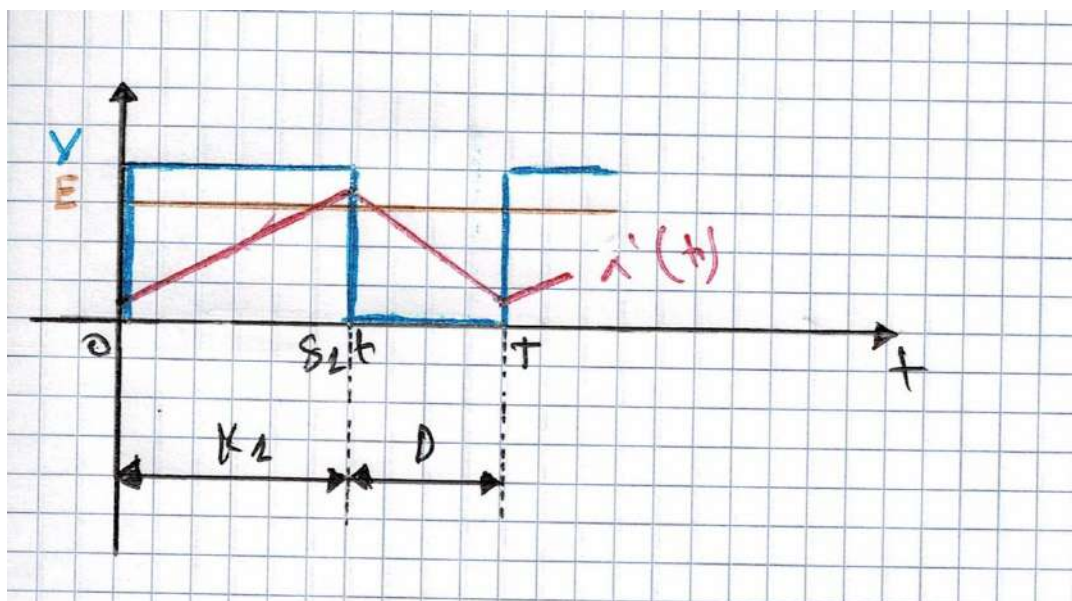


Figure 7.6.S

✓ Calcul du rapport E/V .

La formule de la tension aux bornes de la charge est :

$$L \frac{di}{dt} + E = U = V$$

Sachant que la tension moyenne aux bornes d'une bobine est nulle, la formule de la tension aux bornes de la charge devienne :

$$E = U = V$$

La tension $U_{moyenne}$ peut être calculée comme suit :

$$U_{moyenne} = \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} E dt = \frac{E}{T} [\delta_1 T - 0]$$

$$U_{moyenne} = \delta_1 E$$

Finalement on trouve que :

$$\frac{E}{V} = \delta_1$$

✚ Hacheur parallèle

En appliquant le raisonnement similaire à celui utilisé pour le hacheur série, nous aboutissons à :

Formes d'ondes

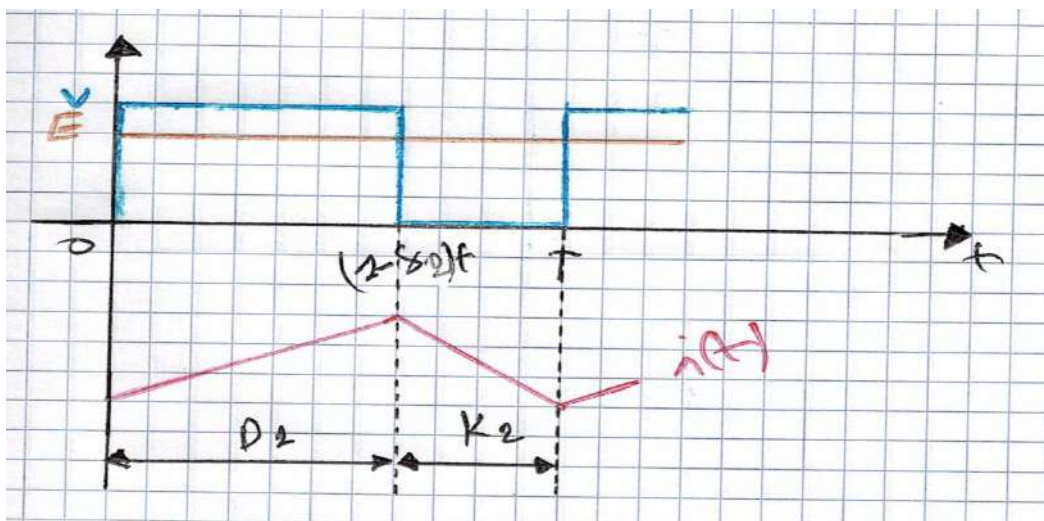


Figure 7.7.S

Le rapport E/V lorsque le courant est négatif est donné par :

$$\frac{E}{V} = 1 - \delta_2$$

Exercice N°06

a)

Les diodes positionnées en antiparallèle avec les thyristors remplissent un rôle crucial dans le processus de commutation. Elles sont conçues pour permettre la circulation du courant dans une seule direction tout en empêchant le courant inverse. Cette configuration garantit un fonctionnement sécurisé en évitant les effets indésirables tels que la réinjection inverse qui pourrait entraîner des dommages aux composants électroniques.

b)

Fonctionnement du convertisseur

➤ $0 < t < \delta T$

Les interrupteurs K_1 et K_4 sont fermés. La tension aux bornes de la charge (V_{Ch}) est égale à la tension d'alimentation (V).

$$V_{Ch} = V = R_a i_{Ch} + L_a \frac{d i_{Ch}}{dt} + E$$

➤ $\delta T < t < T$

L'état des interrupteurs K_2 et K_3 est fermé, ce qui entraîne une tension aux bornes de la charge (V_{Ch}) égale à l'inverse de la tension d'alimentation ($-V$).

$$V_{Ch} = -V$$

✚ Formes d'ondes

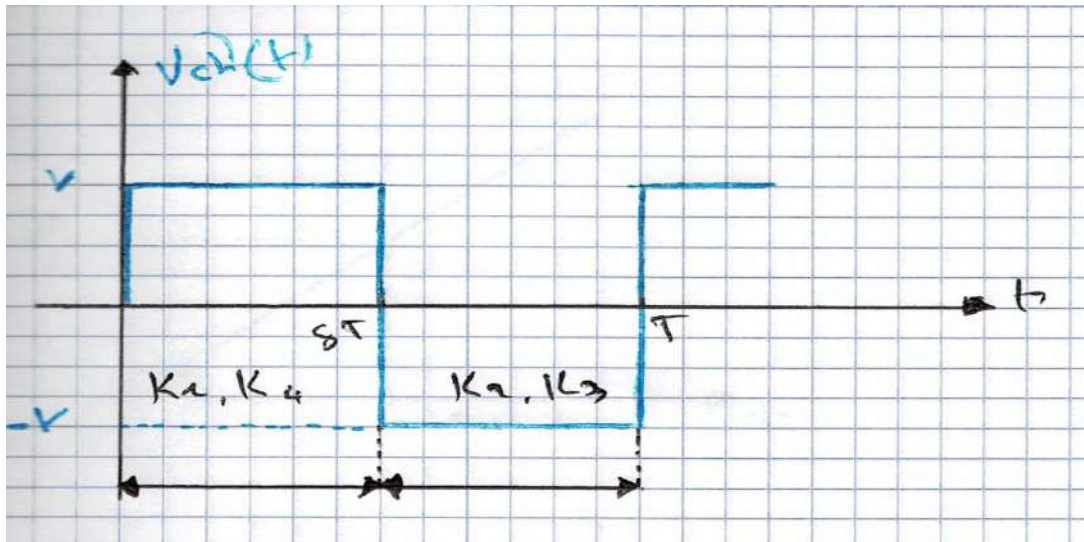


Figure 7.8.S

c)

Expression de la tension de charge moyenne

En se référant à la forme d'onde la tension de charge, la valeur moyenne de cette tension se calcule de la manière suivante :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\delta T} V_{ch}(t) dt + \int_{\delta T}^T V_{ch}(t) dt \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} [(V) \delta T + ((-V)(T - \delta T))]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = (2 \delta - 1) V$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = (2 \delta - 1) V$$

Expression du courant de charge moyen

Conformément à la loi des mailles, et en tenant compte du fait que la tension moyenne aux bornes d'une bobine est nulle, la tension moyenne aux bornes de la charge est égale à :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = R_a i_{Ch \text{ moyen}} + E$$

Cela signifie que le courant de charge moyen se calcule selon l'expression suivante :

$$i_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}} - E}{R_a}$$

$$i_{Ch \text{ moyen}} = \frac{V_{Ch \text{ moyenne}} - E}{R_a}$$

d) En se basant sur les expressions de calcul des valeurs moyennes de la tension de charge et du courant de charge moyen, notre convertisseur est réversible en quatre quadrants.

✚ A partir de la formule de la tension de charge moyenne

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = (2\delta - 1)V$$

$$\text{Si } \begin{cases} \delta < \frac{1}{2} \\ \delta > \frac{1}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{Ch \text{ moyenne}} < 0 \\ V_{Ch \text{ moyenne}} > 0 \end{cases}$$

Cela implique que le hacheur en question est réversible en tension.

✚ A partir de la formule du courant de charge moyenne

$$\text{Si } \begin{cases} \delta < \frac{1}{2} \\ \delta > \frac{1}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_{Ch \text{ moyenne}} < 0 \\ i_{Ch \text{ moyenne}} > 0 \end{cases}$$

Cela veut dire que le hacheur est réversible en courant.

FICHE DE TD N°8

Les onduleurs

Objectifs

- + Développer une connaissance approfondie des concepts fondamentaux liés aux convertisseurs onduleurs, englobant leur mécanisme de fonctionnement, les techniques de commande, ainsi que leurs applications diversifiées dans plusieurs domaines.*
- + Analyser l'influence des montages onduleurs sur les caractéristiques des signaux, incluant les formes d'ondes de tension et de courant, et évaluer les conséquences de ces modifications sur diverses charges connectées à leurs sorties.*

Enoncés

Fiche de travaux dirigés N° 8

Les onduleurs

Exercice N°1

Un onduleur monophasé produit une tension à sa sortie qui vaut 220 V . Déterminez la valeur maximale de cette tension ainsi que sa fréquence. Cette tension présente initialement une configuration d'onde carrée, puis ultérieurement une configuration d'onde sinusoïdale. La période de cette onde est égale à $0,02\text{ s}$ dans les deux cas de configurations.

Exercice N°2

Un onduleur monophasé à modulation de largeur d'impulsion (*MLI*) fonctionne avec une tension d'entrée de 24 V DC et produit une tension alternative carrée de 220 V . Si la fréquence de commutation est de 500 Hz , déterminez le rapport cyclique de la technique de commande *MLI* sachant que la durée pendant laquelle le signal de sortie est actif est égale à 10 ms .

Exercice N°3

On considère un onduleur monophasé à deux interrupteurs (K_1 et K_2). Ces derniers sont des interrupteurs électroniques commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils se ferment et ils ouvrent de façon périodique en respectant la règle suivante :

- ✚ Pour $0 \leq t < T/2$, K_1 est fermé et K_2 ouvert.
- ✚ Pour $T/2 \leq t < T$, K_2 est fermé et K_1 ouvert.

La tension d'alimentation E est égale à 500 V ($E_1 = E_2 = E$).

- a) Quel type de conversion de l'énergie électrique effectue ce dispositif ?
- b) Dessiner le schéma du montage.
- c) Tracer la tension V_{Ch} aux bornes de la charge (résistance pure) pour une fréquence de correspondant à une période de 14 ms . Calculer la fréquence correspondante.
- d) Déterminer la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge. Justifier brièvement votre réponse
- e) Déterminer la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge.

Exercice N°4

L'illustration suivante présente un onduleur composé de quatre interrupteurs électroniques contrôlés (K_1 à K_4) qui sont considérés comme idéaux. E représente une source de tension continue idéale ayant une valeur de 200 V . La charge consiste en une résistance d'une valeur de $R = 100\ \Omega$.

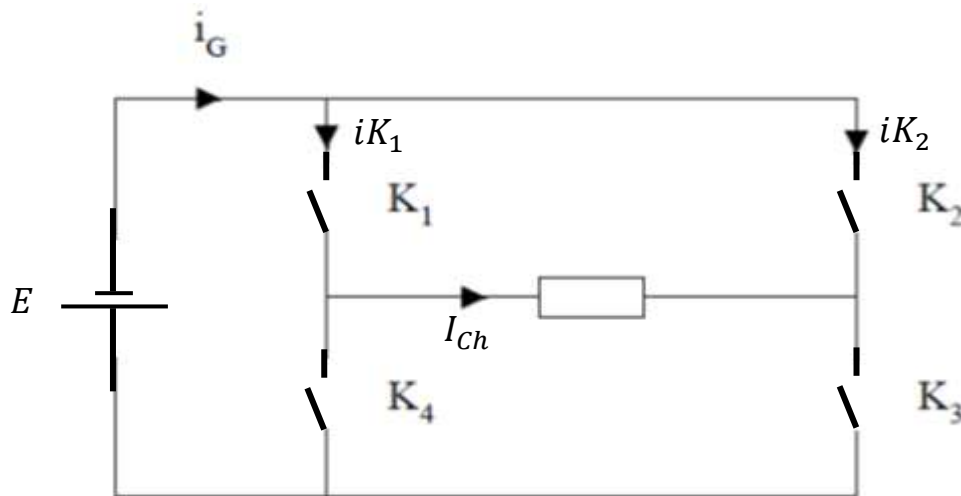


Figure 8.1.E

Les informations contenues dans le tableau ci-dessous présentent les états de conduction des interrupteurs.

	$0 < t < \beta T/2$	$\beta T/2 < t < T/2$	$T/2 < t < (1 + \beta)T/2$	$(1 + \beta)T/2 < t < T$
Interrupteur K_1	Fermé	Fermé	Ouvert	Ouvert
Interrupteur K_2	Ouvert	Fermé	Fermé	Ouvert
Interrupteur K_3	Fermé	Ouvert	Ouvert	Fermé
Interrupteur K_4	Ouvert	Ouvert	Fermé	Fermé

Tableau 8.1.E

- Enumérer des exemples d'utilisations pour ce dispositif.
- Tracer les formes d'ondes de la tension aux bornes de la charge et le courant qui la traverse (on prendra $\beta = 1/3$).
- Calculer la valeur moyenne et la valeur efficace du courant I_{Ch} .
- Calculer la puissance transmise à la charge.
- Tracer les formes d'ondes des courants i_{K1} , i_{K2} et i_G et déterminer leurs valeurs moyennes.
- Calculer la puissance moyenne fournie par la source et analyser le résultat obtenu.
- Quels composants sont adéquats pour constituer les interrupteurs dans ce contexte ?

Exercice N°5

Considérons l'onduleur illustré dans la figure ci-dessous, alimentant une charge inductive représentée par une association en série d'une résistance $R = 100 \Omega$ avec une bobine parfaite d'inductance L . La tension d'entrée est $E=220V$, et les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

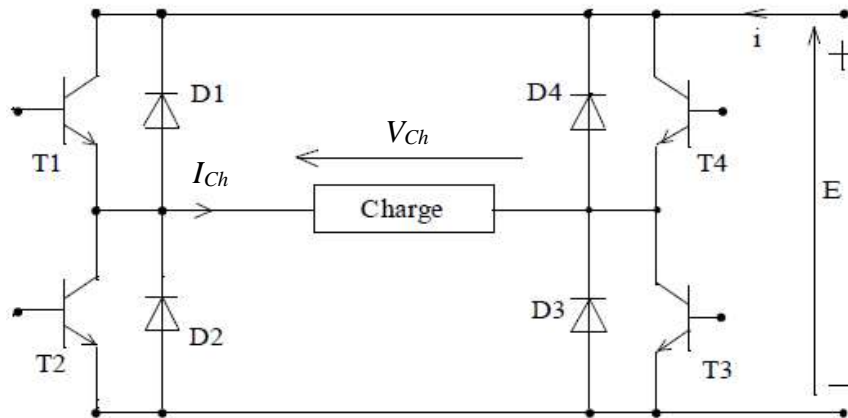


Figure 8.2.E

- On a relevé la tension $V_{Ch}(t)$ aux bornes de la charge et l'intensité $I_{Ch}(t)$ du courant qui la traverse (figure 8.3). Déterminer la période puis la fréquence de la tension délivrée par l'onduleur.
- Déterminer la valeur efficace de la tension V_{Ch} .
- Parmi les deux éléments R et L , lequel génère une dissipation de puissance active ?
- La valeur efficace de l'intensité du courant dans la charge est $I_{Ch} = 0,9 A$. Calculer la puissance active consommée par la charge.
- Exprimer le courant délivré par la source de tension en fonction du courant I_{Ch} lorsque la tension $V_{Ch}(t) > 0$ et lorsque la tension $V_{Ch}(t) < 0$.

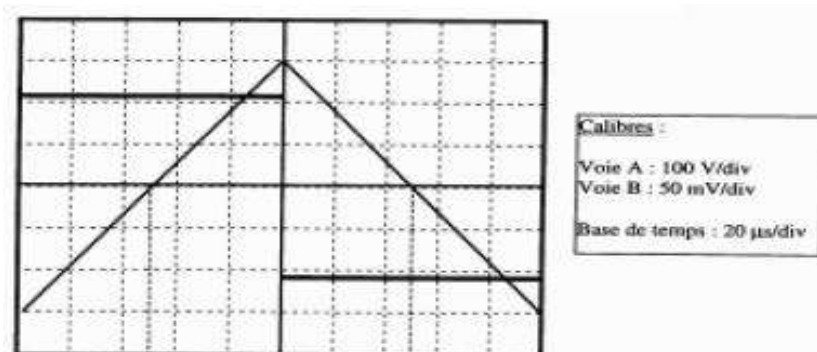


Figure 8.3.E

Exercice N°6

L'alimentation du moteur asynchrone est fournie par un onduleur triphasé à partir s'une source de tension continue. Le schéma de principe est donné à la figure 8.4. Les intervalles de fermeture des interrupteurs sont indiqués pour une période de fonctionnement à la figure 8.5. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor et d'une diode supposés parfaits.

- Tracer les formes d'ondes des trois tensions composées.
- Montrer que la tension simple de la première phase est égale à $\frac{1}{3} (U_{12} - U_{31})$ et représenter sa forme d'onde.

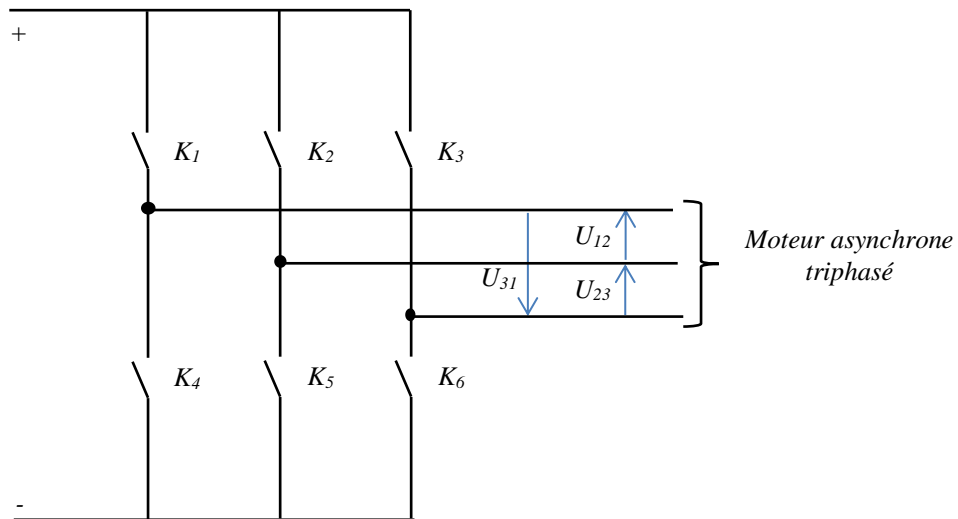


Figure 8.4.E

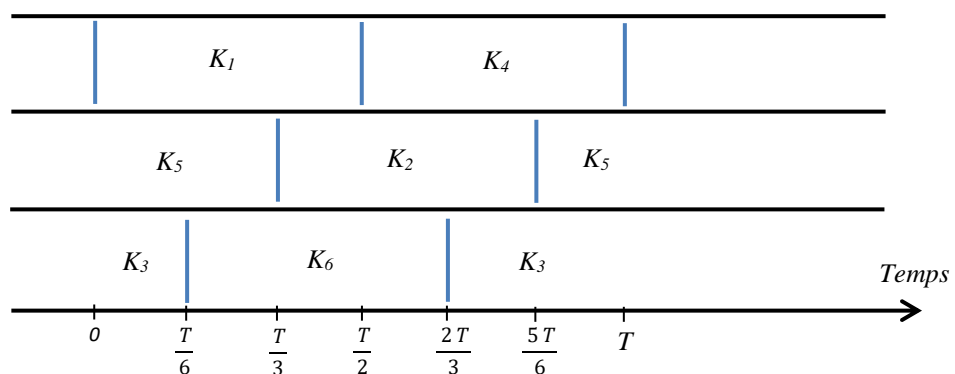


Figure 8.5.E

Solutions

Fiche de travaux dirigés N° 8

Les onduleurs

Exercice N°1

Pour résoudre cet exercice, nous allons calculer la valeur maximale (crête) de la tension ainsi que sa fréquence dans les deux cas : lorsque la tension présente une forme d'onde sinusoïdale et lorsque la tension présente une forme d'onde carrée, sachant que la période est de $0,02\text{ s}$ dans les deux configurations.

Forme d'onde sinusoïdale

Dans une onde forme sinusoïdale, la valeur crête est égale à la valeur efficace multipliée par $\sqrt{2}$.

$$V_{max} = V_{efficace} \sqrt{2}$$

AN :

$$V_{max} = 200 \sqrt{2} = 311,13\text{ V}$$

$$V_{max} = 311,13\text{ V}$$

La fréquence est calculée à partir de la période et ceci en appliquant la formule suivante :

$$T = \frac{1}{f}$$

$$\Rightarrow f = \frac{1}{T}$$

AN :

$$f = \frac{1}{0,02} = 50\text{ Hz}$$

$$f = 50\text{ Hz}$$

Forme d'onde carrée

Pour une onde carrée, la valeur crête est simplement égale à la valeur efficace.

$$V_{max} = V_{efficace}$$

AN :

$$V_{max} = 200 V$$

$$V_{max} = 200 V$$

La fréquence reste la même (même formule avec les mêmes données).

$$f = 50 Hz$$

Exercice N°2

La modulation de largeur d'impulsion (*MLI*) est une technique de contrôle qui est largement utilisée dans l'électronique de puissance pour générer des signaux de sortie de forme d'onde spécifique à partir d'un signal de référence ou d'une tension d'entrée donnée. Cette technique consiste à manipuler la largeur des impulsions d'un signal carré pour obtenir une sortie désirée.

Dans la modulation de largeur d'impulsion (*MLI*), une onde modulante (souvent une onde sinusoïdale représentant le signal de référence) est comparée à une onde porteuse de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. Lorsque l'onde modulante croise la porteuse à un niveau donné, un signal est généré pour un certain temps (la largeur de l'impulsion), et cela détermine la durée pendant laquelle le signal de sortie est actif.

Le rapport cyclique dans ce contexte est le rapport entre la durée où le signal est actif (impulsion générée) et la période totale de l'onde porteuse. Il représente la proportion de temps pendant laquelle le signal de sortie est à son niveau élevé par rapport à la période totale.

La formule pour calculer le rapport cyclique dans la MLI est donc :

$$D = \frac{\text{Durée de l'impulsion}}{\text{Période de l'onde porteuse}}$$

Durée de l'impulsion est la période pendant laquelle le signal de sortie est actif.

La période de l'onde porteuse est déterminée en se basant sur la fréquence de commutation, en utilisant la formule suivante :

$$T_{Porteuse} = \frac{1}{f_c}$$

AN :

$$T_{Porteuse} = \frac{1}{500} = 0,002 \text{ s}$$

$$T_{Porteuse} = 0,002 \text{ s}$$

Le rapport cyclique est calculé comme :

$$D = \frac{\text{Durée de l'impulsion}}{\text{Periode de l'onde porteuse}}$$

AN :

$$D = \frac{0,01}{0,002} = 5$$

$$D = 5 = 50 \%$$

Exercice N°3

- Ce dispositif assure la conversion continue – alternative.
- Schéma du montage

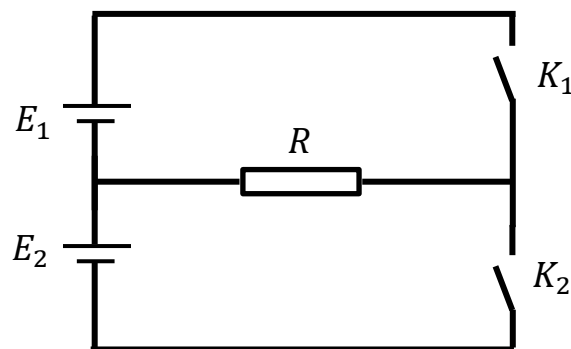


Figure 8.1.S

c)

Forme d'onde de la tension aux bornes de la charge

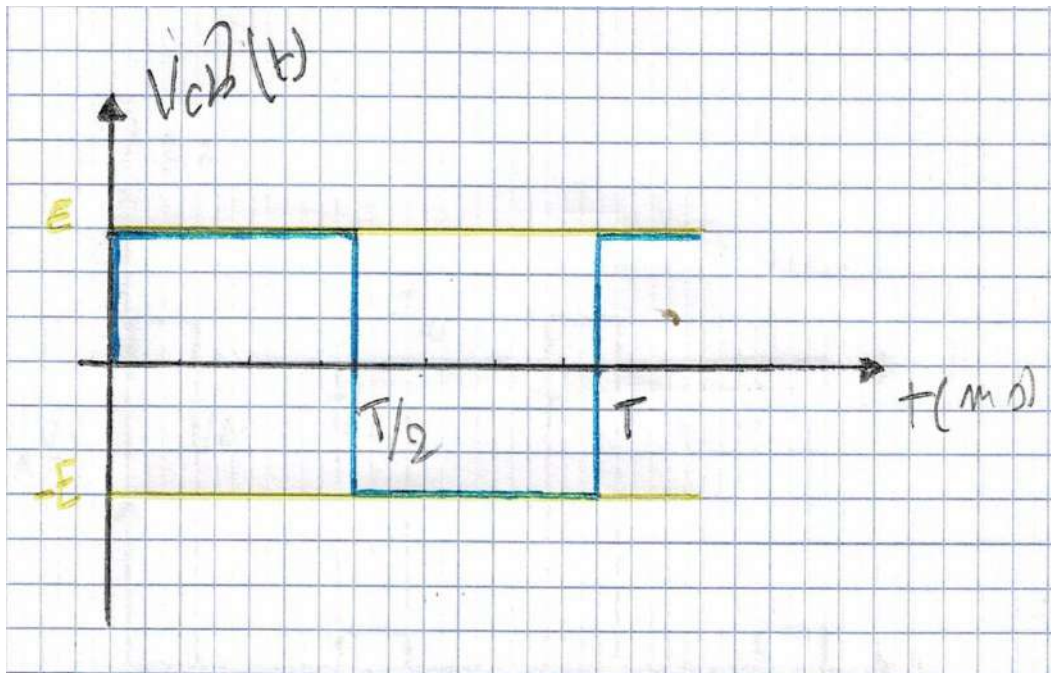


Figure 8.2.S

Calcul de la fréquence

La durée de la période pendant relative à la forme d'onde de tension aux bornes de la charge est calculée en utilisant la formule ci-dessous :

$$T = \frac{1}{f}$$

AN :

$$T = \frac{1}{0,014} = 71,43 \text{ Hz}$$

$T = 71,43 \text{ Hz}$

d) Calcul de la tension de charge moyenne

La formule employée pour déterminer la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge est la suivante :

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt$$
$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} E dt + \int_{T/2}^T (-E) dt \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{E}{T} \left[\left(\frac{T}{2} \right) + \left(-T + \frac{T}{2} \right) \right]$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = \frac{E}{T} \left[\left(\frac{T}{2} \right) + \left(-\frac{T}{2} \right) \right] = 0 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ moyenne}} = 0 \text{ V}$$

Justification :

La tension moyenne de sortie d'un onduleur de tension à deux interrupteurs peut être nulle en raison de la configuration des interrupteurs et de leur séquence d'activation. Si les interrupteurs sont commutés de manière synchronisée pour générer des cycles alternés de tension positive et négative avec des durées égales, les valeurs positives et négatives s'annuleront mutuellement sur la période complète, conduisant à une tension moyenne nulle.

e) Calcul de la tension de charge efficace

La formule utilisée pour calculer la tension efficace aux bornes de la charge est :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}^2(t) dt}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} E^2 dt + \int_{T/2}^T (-E)^2 dt \right]}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}}^2 = \frac{E^2}{T} \left[\left(\frac{T}{2} \right) - \left(-T + \frac{T}{2} \right) \right] = E^2$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{E^2} = E$$

AN :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = E = 500 \text{ V}$$

$$V_{Ch \text{ efficace}} = 500 \text{ V}$$

Exercice N°4

a) Il existe de nombreuses applications pour ce dispositif, dont voici quelques exemples :

Alimentation sans interruption :

Les onduleurs sont utilisés pour fournir une alimentation de secours en cas de coupure de courant, garantissant un fonctionnement continu des appareils sensibles tels que les ordinateurs et les serveurs.

Commande de moteurs :

Dans l'automatisation industrielle, les onduleurs sont employés pour contrôler la vitesse et la direction de rotation des moteurs électriques, ce qui permet des opérations précises et efficaces.

Alimentation des appareils électroniques :

Les onduleurs sont utilisés pour fournir une alimentation de haute qualité aux équipements sensibles tels que les ordinateurs, les équipements médicaux et les systèmes de communication.

Systèmes de climatisation :

Les onduleurs sont employés pour contrôler la vitesse des compresseurs dans les systèmes de climatisation, ce qui permet de réguler la température de manière plus économe en énergie.

Applications de soudage :

Les onduleurs sont utilisés dans les machines de soudage pour fournir un courant stable et ajustable, ce qui est essentiel pour réaliser des soudures de haute qualité.

Alimentation des véhicules électriques :

Les onduleurs sont utilisés dans les chargeurs de véhicules électriques pour convertir le courant alternatif du réseau en courant continu pour charger les batteries.

Applications dans les énergies renouvelables :

Les onduleurs sont employés pour transformer l'énergie électrique engendrée par les panneaux solaires en une forme exploitable afin d'alimenter les dispositifs électriques. De plus, ces convertisseurs sont également utilisés en association avec les éoliennes pour convertir le courant alternatif variable engendré par celles-ci en un courant alternatif stable et synchronisé avec le réseau.

b) Formes d'ondes de la tension aux bornes de la charge et du courant qui la traverse

Afin de tracer les formes d'ondes de la tension aux bornes de la charge et le courant qui la traverse, il est nécessaire de déterminer leurs expressions respectives dans chaque intervalle. Les formulations de ces expressions sont déduites des informations fournies dans le tableau 8.1.E (énocés).

Les interrupteurs de puissance d'un onduleur de tension monophasé, disposés en configuration de pont complet sur un même bras, ne sont pas opérationnels en simultané. Ils sont plutôt activés de manière séquentielle. Cette approche est adoptée pour obtenir un contrôle plus précis de la tension en sortie, diminuer les possibilités de court-circuit, réduire les pertes énergétiques et améliorer la qualité de la forme d'onde générée.

$$\text{➤ } 0 < t < \beta T/2$$

L'interrupteur K_1 fermé, l'interrupteur K_2 ouvert, l'interrupteur K_3 fermé et l'interrupteur K_4 ouvert. La tension V_{ch} et le courant I_{ch} sont égaux à :

$$\begin{cases} V_{ch} = E \\ I_{ch} = \frac{E}{R} \end{cases}$$

$$\text{➤ } \beta T/2 < t < T/2$$

L'interrupteur K_1 fermé, l'interrupteur K_2 fermé, l'interrupteur K_3 ouvert et l'interrupteur K_4 ouvert.

$$\begin{cases} V_{ch} = 0 V \\ I_{ch} = 0 A \end{cases}$$

$$\text{➤ } T/2 < t < (1 + \beta)T/2$$

L'interrupteur K_1 ouvert, l'interrupteur K_2 fermé, l'interrupteur K_3 ouvert et l'interrupteur K_4 fermé.

$$\begin{cases} V_{ch} = -E \\ I_{ch} = -\frac{E}{R} \end{cases}$$

$$\text{➤ } (1 + \beta)T/2 < t < T$$

L'interrupteur K_1 ouvert, l'interrupteur K_2 ouvert, l'interrupteur K_3 fermé et l'interrupteur K_4 fermé.

$$\begin{cases} V_{ch} = 0 V \\ I_{ch} = 0 A \end{cases}$$

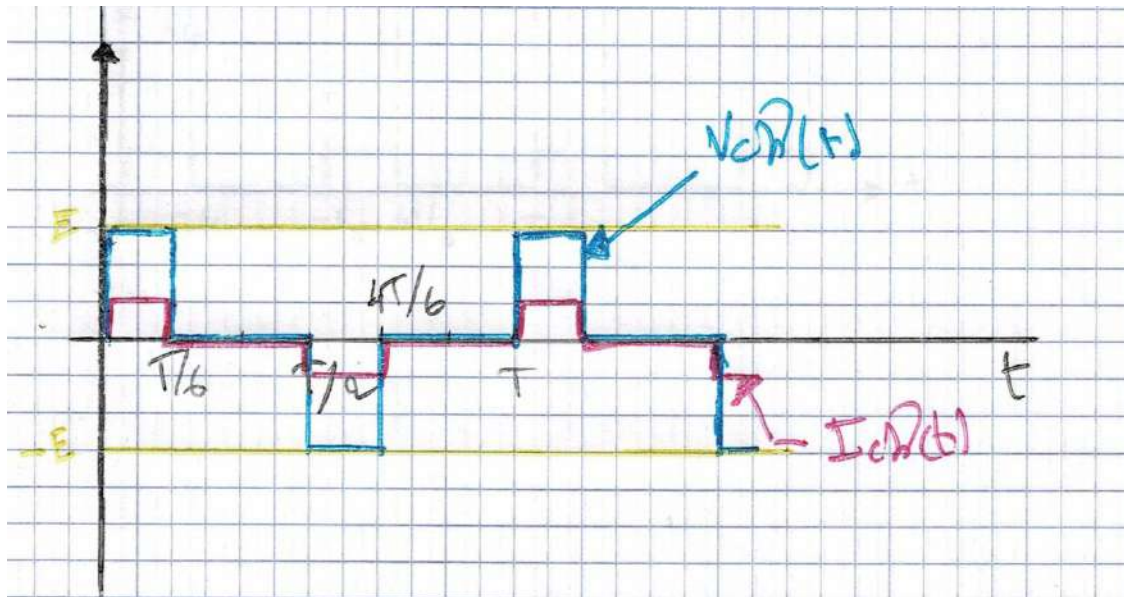


Figure 8.3.S

c) Calcul de la valeur moyenne et la valeur efficace du courant

Courant de charge moyen

Le calcul du courant moyen traversant la charge repose sur la forme d'onde du courant ainsi que sur la formule fondamentale de calcul de la valeur moyenne.

$$I_{ch \text{ moyen}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{ch}(t) dt$$

$$I_{ch \text{ moyen}} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{T/6} \frac{E}{R} dt + \int_{T/2}^{4T/6} \left(-\frac{E}{R}\right) dt \right]$$

$$I_{ch \text{ moyen}} = \frac{E}{T R} \left[\left(\frac{T}{6}\right) + \left(-\frac{4T}{6} + \frac{T}{2}\right) \right]$$

$$I_{ch \text{ moyen}} = \frac{E}{T R} \left[\left(\frac{T}{6}\right) + \left(-\frac{T}{6}\right) \right] = 0 A$$

$$I_{ch \text{ moyen}} = 0 A$$

Courant de charge efficace

De manière similaire au calcul du courant moyen, le calcul du courant efficace qui traverse la charge est basé sur forme d'onde du courant et la formule fondamentale de calcul de la valeur efficace.

$$I_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{ch}^2(t) dt}$$

$$I_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^{T/6} \left(\frac{E}{R}\right)^2 dt + \int_{T/2}^{T^4 T/6} \left(-\frac{E}{R}\right)^2 dt \right]}$$

$$I_{Ch \text{ efficace}}^2 = \frac{E^2}{T R^2} \left[\left(\frac{T}{6}\right) - \left(-\frac{4T}{6} + \frac{T}{2}\right) \right]$$

$$I_{Ch \text{ efficace}}^2 = \frac{I_{ch}^2}{T} \left[\frac{T}{3} \right]$$

$$I_{Ch \text{ efficace}}^2 = \frac{I_{ch}^2}{3}$$

$$I_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{I_{ch}^2}{3}}$$

AN :

$$I_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{E}{R}\right)^2}{3}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{200}{100}\right)^2}{3}} = 1.155 A$$

$$I_{Ch \text{ efficace}} = 1.155 A$$

d) Calcul de la puissance transmise à la charge

Le calcul de la puissance transmise à la charge s'effectue en utilisant la formule ci-après :

$$P_{Ch} = R I_{Ch \text{ efficace}}^2$$

AN :

$$P_{Ch} = 100 \times 1.155^2 = 133,28 W$$

$$P_{Ch} = 133,28 W$$

e)

Formes d'ondes des courants i_{K1} , i_{K2} et i_G

Le courant i_{K1} est équivalent à E/R lorsque l'interrupteur $K1$ est en position fermée. En revanche, ce courant est nul lorsque l'interrupteur $K1$ est en position ouverte.

$$i_{K1} = \frac{E}{R} \quad \text{dans l'intervalle } 0 < t < T/6$$

Idem pour le courant i_{K2} . Lorsque l'interrupteur $K2$ est fermé, le courant i_{K2} est égal à E/R . Cependant, ce courant devient nul lorsque l'interrupteur $K2$ est ouvert.

$$i_{K2} = \frac{E}{R} \quad \text{dans l'intervalle } T/2 < t < 4T/6$$

En appliquant la loi des nœuds à notre circuit, nous obtenons que :

$$i_G = i_{K1} + i_{K2}$$

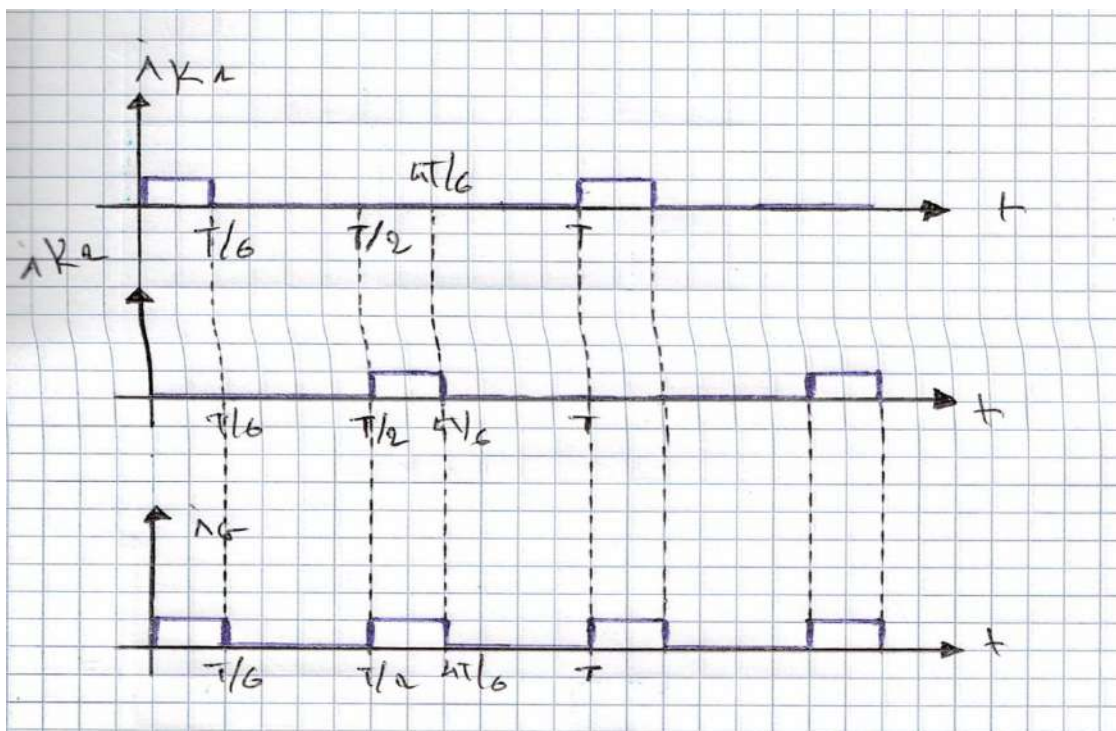


Figure 8.4.S

Calcul des valeurs moyennes des courants i_{K1} , i_{K2} et i_G

D'après les formes d'ondes illustrées sur la figure 8.4, il est observable que le courant i_{K1} est équivalent au courant i_{K2} (surfaces égales).

$$ik_{1 \text{ moyen}} = ik_{2 \text{ moyen}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{ch}(t) dt$$

$$I_{ch \text{ moyen}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/6} \frac{E}{R} dt$$

$$I_{ch \text{ moyen}} = \frac{E}{R} \left(\frac{1}{6}\right)$$

AN :

$$ik_{1 \text{ moyen}} = ik_{2 \text{ moyen}} = \frac{200}{100} \left(\frac{1}{6}\right) = 0,33 A$$

$$ik_{1 \text{ moyen}} = ik_{2 \text{ moyen}} = 0,33 A$$

En considération des formes d'ondes illustrées dans la figure 8.4 et en conformité avec la loi des nœuds, le courant moyen fourni par le générateur est égal à :

$$i_G \text{ moyen} = ik_{1 \text{ moyen}} + ik_{2 \text{ moyen}}$$

AN :

$$i_G \text{ moyen} = 0,33 + 0,33 = 0,66 A$$

$$i_G \text{ moyen} = 0,66 A$$

f) Calcul de la puissance fournie par le générateur

La détermination de la puissance fournie par le générateur s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$P_G = E i_G \text{ moyen}$$

AN :

$$P_G = 200 \times 0,66 = 132 W$$

$$P_G = 132 W$$

En comparant la puissance transmise à la charge avec la puissance fournie par le générateur, on constate que la puissance reçue par la charge est identique à celle fournie par le générateur. Cela indique que le rendement de notre onduleur est de 100% . En d'autres termes, aucune perte n'est présente dans les interrupteurs utilisés, ce qui est conforme à l'hypothèse de perfection des interrupteurs.

g)

Les composants appropriés pour former les interrupteurs de l'onduleur sont des dispositifs commandables capables d'effectuer des cycles d'ouverture et de fermeture. Dans la pratique, des semi-conducteurs de puissance tels que le transistor bipolaire *BJT*, le thyristor *GTO*, le transistor *MOSFET*, ou encore le transistor *IGBT* sont communément utilisés.

Exercice N°5

a)

Calcul de la période de la tension délivrée par l'onduleur

La période peut être obtenue en multipliant la lecture par la base de temps.

En examinant la figure 8.3.E (énoncés), notons que la base de temps est réglée à $20\mu\text{s}/\text{div}$, et la lecture affiche une valeur de 10.

$$T = \text{base de temps} \times \text{lecture}$$

AN :

$$T = 20 \cdot 10^{-6} \times 10 = 0,0002 \text{ s}$$

$$T = 0,0002 \text{ s}$$

Calcul de la fréquence de la tension délivrée par l'onduleur

La formule suivante permet de calculer la fréquence.

$$f = \frac{1}{T}$$

AN :

$$f = \frac{1}{0,0002} = 5000 \text{ Hz} = 5\text{kHz}$$

$$f = 5000 \text{ Hz} = 5\text{kHz}$$

b) Calcul de la tension de charge efficace

La formule employée pour déterminer la tension efficace aux bornes de la charge est :

$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}^2(t) dt}$$
$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} E^2 dt + \int_{T/2}^T (-E)^2 dt \right]}$$
$$V_{Ch \text{ efficace}}^2 = \frac{E^2}{T} \left[\left(\frac{T}{2} \right) - \left(-T + \frac{T}{2} \right) \right] = E^2$$
$$V_{Ch \text{ efficace}} = \sqrt{E^2} = E$$

En référence à la figure 8.3.E (énoncés) et aux données de l'exercice, la tension E est égale à 220V. Ainsi, la tension efficace aux bornes de la charge est également de 220V.

$$V_{Ch \text{ efficace}} = 200 \text{ V}$$

c) L'élément qui génère une dissipation de puissance active est la résistance.

d) Calcul de la puissance consommée par la charge

La formule utilisée pour calculer la puissance absorbée par la charge est :

$$P_{Ch} = R I_{Ch \text{ efficace}}^2$$

AN :

$$P_{Ch} = 100 \times 0,9^2 = 81 \text{ W}$$

$$P_{Ch} = 81 \text{ W}$$

e) L'expression de du courant i lorsque la tension aux bornes de la charge est positive puis négative

✚ Tension aux bornes de la charge positive.

$$V_{Ch}(t) > 0 \quad \Rightarrow \quad i = I_{Ch}$$

✚ Tension aux bornes de la charge négative.

$$V_{Ch}(t) < 0 \quad \Rightarrow \quad i = -I_{Ch}$$

Exercice N°6

a) Formes d'ondes des tensions composées

Pour représenter graphiquement les formes d'ondes des tensions composées à la sortie de l'onduleur, il est nécessaire de déterminer les expressions de ces tensions dans chaque intervalle.

Nous débutons par le premier intervalle ($0 < t < T/6$), où nous chercherons les formulations de ces tensions. Ensuite, nous appliquerons le même principe aux autres intervalles de temps.

✚ $0 < t < T/6$

D'après la figure 8.5 (énoncés) les interrupteurs fermés sont K_1 , K_3 et K_5 . On obtient donc :

$$\begin{cases} U_{12} = E \\ U_{23} = -E \\ U_{31} = 0 \end{cases}$$

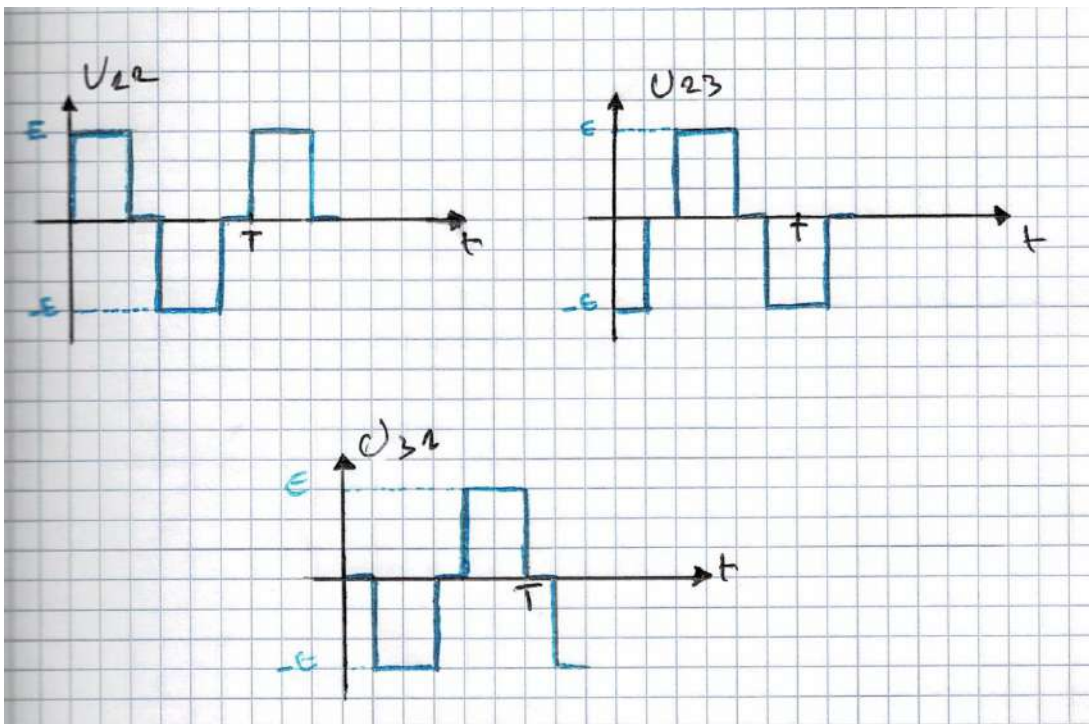


Figure 8.5.S

b) Démonstration de $V_1 = \frac{1}{3} (U_{12} - U_{31})$

La tension composée entre la première et la deuxième phase ainsi la tension composée entre la troisième et la première phase, sont respectivement égaux a est égale a :

$$\begin{cases} U_{12} = (V_1 - V_2) \\ U_{31} = (V_3 - V_1) \end{cases}$$

Pour un système triphasé équilibré on a :

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0$$

A partir de cette dernière équation, la tension V_1 est égale a :

$$V_1 = -(V_2 + V_3)$$

Donc :

$$U_{12} - U_{31} = [(V_1 - V_2) - (V_3 - V_1)] = 3 V_1$$

Finalement on trouve :

$$V_1 = \frac{1}{3} (U_{12} - U_{31})$$

Forme d'onde de tension simple de la première phase

L'élaboration du graphique de la tension simple repose sur le résultat obtenue dans la réponse à la question précédente.

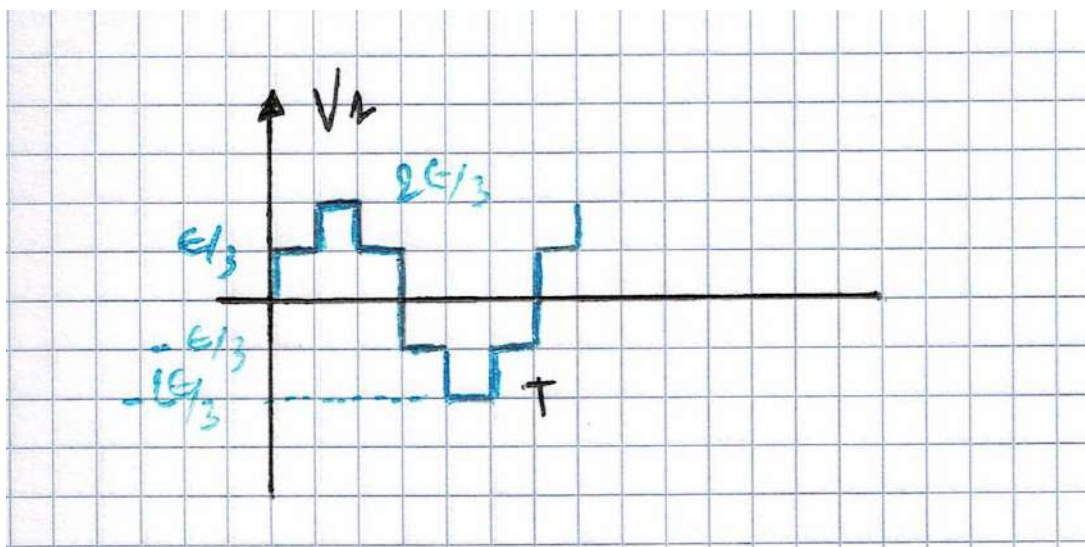


Figure 8.6.S

- [1] J. Pichon, « *Trigonométrie-Fonctions usuelles* », Edition Ellipses, 1998.
- [2] E. Ait Outoulboun, « *Introduction à la trigonométrie* », Maths Edition, 2020.
- [3] J. P. Javet, « *Notions élémentaires d'algèbre et de trigonométrie* », Polycopié de cours de mathématiques, <http://www.gymomath.ch/javmath/polycopie/1MRe%20Notion%20elem.pdf>
- [4] J. R. Heu, L. Teyssier, « *Analyse* », Edition Dunod, 2022.
- [5] S. Balac, F. Sturm, « *Algèbre et d'analyse* », Deuxième Edition, Presses polytechniques et universitaires romandes, Collection METIS Lyon Tech, 2008.
- [6] A. Bodin, « *Equation différentielles* », Cours mathématiques, http://exo7.emath.fr/cours/ch_equadiff.pdf
- [7] J.M. Richard, « *Équations algébriques et différentielles, circuits électriques, collisions* », Document internet, 2009. <https://cours.ip2i.in2p3.fr/richard/LicencePRO.pdf>
- [8] Y. Granjon, « *L'essentiel d'électricité* », Edition Dunod, 2021.
- [9] M. Piou, « *Les lois de l'électricité* », Collection Technosup, Edition Ellipses, 2010.
- [10] P. Baudoux, « *Précis d'électricité fondamentale* », Deuxième Edition, Edition Eyrolles, Presses universitaires de Bruxelles, 1974.
- [11] F. Christoph, « *Génie électrique* », Ellipses Edition Marketing, 2004.
- [12] A. H. Robbins, W. C. Miller, « *Circuit Analysis: Theory and Practice* », Fifth Edition, Delmar Cengage Learning, 2012.
- [13] D. R. Cunningham, J. A. Stuller, « *Circuit Analysis* », Second Edition, Wiley, 1995.
- [14] M. Bergounioux, « *Mathématiques pour le traitement du signal* », Deuxième Edition, Edition Dunod, 2014.
- [15] D. Perrin, « *Les series de Fourier* », Cours mathématiques, <https://www.math.u-bordeaux.fr/~fjouve001/FourierNotes.pdf>
- [16] R. L. Boylestad, « *Analyse de circuits* », Second Edition, Editeur Pearson, 1995.
- [17] G. Chateigner, M. Boes, D. Bouix, J. Vaillant, « *Analyse de circuit* », Edition Dunod, Sciences sup, 2022.
- [18] D. Gaude, « *Electrotechnique, Electronique de puissance, Régulation et asservissement* », Edition Eyrolles, 2014.
- [19] V. Léger, « *Conversion d'énergie, Electrotechnique, Electronique de puissance* », Troisième Edition, Ellipses, 2014.
- [20] F. Milsant, « *Electricité générales, électronique de base* », Edition Ellipses, 1995.
- [21] F. Milsant, « *Composants électroniques* », Edition Dunod, 1998.
- [22] C. Chevassu, « *Electronique de puissance, Principe* », Polycopié de cours, Ecole nationale supérieure maritime, 2013. <http://mach.elec.free.fr/electronique-puissance/cours-electronique-puissance.pdf>
- [23] F. Naceri, « *Electronique de puissance* », Polycopié de cours, université de Batna. https://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/naceri_farid/files/electronique_de_puissance-.pdf
- [24] Document internet, « *la locomotive a redresseurs* », https://lens.google.com/search?ep=gisbubb&hl=fr-DZ&re=df&p=AbrfA8oMUOoh_ZRInioS5_uEUE4WhOcgbp5GXLAq2eIjBsQuJc5AXuJaHg0ruDjKMBCQ8CW87A3SnGVcP0v8tKG62yhtZWwACKZeTu05q2VjJZL1t_nMkLkctZDIuwIYTggJlbQ_0rqCym8jzRHTIOPW6FB1tqBMyh8WKJ2PyYkCzR6KF6HNHp4lpKqybcjXvUYk0dJuoExunJsBSdFKYtTsvggOEiW95B05YXS86IDAA75cCjWfbd2BGGadJO#Ins=W251bGwsbnVsbCxudWxsLG51bGwsbnVsbCxudWxsLG51bGwsIkVrY0tKRfI5Tm1FME1URmlMV0ZtTUdNdE5HTmxZeTFpTW1abUxUWm1OakE1TIRNMVIXTm1PUklmUIMxbVpFcFFTRkV4YIUxbFRVbG5SM0JuU1V4dVVETlpaRUkwVFhsb1p3PT0iLG51bGwsbnVsbCxbW251bGwsbnVsbCwiMC0xM

- [CJdLFsiODM0ODg2OTItMzdjNS00YmNkLTg0YWYtMmNiYTdlZWQ4OGVmlldXQ](#)
- [25] G. Séguier, F. Labrique, P. Delarue, « *Electronique de puissance* », Neuvième Edition, Editeur de savoirs, Edition Dunod, 2011.
- [26] Document internet, « *Electronique, Triac* », <http://bxtronics.free.fr/dossiers/index.htm>
- [27] M. Rashid, « *Power electronics handbook. Devces, circuits and applications* », Third Edition, Elsevier Inc, All rights reserved, 2011.
- [28] Document internet, « *Electronique en amateur* », <https://electroniqueamateur.blogspot.com/2016/01/explorons-les-transistors-bipolaires.html>
- [29] O. Demane, « *Simulation et étude expérimentale d'un hacheur dévolteur à base d'un MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor)* », Mémoire de master, Génie électrique, Université de Batna, 2011.
- [30] D. B. Nguyen, « *Intégration fonctionnelle autour des composants quatre quadrants avec l'application à la conversion AC/AC* », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2008.
- [31] J. Mignard, C. Pin, « *Les redresseurs* », Ellipses Edition Marketing, 2010.
- [32] C. Francois, « *Les grandes fonctions de la chaine d'énergie* », Edition Ellipses, 2014.
- [33] F. Bouchafaa, « *Electronique de puissance* », Polycopié de cours, université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene, Faculté d'Electronique et d'Informatique, 2010. <https://www.mcours.net/cours/pdf/leilcllic1/leilcllic149.pdf>
- [34] C. Francois, « *Les grandes fonctions de la chaine d'énergie* », Edition Ellipses, 2014.
- [35] A. Cunière, G. Feld, M. Lavabre, « *Electronique de puissance* », Editions Casteilla, 2012.
- [36] H. Buhler, « *Electronique de puissance* », Presses polytechniques romandes, Edition Dunod, 1989.
W. El Fezzani, « *Modélisation et commande d'un hacheur* », Editeur Noor Publishing, 2018.
- [37] H. Buhler, « *Convertisseurs statiques* », Presses polytechniques et universitaires Romandes, 1991.
- [38] G. Segulier, « *Electronique de puissance. Les fonctions de base et leurs principales applications* », Edition Dunod, 7^e édition, Paris, 1999.
- [39] G. Segulier, « *Les convertisseurs de l'électronique de puissance. La conversion continu-alternatif* », Vol. 1, 2^e édition, Lavoisier TEC & DOC, 1992.
- [40] H. Foch, Y. Chéron, R. Arches, B. Escaut, P. Marty, M. Metz, « *Convertisseurs continu-alternatif et alternatif-continu* », Techniques de l'ingénieur, traité de génie électrique, D 3170.
- [41] M. Loucif, A. Mchernene, « *Electronique de puissance* », Polycopié de travaux dirigés, Université Abou Bekr Belkaid, Faculté de Technologie, Département du Génie Electrique et Electronique, Tlemcen, 2019.