REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Etude de la compatibilité Electromagnétique dans les circuits de conversion d'énergie

Présenté par :

M. HADJADJ FAIZ

M. ABNA MOKHTAR

Proposé et Dirigé par :

Dr. Langueur Omar

Pr. Henini Noureddine

Promotion 2023

Remerciements

Nous tenons à remercier dieu le tout puissant qui nous a donné la santé et la persévérance pour accomplir ce projet.

De plus, ce travail n'aurait pas été aussi riche et n'aurait pas vu le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. Langueur Omar et Pr. Henini Noureddine et Messieurs du jury Dr. Chiba Younes et Dr. Ferrai Ahmed Nous le remercions pour sa guidance, sa patience, son expertise et sa disponibilité tout au long de notre projet.

Également, nous sommes empreints d'une profonde reconnaissance envers les enseignants qui ont été des guides remarquables tout au long de notre parcours académique, particulièrement envers les enseignants du département d'Instrumentation pour leur dévouement et leur engagement envers notre réussite.

Pour terminer, nous aimerions remercier chaleureusement nos parents pour leur amour inconditionnel.

Nous ne serions pas là où nous en sommes aujourd'hui sans leur aide et leurs encouragement

DÉDICACES

J'ai l'immense honneur de dédier ce projet de fin d'études :

A ma mère, A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, Qu'elle trouve dans ce

Mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices,

L'extrême amour et la bonté, Qu'elle m'a offert pour me voir réussir.

A mon père, A l'homme à qui je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ;

Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi.

Je dédie ce travail aussi à mes très chers frères et mes très chères sœurs.

A ma meilleure Binôme Faiz Hadjadj

A mes amis YOUSSOUF, NACER, YOUCEF, MOUNIR, ABDERRAOUF, ANIS et ABDERRAHMANE.

A mes collègues étudiants de ma promotion 2023

MOKHTAR

DÉDICACES

Premièrement Je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté

D'entamer et de terminer ce mémoire.

Je dédier cette thèse à :

À la mémoire de mes deux grands-pères paternels et maternelle

A tout ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire

Mes frères Abdelkader et Othman et ma sœur

Mes chères père et mère pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien

Leur prière tout au long de mes études.

À mes amis ZAKI, Hamza, Aymen, Taleb, Mohamed, Alaa. Chaker, aymen, Youssef, Abdou Abdelkader et mon

Binôme

Mokhtar abna

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du

Secondaire ou de l'enseignement supérieur.

FAIZ

الملخص

في عصر التكنولوجيا يعد مجال الكترونيك القوة من اهم المجالات وقد شهد هذا المجال تطورا كبيرا خاصة السنوات الاخيرة واصبح له دور في حياتنا اليومية والاجهزة المستعملة دائما خاصة الهاتف النقال والحاسوب وفي هذا الصدد سنحاول جاهدين للتقليل من سلبياته في مجال التوافق الكهرومغناطيسي

يهدف هذا المشروع الى دراسة دارة المحول Hacheur boost في تطبيق comsol للتقليل من اضرار الحقل المغناطيسي على مكونات الدارة والجهاز وعلى الانسان

اظهرت النتائج ان تطبيقcomsol فعال في التقليل من نسبة الحقل المغناطيسي الضائع وتحسن جودة عمل الدارة وفي حالتنا هذه كانت النتائج مرضية

الكلمات المفتاحية : الكترونيك القوة ,الحقل المغناطيسي ,المحول (Hacheur boost) ,التوافق الكهرومغناطيسي.

Résumé

À l'ère de la technologie, le domaine de l'électronique de puissance est l'un des domaines les plus importants. Ce domaine a connu une évolution considérable, notamment ces dernières années, et il joue désormais un rôle essentiel dans notre vie quotidienne, en particulier avec l'utilisation constante de dispositifs tels que les téléphones portables et les ordinateurs. Dans ce contexte, nous nous efforçons de réduire ses aspects négatifs dans la domaine de la compatibilité électromagnétique.

Ce projet vise à étudier le circuit du convertisseur hacheur boost dans l'application COMSOL afin de réduire les dommages du champ magnétique sur les composants du circuit, les appareils et les êtres humains.

Les résultats ont montré que l'application COMSOL est efficace pour réduire le taux de champ magnétique perdu et améliorer la qualité de fonctionnement du circuit. Dans notre cas, les résultats étaient satisfaisants.

Mots-clés : compatibilité électromagnétique , champ magnétique , convertisseur(hacheur).

Abstract

In the age of technology, power electronics is considered one of the most important fields. This field has witnessed significant development, especially in recent years, and it has become essential in our daily lives, particularly with the widespread use of devices such as mobile phones and computers. In this regard, we strive to minimize its drawbacks in the filed of electromagnetic compatibility.

This project aims to study the circuit of the boost converter in the COMSOL application to reduce the harmful effects of the magnetic field on the circuit components, devices, and humans. The results have shown that the application of COMSOL is effective in reducing the percentage of the stray magnetic field and improving the quality of circuit operation. In our case, the results were satisfactory.

Keywords : electromagnetic compatibility, magnetic field, transformer(boost converter).

Table des matiéres

LISTE DES ABREVIATIONS XIII

LISTES DES SYMBOLES XIII

INTRODUCTION GENERALE 1

INTRODUCTION 3

I.1. DEFINITION DE LA CEM 3

I.2. LES PARASITES 4

I.3. LES SOURCES DE PERTURBATIONS 5

I.4. LES RISQUES 5

I.5. LES NORMES 6

I.5.1. NORMES FONDAMENTALES 7

I.5.2. NORMES GENERIQUES 8

I.6. TERMINOLOGIE 9

CONCLUSION 10

INTRODUCTION 11

II.1. LES COMPOSANTS ELECTRONIQUES 11

II.3.1. LES DIODES 11

II.3.1. LE THYRISTOR 12

II.2. LES REDRESSEURS 12

II.2.1. LES REDRESSEURS MONOPHASES NON COMMANDES 12

II.2.1.1. REDRESSEUR MONOPHASE SIMPLE ALTERNANCE NOM COMMANDE 12

II.2.1.2. REDRESSEUR MONOPHASE SIMPLE ALTERNANCE NOM COMMANDE AVEC DIODE DE ROUE LIBRE 13

II.2.1.3 . REDRESSEUR MONOPHASE DOUBLE ALTERNANCE NON COMMANDE 14

II.2.2. LES REDRESSEURS COMMANDES 14

II.2.2.1. REDRESSEUR MONOPHASE SIMPLE ALTERNANCE TOTALEMENT COMMANDE 14

II.2.2.2. REDRESSEUR MONOPHASE SIMPLE ALTERNANCE SEMI COMMANDE 15

II.2.3. REDRESSEUR TRIPHASE 16

II.3.1. LES DIFFERENTS TYPES D'ONDULEUR 17

II.4. LES GRADATEURS 18
II.4.1 LES DIFFERENTS TYPES D'UN GRADATEUR 19
II.5. LES HACHEURS 21
II.5.1 . STRUCTURES FONDAMENTALES DES HACHEURS 22
CONCLUSION 26
INTRODUCTION 28
III.1. DEFINITION DE LA PERTURBATION ELECTROMAGNETIQUE 28
III.2. DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES 29
III.3. LES DIFFERENTES SOURCES DE PERTURBATIONS 29
III.4. SOURCES PERMANENTES ET SOURCES DISCONTINUES 29
III.5. L'EFFET DE PERTURBATION SUR LE CIRCUIT ELECTRONIQUE 30
III.5.1. CIRCUITS NUMERIQUES 32
III.5.2. CIRCUITS ANALOGIQUES 33
III.6. CLASSIFICATION DES EMISSIONS DES CONVERTISSEURS SELON LES FREQUENCES 33
III.7. CLASSIFICATION SELON LE MODE PROPAGATION 34
III.7.1. PERTURBATIONS CONDUITES 34
III.7.2. PERTURBATIONS RAYONNEES 35
III.8. LES CONVERTISSEURS STATIQUES DC/DC 36
III.9. LES HACHEURS 37
III.9.1. ELEVATEUR DE TENSION « BOOST » 37
III.10. LE MOSFET 38
III.10.1. LE MOSFET EN MODE INTERRUPTEUR 41
CONCLUSION 41
INTRODUCTION 42
IV.1. CONVERTISSEUR PARALLELE 42
IV.2. PLAN DE MASSE 43
IV.2.1. LES TYPES DE LA REALISATION D'UN CIRCUIT IMPRIME SELON PLAN DE MASSE 43
IV.3. LES LOGICIELS UTILISE 44
IV.3.1. PROTEUS 44
IV.3.2. COMSOL MULTIPHASIQUES 47
IV.3.3. SIMULATION DE CIRCUIT IMPRIME D'UN HACHEUR DE TYPE (BOOST) DANS COMSOL.. 48
IV.3.4. DEFINIR LA GEOMETRIE 48
IV.4. DEFINIR LES PROPRIETES MATERIELLES 49
IV.4.1. CONDITIONS AUX LIMITES 53
IV.5. RESULTATS DE SIMULATION 54
CONCLUSION 58

CONCLUSION GENERALE 59

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE 60

Liste des figures

Figure I.1. Formation CEM Comptabilité électromagnétique. 4
Figure I.2. Couplage électromagnétique élémentaire..... 5

Figure II.1. Les diodes. 11
Figure II. 2. Le thyristor..... 12
Figure II. 3. Redresseur monophasé simple alternance non commandé. 13
Figure II. 4. Redresseur nom commandé avec diode de roue libre. 13
Figure II. 5. Redresseur en pont non commandé. 14
Figure II. 6. Redresseur simple alternance totalement commandé. 15
Figure II. 7. Redressement simple alternance semi-commandé. 15
Figure II. 8. Redresseur monophasé double alternance totalement commandée. 16
Figure II. 9. Redresseur monophasé double alternance semi commandé. 16
Figure II. 10. Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC). 17
Figure II. 11. Onduleur de courant..... 18
Figure II. 12. Onduleur de tension 18
Figure II. 13. Gradateur monophasé à réglage de phase. 19
Figure II. 14. Gradateur unidirectionnel monophasé. 19
Figure II. 15. Gradateur bidirectionnel monophasé. 20
Figure II. 16. Gradateur marche en On-Off. 21
Figure II. 17. Schéma du circuit de principe électrique d'un gradateur triphasé en étoile. 21
Figure II. 18. Convertisseur Buck. 22
Figure II. 19. Schéma de puissance pour un hacheur dévolteur (charge résistive). 23
Figure II. 20. Schéma de puissance pour un hacheur série avec charge RL. 23
Figure II. 21. Schéma de puissance pour un hacheur série. 24
Figure II. 22. Schéma de principe pour un hacheur survolteur. 24
Figure II. 23. Hacheur réversible en courant. 25
Figure II. 24. Hacheur réversible en tension. 26

Figure III. 1. Origines des PE. 29

Figure III. 2. Différents niveaux de la CEM en électronique de puissance. 30
Figure III. 3. Modes de perturbation des commandes rapprochées. 32
Figure III. 4. (a) Erreurs dynamiques, apparition de délais, (b) Erreur statique, commutation indésirable. 33
Figure III. 5. Principe de base d'un hacheur. 37
Figure III. 6. Principe de base d'un hacheur boost. 37
Figure III. 7. Structure (a) et symbole de MOSFET (b). 39
Figure III. 8. Caractéristiques de sortie typiques du MOSFET IRF540N. 40
Figure III. 9. Caractéristique de transfert pour un MOSFET IRF540N. 41

Figure IV. 1. Schéma de la Création de la simulation sous Proteus (hacheur boost). 45
Figure IV. 2. Schéma de la Pcb layoot. 46
Figure IV. 3. Schéma de la Circuit imprime d'un hacheur boost. 46
Figure IV. 4. Interface du programme Comsol. 48
Figure IV. 5. Schéma de la Création de la simulation sous Comsol. 49
Figure IV. 6. Schéma de L'Air en comsol. 49
Figure IV. 7. Schéma de La bobine en comsol. 50
Figure IV. 8. Schéma de La diode en comsol. 51
Figure IV. 9. Schéma de la Condensateur (1) en comsol. 51
Figure IV. 10. Schéma de la Condensateur (2) en comsol. 51
Figure IV. 11. Schéma de la Résistance en comsol. 52
Figure IV. 12. Schéma de Les pistes de cuivre en comsol. 52
Figure IV. 13. Schéma de la Loi d'Ampère. 53
Figure IV. 14. Schéma de la Valeurs initiales. 53
Figure IV. 15. Schéma de la Densité de courant. 54
Figure IV. 16. Schéma de la Norme de la densité de flux magnétique (hacheur boost). 54
Figure IV. 17. Schéma de la Norme du nombre de Flèches sur ligne (hacheur boost) sans multicoupes. 55
Figure IV. 18. Schéma de la Norme du nombre de Flèches sur ligne (hacheur boost) sans multicoupes. 56
Figure IV. 19. Schéma de Les ligne de flux magnétique. 56
Figure IV. 20. Schéma de Les ligne de champ magnétique. 57
Figure IV. 21. Schéma de la Lignes de champ magnétique. 57

Liste des tableaux

Tableau III. 1. Classification des émissions des convertisseurs selon les fréquences. 34

Tableau IV. 1. Reference et valeur d'un composant. 43
Tableau IV. 2. Les caractéristiques de L'Air. 50
Tableau IV. 3. Les caractéristiques sont cuivre. 52

Liste des abréviations

A : Anode

AC : Courant alternatif

CEM : compatibilité électromagnétique

D : Diode

DC : Courant continue

FEM : force électromagnétique

G : Gâchette du thyristor

K : Cathode

L : Inductance

M : Moteur

R : Résistance

T : Transistor

Listes des symboles

V, Ve, u, ue : Tension d'entrée

$V_{m:}$ Tension maximal

V_{Leff} : Tension efficace

i_G: Courant de la gâchette du thyristor

$i_{L:}$ Courant traversant l'inductance

V_L : Tension traversant l'inductance

T : Période

α : Angle d'amorçage du thyristor

Introduction générale

La compatibilité électromagnétique (CEM) est un domaine d'étude essentiel dans le domaine des circuits de conversion d'énergie. Les circuits de conversion d'énergie sont utilisés pour transformer et réguler l'énergie électrique dans de nombreux systèmes, tels que les alimentations électriques, les onduleurs, les convertisseurs DC-DC, les convertisseurs AC-DC, les systèmes de recharge des véhicules électriques [1].

La CEM se concentre sur la gestion des interférences électromagnétiques indésirables qui peuvent se produire lorsque différents équipements électriques et électroniques sont utilisés simultanément. Ces interférences peuvent entraîner des perturbations dans le fonctionnement des systèmes, des dysfonctionnements, voire des défaillances complètes [2].

L'objectif principal de l'étude de la CEM est d'assurer que les systèmes électroniques et électriques fonctionnent correctement, sans perturbations indésirables, et sans causer de perturbations aux autres équipements environnants. Cela implique d'analyser et de gérer les émissions électromagnétiques des circuits de conversion d'énergie, ainsi que leur immunité aux interférences électromagnétiques externes.

L'étude de la CEM comprend plusieurs aspects. Tout d'abord, il est important de concevoir les circuits de conversion d'énergie de manière à minimiser les émissions électromagnétiques. Cela peut être réalisé en utilisant des techniques de conception appropriées, telles que l'utilisation de filtres, de blindages et de mises à la terre adéquates.

Ensuite, il est nécessaire d'évaluer l'immunité des circuits de conversion d'énergie aux interférences électromagnétiques externes. Cela implique des tests et des mesures pour s'assurer que les circuits peuvent fonctionner correctement même en présence de perturbations électromagnétiques provenant d'autres sources, telles que les dispositifs sans fil, les moteurs électriques ou les lignes électriques.

Enfin, l'étude de la CEM comprend également l'élaboration de normes et de réglementations pour garantir la conformité des circuits de conversion d'énergie. Ces normes spécifient les limites d'émissions électromagnétiques autorisées et les niveaux d'immunité requis pour différents types d'équipements. Elles visent à assurer un environnement électromagnétique sûr et compatible pour l'ensemble des équipements électroniques et électriques[2].

En résumé, l'étude de la compatibilité électromagnétique dans les circuits de conversion d'énergie est cruciale pour garantir le bon fonctionnement des systèmes électroniques et

électriques. Elle comprend la gestion des émissions électromagnétiques, l'évaluation de l'immunité aux interférences électromagnétiques et le respect des normes et réglementations applicables. En assurant une CEM adéquate, on peut minimiser les perturbations indésirables et garantir une performance fiable et sécurisée des systèmes électroniques et électriques.

Chapitre I

La compatibilité Electromagnétique

Introduction

La compatibilité électromagnétique (CEM) est un domaine essentiel dans le domaine de l'électronique et des systèmes électriques. Dans un monde où les technologies sont omniprésentes, il est crucial de s'assurer que les différents appareils électroniques et systèmes électriques peuvent coexister harmonieusement, sans interférences électromagnétiques indésirables.

L'une des principales sources de perturbations électromagnétiques est la présence de parasites. Les parasites électromagnétiques se réfèrent à des signaux non désirés qui peuvent être générés par des appareils électroniques, des systèmes de communication, des équipements industriels et même des sources naturelles. Ces parasites peuvent se propager à travers les fils, les câbles, l'air ou tout autre médium conducteur, perturbant ainsi le fonctionnement normal des dispositifs électroniques et des systèmes électriques.

Pour assurer une compatibilité électromagnétique adéquate, des normes ont été établies. Ces normes définissent les limites acceptables pour les émissions électromagnétiques des appareils et les niveaux de résistance aux interférences qu'ils doivent présenter. En respectant ces normes, on garantit que les appareils peuvent fonctionner sans causer de perturbations excessives aux autres équipements électroniques environnants.

La terminologie de la compatibilité électromagnétique est également essentielle pour comprendre et communiquer efficacement dans ce domaine. Des concepts tels que les émissions électromagnétiques, l'immunité électromagnétique, le rayonnement, la diaphonie et d'autres paramètres techniques sont couramment utilisés et doivent être clairement définis pour une compréhension précise.

Dans ce chapitre, nous explorerons plus en détail la définition des parasites électromagnétiques, les normes établies pour garantir la compatibilité électromagnétique, ainsi que la terminologie essentielle associée à ce domaine. En comprenant ces concepts fondamentaux, nous serons en mesure de mieux évaluer, prévenir et résoudre les problèmes de compatibilité électromagnétique dans diverses applications électroniques et électrique

I.1. Définition de la CEM

La compatibilité électromagnétique (CEM) est la capacité des équipements électroniques à fonctionner correctement dans leur environnement électromagnétique, sans créer de perturbations électromagnétiques nuisibles à d'autres équipements. Cela implique de concevoir,

de tester et de certifier les équipements électroniques pour garantir qu'ils fonctionnent de manière fiable et sécurisée dans leur environnement électromagnétique, tout en évitant les interférences nuisibles. La CEM est importante pour assurer la compatibilité entre les équipements électroniques et leur environnement électromagnétique, ainsi que pour éviter les risques pour la santé, la sécurité et l'environnement.

Et nous avons la définition exacte de La CEM : La capacité d'un appareil, d'un équipement ou d'un système à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique sans provoquer d'interférences électromagnétiques inacceptables dans cet environnement [3].

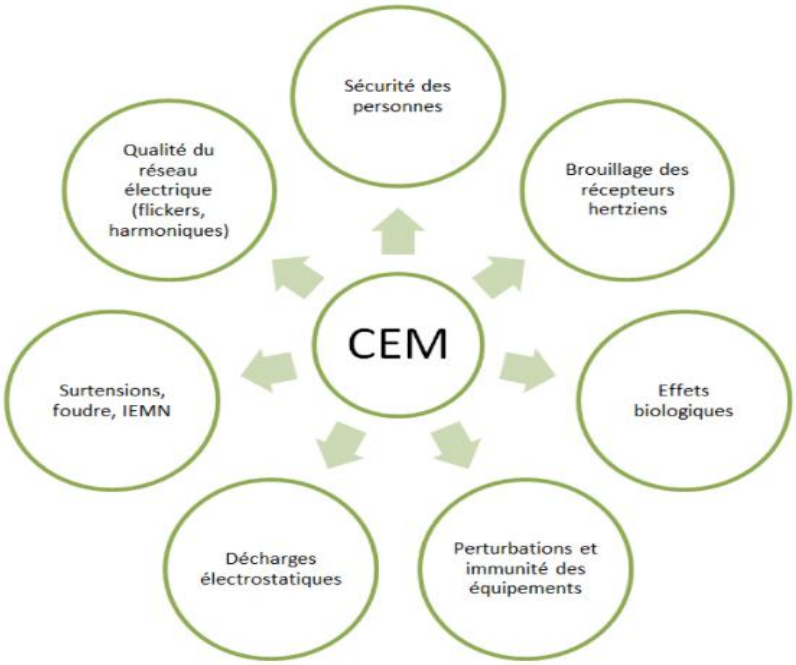


Figure I.1. Formation CEM Comptabilité électromagnétique.

I.2. Les parasites

Des perturbations électromagnétiques temporaires peuvent être remarquées une fois que l'information est sous forme électronique. Ces signaux se propagent par rayonnement ou conduction le long de différents conducteurs. Dans la plupart des cas, ces deux phénomènes physiques sont couplés : les courants induits se propagent dans les conducteurs connectés ou proches de la source du signal (canalisations de chauffage, conduites d'eau, armature en béton, etc.

I.3. Les sources de perturbations

Les sources de perturbations sont nombreuses, elles proviennent de phénomènes radio et de phénomènes impulsionnels ou transitoires.

- **Les phénomènes radioélectriques.**

Ils conduisent à des études de quelques kHz à des dizaines de GHz.

Il s'agit d'interférences entre systèmes radio ainsi que d'interférences au niveau de la réception.

- **Les phénomènes transitoires ou impulsionnels.**

Ces signaux peuvent être rapides et énergiques. Les exemples incluent la foudre, les surtensions dans les réseaux de télécommunications, les décharges électrostatiques ou les impulsions électromagnétiques nucléaires (IEMN).

- **La propagation des perturbations**

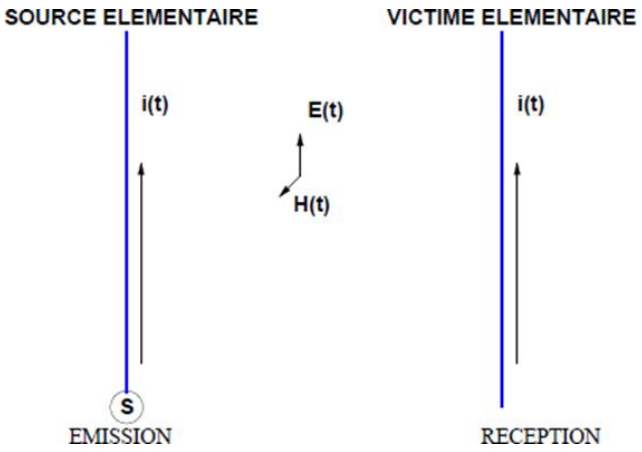


Figure I.2. Couplage électromagnétique élémentaire.

Un conducteur traversant un courant variant dans le temps induit un champ électromagnétique variant dans le temps et dans l'espace. De même, un conducteur dans un champ magnétique changeant induit un courant dans celui-ci.

La CEM est généralement un compromis entre la source, la sensibilité et le couplage pour atteindre un prix et des niveaux de fonctionnement acceptables. Il est à noter que la sécurité des personnes sera prioritaire.

I.4. Les risques

Ces problèmes semblent anodins. Cependant, ils engendrent des risques dans des domaines comme le médical, la télécommunication, le militaire.

Dans le domaine médical, il s'agit de s'assurer que les appareils fonctionnant dans les hôpitaux comme sur des patients ne subiront aucune interférence avec des sources extérieures. De même, pour les télécommunications, où les données transitant peuvent être altérées. Enfin, les militaires s'occupent particulièrement des problèmes de confidentialité des données. L'analyse des rayonnements électromagnétiques est un mode de piratage informatique aujourd'hui bien connu, même s'il faut des moyens que le citoyen lambda n'a pas [4].

I.5. Les Normes

Les normes de la compatibilité électromagnétique (CEM) sont des règles et des réglementations établies pour garantir que les équipements électriques et électroniques fonctionnent de manière fiable et sans interférences électromagnétiques gênantes ou dangereuses. Les normes de la CEM sont généralement définies par des organismes de normalisation tels que l'International Electrotechnique Commission (IEC) et l'Institute of Electric et Electronics Engainer (IEEE).

Les normes de la CEM couvrent un large éventail d'aspects, notamment les limites d'émission de rayonnements électromagnétiques, les limites de niveaux de signaux électromagnétiques reçus, les exigences de protection contre les décharges électrostatiques, les exigences de compatibilité électromagnétique pour les équipements médicaux, les équipements de transport, les équipements militaires, etc.

Les normes de la CEM sont régulièrement mises à jour pour s'adapter aux nouvelles technologies et aux nouveaux défis. Les fabricants d'équipements électriques et électroniques doivent se conformer aux normes de la CEM pour obtenir la certification et mettre leurs produits sur le marché.

Le concept de CEM décrit d'abord un phénomène physique et technologique, Sachez qu'une pléthore de lois, de réglementations et de normes sont associées à ce concept initialement prévu, Voyons d'abord pourquoi il y a tant de normes et d'exigences. Il existe des normes pour :

- Les limites, c'est-à-dire les valeurs maximales d'émissivité et les valeurs minimales de susceptibilité.
- Les méthodes de mesure.
- Et les appareils de mesure.

Tout le monde comprendra la nécessité de se fixer des limites. Définition d'hypothèses limitatives. Les grandeurs CEM peuvent être mesurées de manière répétée et indépendante

quand et où ils ont été exécutés. Le modèle de perturbation présente plus haut Décrit la procédure à suivre pour effectuer des mesures CEM pour la mesure Sensibilité. L'appareil de mesure remplace la source d'interférence et la mesure émissivité, il déplace le système bloqué.

I.5.1. Normes fondamentales

Les normes fondamentales définissent et décrivent le problème posé par la compatibilité électromagnétique, les méthodes de mesure et de test, les moyens de mesure de base et les montages de mesure. Elles n'indiquent aucune limite et n'établissent aucun critère de dégradation du fonctionnement.

Le comité technique 77 de la CEI a mis au point la norme fondamentale CEI 1000 comportant les parties suivantes (le "x" correspond aux sections) :

- **CEI 1000-1-x Partie 1** : Généralités : introduction, principes de base, définitions.
- **CEI 1000-2-x Partie 2** : Environnement électromagnétique : classification, niveaux de compatibilité.
- **CEI 1000-3-x Partie 3** : Limites : émissivité et susceptibilité électromagnétique.
- **CEI 1000-4-x Partie 4** : Appareillages et méthodes de mesure.
- **CEI 1000-5-x Partie 5** : Installation d'appareils et de systèmes respectant les principes de CEM.
- **CEI 1000-9-x Partie 9** : Questions diverses.

L'importante partie 4 comporte les sections suivantes (les sections 1 à 6 ont été élaborées à partir de la série CEI 801 rédigée par le comité technique 65 pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. La norme 1000-4-2 est par exemple issue de la norme CEI 801-2) :

- **CEI 1000-4-1** Vue d'ensemble sur les méthodes de mesure d'immunité.
- **CEI 1000-4-2** Immunité aux décharges électrostatiques (ESD).
- **CEI 1000-4-3** Immunité aux champs électromagnétiques haute fréquence.
- **CEI 1000-4-4** Immunité aux perturbations transitoires électriques rapides en salves.
- **CEI 1000-4-5** Immunité aux surtensions transitoires.
- **CEI 1000-4-6** Immunité aux perturbations conduites haute fréquence.
- **CEI 1000-4-7** Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'inter harmoniques ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés.
- **CEI 1000-4-8** Immunité aux champs magnétiques à la fréquence du réseau.

– **CEI 1000-4-9** Immunité aux champs magnétiques impulsionnel.

– **CEI 1000-4-10** Immunité aux champs magnétiques oscillatoires amortis.
– **CEI 1000-4-11** Immunité aux creux de tension, coupures brèves et variations de tension. [4].

I.5.2. Normes Génériques

Les critères génériques sont des normes qui se rapportent à un environnement spécifique. Ils élaborent une série de spécifications et de tests qui s'appliquent à tous les produits et systèmes mis en œuvre dans cet environnement, à condition qu'ils ne soient pas soumis à des normes CEM spécifiques. Des normes communes ont été spécifiées pour les applications suivantes :

– Résidentiel, commercial et industrie légère.

– Industrie.

La norme générale sur la susceptibilité électromagnétique distingue trois types de dégradation de fonctionnement lorsque des équipements ou des installations sont soumis à des perturbations électromagnétiques :

– Le fonctionnement de l'équipement testé n'est pas dégradé (Classe A).

– L'équipement sous test a un fonctionnement dégradé, mais reprend un fonctionnement normal lorsque la grandeur perturbatrice disparaît (Classe B).

– Perte de fonctionnement pendant l'essai, mais fonctionnement correct restauré après réajustement de l'EST (Catégorie C).

Les normes générales publiées à ce jour font référence à d'autres normes, projets de normes ou travaux de comités de normalisation qui n'ont pas été publiés en tant que projets de normes. C'est ainsi que la norme générale **EN 50 081-1** relative à l'émissivité contient la norme

–**EN 55 022** : Hautes fréquences rayonnées et conduites.

–**EN 55 014** : Perturbations impulsionnelles conduites.

–**EN 60 555-2** : Niveaux d'harmoniques des appareils électriques.

–**EN 60 555-3** : Variation de la tension d'alimentation applicables au domaine.

I.6. Terminologie

Voici quelques termes couramment utilisés en compatibilité électromagnétique Perturbation électromagnétique : Une perturbation électromagnétique est un phénomène électrique ou magnétique indésirable qui peut altérer le fonctionnement d'un équipement électronique. Les perturbations électromagnétiques peuvent être conduites, c'est-à-dire transmises par des câbles ou des connexions, ou rayonnées, c'est-à-dire transmises par des ondes électromagnétiques dans l'air.

Immunité électromagnétique : L'immunité électromagnétique est la capacité d'un équipement électronique à fonctionner correctement malgré les perturbations électromagnétiques présentes dans son environnement. Un équipement électromagnétiquement immunisé est capable de tolérer des niveaux de perturbations électromagnétiques prédéterminés sans altérer son fonctionnement.

Émission électromagnétique : L'émission électromagnétique est la quantité d'énergie électromagnétique émise par un équipement électronique dans son environnement. Les équipements électroniques émettent des ondes électromagnétiques qui peuvent potentiellement perturber d'autres équipements électroniques.

Blindage électromagnétique : Le blindage électromagnétique est une technique de conception qui consiste à entourer les équipements électroniques de matériaux conducteurs pour réduire les perturbations électromagnétiques rayonnées et conduites. Le blindage électromagnétique peut également être utilisé pour protéger les équipements électroniques des perturbations électromagnétiques externes.

Filtre électromagnétique : Un filtre électromagnétique est un circuit électrique qui permet de réduire les perturbations électromagnétiques conduites en atténuant les fréquences indésirables. Les filtres électromagnétiques sont couramment utilisés pour réduire les perturbations électromagnétiques dans les circuits électroniques.

Normes de compatibilité électromagnétique : Les normes de compatibilité électromagnétique sont des règles internationales établies pour réglementer les niveaux de perturbations électromagnétiques émis par les équipements électroniques, ainsi que pour définir les niveaux de sensibilité des équipements électroniques aux perturbations électromagnétiques.

Les normes de compatibilité électromagnétique sont utilisées pour tester et certifier les équipements électroniques avant leur mise sur le marché.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté les généralités sur la comptabilité électromagnétique, une discipline essentielle dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM). La CEM vise à garantir que les systèmes électriques et électroniques fonctionnent correctement et de manière fiable dans leur environnement électromagnétique, sans causer ni subir d'interférences indésirables.

La comptabilité électromagnétique consiste à évaluer et à gérer les interactions électromagnétiques entre différents éléments d'un système. Elle comprend l'analyse des sources d'émissions électromagnétiques, la caractérisation des voies de propagation des signaux électromagnétiques et la détermination des sensibilités des éléments du système. L'objectif est de s'assurer que les signaux électromagnétiques ne perturbent pas le fonctionnement normal des équipements et que ceux-ci ne sont pas vulnérables aux interférences externes.

La comptabilité électromagnétique joue un rôle crucial dans de nombreux secteurs tels que l'aérospatiale, les télécommunications, l'automobile, l'électronique grand public, et même dans le domaine médical. En garantissant une coexistence harmonieuse des équipements électriques et électroniques, la comptabilité électromagnétique contribue à assurer la sécurité, la fiabilité et la conformité des systèmes dans leur environnement électromagnétique.

En résumé, la comptabilité électromagnétique est une discipline complexe et multidisciplinaire qui nécessite une approche systématique pour évaluer et gérer les interférences électromagnétiques. Une bonne compréhension des concepts et des méthodologies de base est essentielle pour concevoir des systèmes robustes et fiables, capables de fonctionner efficacement dans des environnements électromagnétiques variés.

Chapitre II
Conception des convertisseurs

Introduction

Un convertisseur statique est un dispositif qui permet d'ajuster la source d'énergie électrique pour répondre aux besoins d'un récepteur spécifique en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique étaient basés sur des machines électriques reliées mécaniquement, mais avec l'avènement des semi-conducteurs tels que les diodes, les transistors et les thyristors, ainsi que de l'électronique de puissance, les systèmes de conversion sont devenus de plus en plus sophistiqués et ne nécessitent plus l'utilisation de machines tournantes.

II.1. Les composants électroniques

L'électronique de puissance utilise des semi-conducteurs fonctionnant en « interrupteurs » [5].

Par exemple :

- Les diodes.
- Les thyristors (Silicon-Controlled Rectifier : SCR).

II.3.1. Les diodes

La diode est un composant dit actif, qui fait partie (comme le transistor) de la famille des semi-conducteurs. Par définition, une diode fait référence à tout composant électronique doté de deux électrodes. Il s'agit d'un composant polarisé qui possède donc deux électrodes, une appelé anode et l'autre appelé cathode. La cathode (parfois appelée K, pour Kathode) est localisée par un anneau de repérage [6].

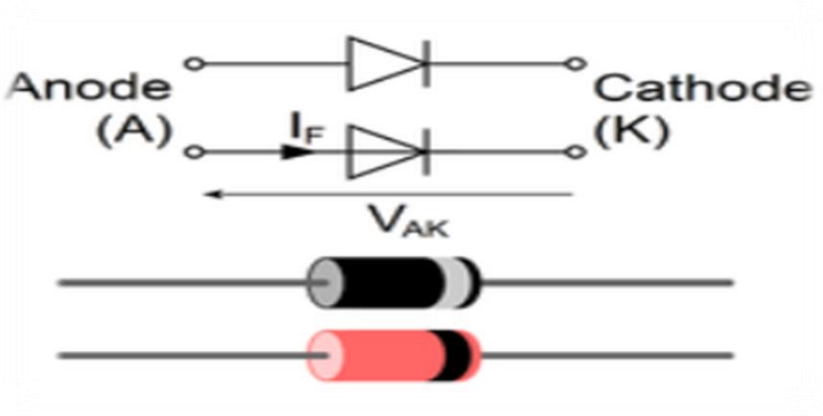


Figure II.1. Les diodes.

II.3.1. Le thyristor

Le thyristor est un redresseur au silicium comme une diode, mais composé de quatre couches de silicium (contre deux pour la diode), et dont la conduction dans le sens direct est commandée par une électrode supplémentaire appelée "Gâchettes". Ce composant comporte trois électrodes : la cathode, l'anode et la gâchette. Contrairement au Triac, le thyristor est unidirectionnel, il ne peut laisser passer le courant que dans un seul sens [7].

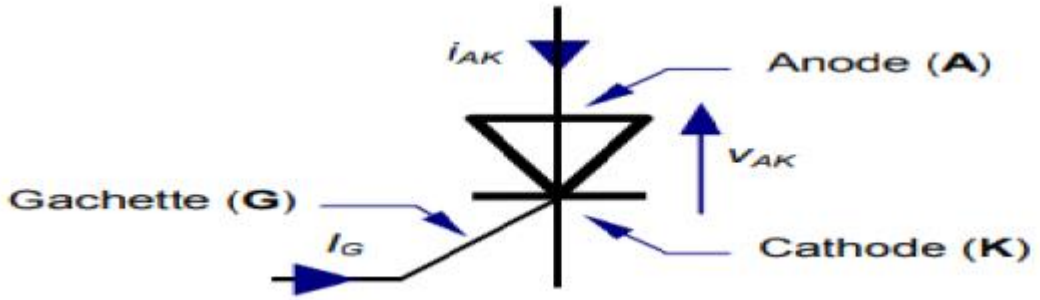


Figure II. 2. Le thyristor.

II.2. Les Redresseurs

Les redresseurs assurent la conversion alternatif-continu. Ils permettent, à partir d'un ensemble des tensions alternatives, d'obtenir une tension continue ou redressée de valeur moyenne commandable ou réglable. [5].

Ce type est un convertisseur statique destiné à alimenter une charge par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension.

Nous exposons un rappel théorique concernant les convertisseurs alternatif-continu. En premier lieu. Une brève description des composants de puissance les plus employés dans le redressement est présentée. Puis, nous passons en revue les montages les plus célèbres dans les applications dédiées aux redressements commandés et non commandés et leurs performances pour des charges inductives.

II.2.1. Les redresseurs monophasés non commandés

II.2.1.1. Redresseur monophasé simple alternance nom commandé

Une redresseuse simple alternance monophasée est un redresseur supprimant les alternances négatives et conservant les alternances positives d'une entrée monophasée. La fréquence en sortie du redresseur est alors égale à la fréquence d'entrée.

Le montage redresseur monophasé simple alternance non commandé donné par la figure II.3 est caractérisé par :

- Une diode de redressement : D.
- Une charge constituée par une résistance et une inductance [8].

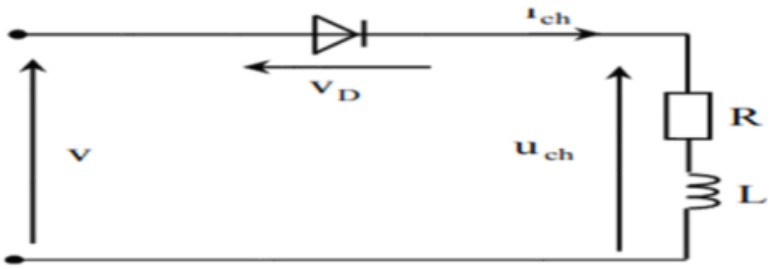


Figure II. 3. Redresseur monophasé simple alternance non commandé.

II.2.1.2. Redresseur monophasé simple alternance nom commandé avec diode de roue libre

La structure de principe de ce type du redresseur est représentée dans la Figure II.4 est caractérisé par :

- Une diode de redressement : D.
- Une diode de roue libre (récupération d'énergie).
- Une résistance et une inductance.

La diode de roue libre est utilisée pour permettre la circulation de l'énergie dans le circuit lorsque la diode de redressement est bloquée, évitant ainsi des surtensions ou des transitoires indésirables. Elle permet de récupérer l'énergie stockée dans l'inductance et de la réinjecter dans le circuit. Cette configuration est couramment utilisée pour les applications nécessitant une commutation rapide ou avec des charges inductives.

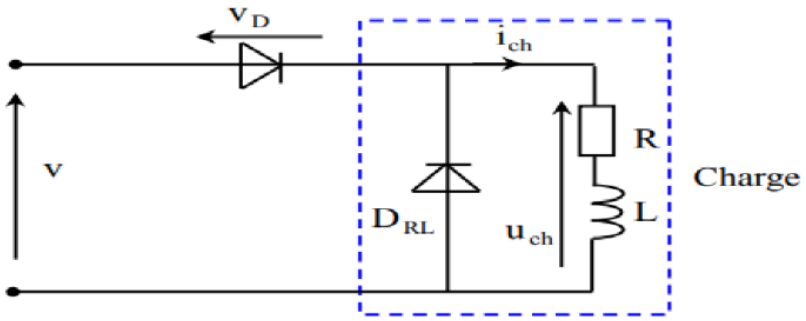


Figure II. 4. Redresseur nom commandé avec diode de roue libre.

II.2.1.3 . Redresseur monophasé double alternance non Commandé

La structure de principe de ce type du redresseur est représentée dans la Figure II.5

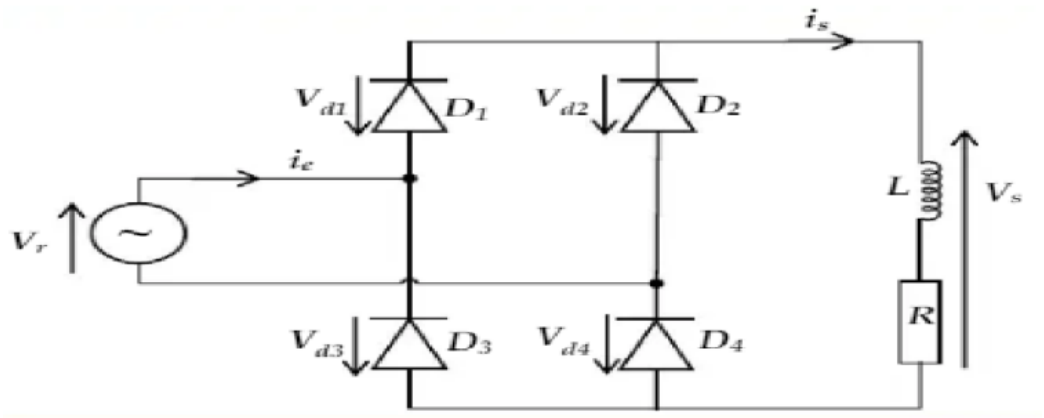


Figure II. 5. Redresseur en pont non commandé.

Durant l'alternance positive de la source, les diodes D_1 et D_4 conduisent car elles sont polarisées en directe ($V_s = V_e$). Pendant l'alternance négative, D_2 et D_3 conduisent qui donnent :

$$V_s = -V_e \tag{II.1}$$

alors que le courant de charge garde le même sens.

La tension inverse maximale pour chaque diode égale la valeur maximale de la tension d'alimentation [9]

II.2.2. Les redresseurs commandés

Le redresseur commandé permet d'obtenir, à partir d'une source alternative, un courant unidirectionnel aux valeurs moyennes et efficaces réglables. Le redressement commandé est utilisé pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu.

II.2.2.1. Redresseur monophasé simple alternance totalement commandé

On règle la tension moyenne de charge en grandeur et en signe en contrôlant l'angle de retard (amorçage). Ce type de convertisseurs est souvent appelée des convertisseurs bidirectionnels car la puissance peut circuler dans les deux sens entre l'alimentation et la charge [10].

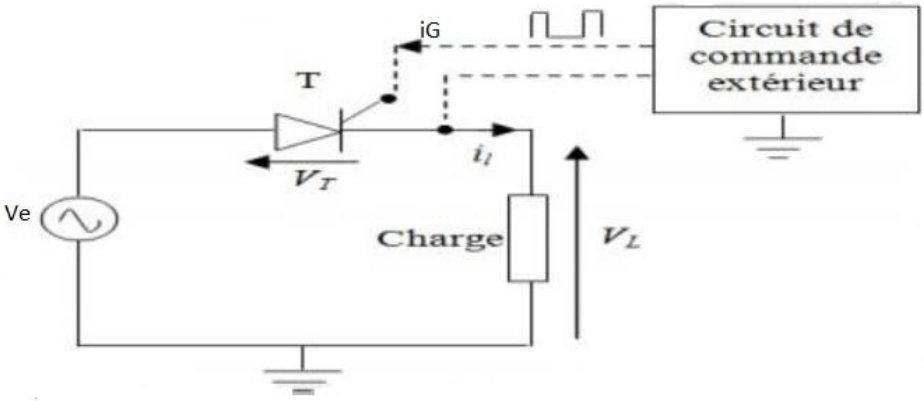


Figure II. 6. Redresseur simple alternance totalement commandé.

II.2.2.2. Redresseur monophasé simple alternance semi commandé

La conduction discontinue est peu utilisée dans la pratique car les chutes de tension sont importantes. Toutefois, pour obtenir ce résultat avec une alimentation monophasée, il faut un équipement assez complexe (transformateur à point milieu ou pont à quatre diodes). On peut éviter cet inconvénient en utilisant une diode de roue libre.

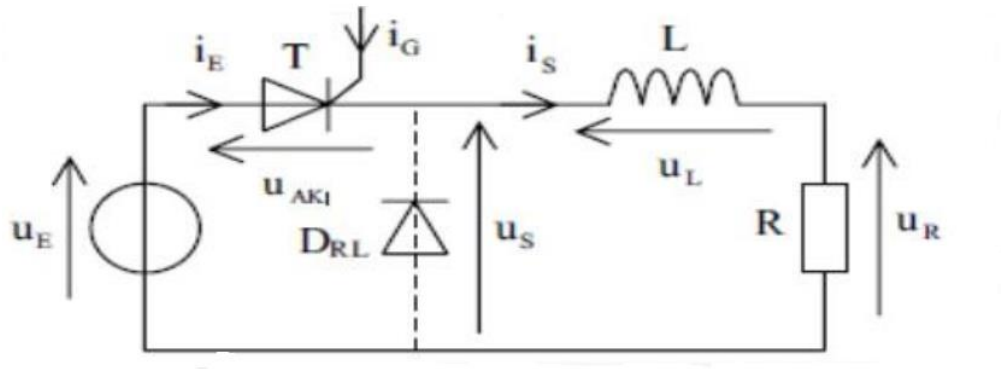


Figure II. 7. Redressement simple alternance semi-commandé.

II.2.2.3. Redresseur monophasé double alternance totalement commandée

Ce montage est utilisé pour alimenter les machines à courant continu (DC). Il permet la récupération de l'énergie électrique en cas de fonctionnement de la machine en mode génératrice. C'est à dire le transfert de l'énergie s'effectue de la machine vers le réseau. Dans notre réalisation, on s'intéresse à ce type de redresseur.

Dans ce cas, le montage ne comporte que des thyristors. Il n'y a de conduction jusqu'à l'amorçage des thyristors. Pour qu'un courant circule, il faut amorcer les thyristors T_1 et T_2 simultanément ainsi T_3 et T_4 dans l'alternance suivante. Pour que l'amorçage soit simultané, un même circuit amorce deux thyristors.

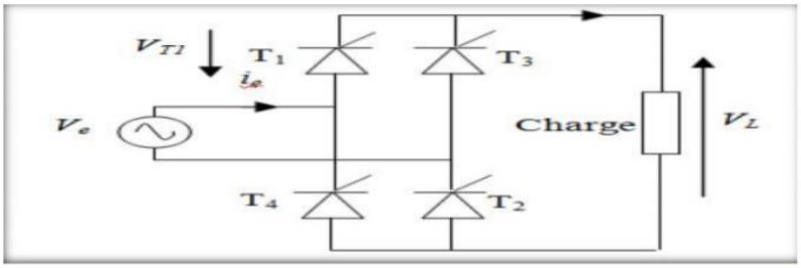


Figure II. 8. Redresseur monophasé double alternance totalement commandée.

II.2.2.4. Redresseur monophasé double alternance semi-commandé

Deux thyristors et deux diodes permettent de commander la tension redressée moyenne comme le montre le circuit de principe donné par la Figure II.9. Le courant d'entrée passe par T_1, T_2 et D_1, D_2 assurent le retour du courant.

Les thyristors commutent lorsqu'ils sont amorcés et les diodes commutent aux zéros de la tension d'alimentation. La tension de charge ne devient jamais négative même sans D_L. D_L fournit un chemin parallèle préférentiel à ce trajet de roue libre comparativement à la combinaison série d'un thyristor et d'une diode par exemple T_1, D_1. D_L permet donc au thyristor de repasser à l'état bloqué [10].

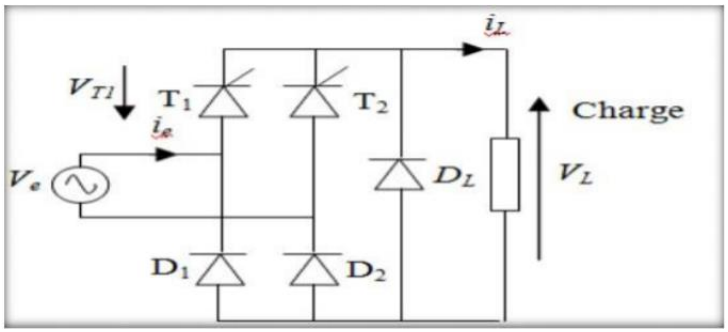


Figure II. 9. Redresseur monophasé double alternance semi commandé.

II.2.3. Redresseur triphasé

L'utilisation des redresseurs triphasés pour la conversion alternatif-continu de l'énergie électrique est actuellement en pleine croissance. Bien que ces dispositifs soient très performants en termes de qualité d'onde du réseau et de régulation de tension côté continu. Contrairement aux alimentations à faible puissance qui utilisent le plus souvent des réseaux monophasés, les alimentations de puissance utilisent généralement des réseaux triphasés. De plus, comme les transformateurs à point milieu sont des appareils coûteux et fragiles, ceux-ci ne sont utilisés que pour des alimentations monophasées de faible puissance. Enfin que, si l'usage d'un transformateur n'est pas nécessaire avec un pont de Graëtz, il est utile d'une part pour adopter

la tension du secteur à la valeur souhaitée pour l'alimentation en courant continu, d'autre part pour assurer une meilleure séparation du secteur alternatif et du réseau continu [11].

II.3. Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. Figure 1représente schéma de principe de l'onduleur [12].

Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu`il s`agit d`une commande à un créneau par alternance ou d`une commande par Modulation de Largeur d`Impulsions (Pulse Width Modulation).

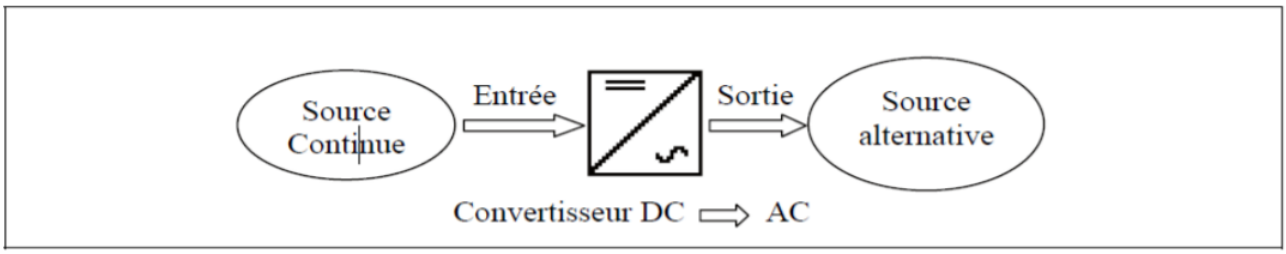


Figure II. 10. Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).

II.3.1. Les différents types d'onduleur

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories

II.3.1.1. Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi-conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes [13].

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

II.3.1.2. Onduleur de courant

L'onduleur de courant transforme un courant continu en courants triphasés dans les enroulements de la machine. Il peut fonctionner en commutation naturelle, c'est le cas des machines synchrones. La commutation forcée est réalisée pour toutes les autres machines. Ce type d'onduleur ne permet que le réglage de la fréquence des grandeurs de sortie, l'amplitude de celle-ci doive être réalisée par ajustement de la grandeur d'entrée.

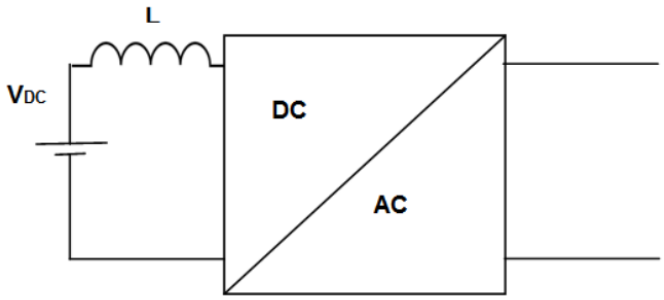


Figure II. 11. Onduleur de courant.

II.3.1.3. Onduleur de tension

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable, la forte évolution des onduleurs de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants semi-conducteurs contrôlables, puissants, robustes, et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion

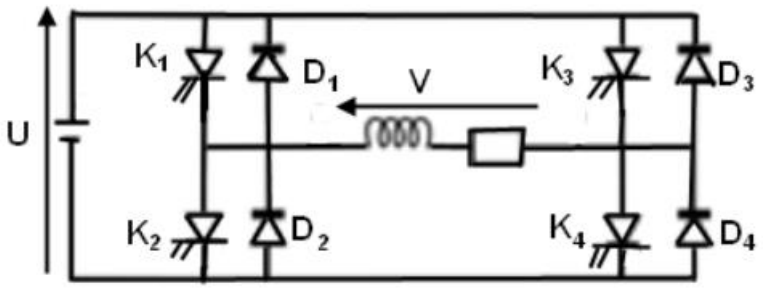


Figure II. 12. Onduleur de tension

II.4. Les gradateurs

Les gradateurs assurent la conversion alternatif-alternatif. Ils permettent, à partir d'un ensemble des tensions alternatives fixes, d'obtenir des tensions alternatives variables [14].

II.4.1 Les différents types d'un gradateur

Les gradateurs sont classés en deux grandes catégories

II.4.1.1 Gradateurs monophasés

Le gradateur monophasé à réglage de phase est constitué de deux thyristors montés en tête-bêche comme 'indique le schéma de la figure II.13. [13].

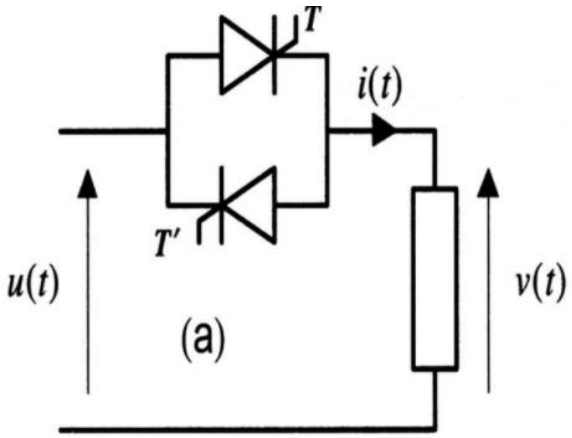


Figure II. 13. Gradateur monophasé à réglage de phase.

II.4.1.1.1 Gradateur unidirectionnel

Durant la première demi-période, la puissance débitée par la source est contrôlée en agissant sur l'angle d'amorçage de T_1 (figure. II.14).

- L'existence de D_1 permet de limiter le taux de commande pour que la valeur efficace de V_L varie entre 70.7% et 100%.
- La structure de principe de ce type du gradateur est représentée dans la figure II.14.

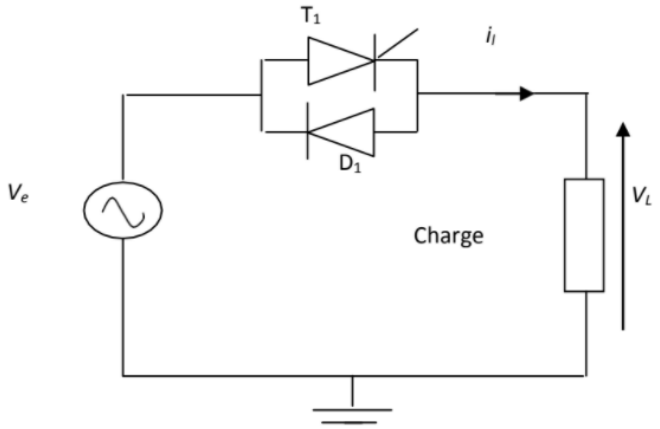


Figure II. 14. Gradateur unidirectionnel monophasé.

II.4.1.1.2 Gradateur bidirectionnel

La puissance débitée par la source est contrôlée par T_1 en agissant sur l'angle d'amorçage durant la première demi-période. Durant la deuxième demi-période, l'angle d'amorçage de T_2 fait commander la puissance débitée vers la charge. L'angle d'amorçage varie de 0 jusqu'à π.

Soit le montage suivant du Gradateurs monophasé on mode bidirectionnel qui alimente une charge inductive (RL).

Le circuit est alimenté par une tension alternative donnée par :

$$V_e = V_m\, Sin(wt) \qquad \text{(II.2)}$$

A cause de l'effet inductif, la conduction se poursuit après la fin de l'alternance jusqu'à t1. Le fonctionnement est à peu près le même que précédemment pendant la deuxième alternance.

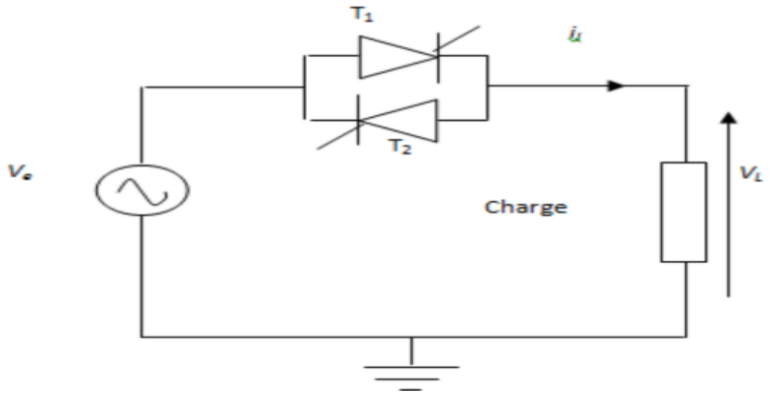


Figure II. 15. Gradateur bidirectionnel monophasé.

II.4.1.1.3 Gradateur marche en interrupteur (On-Off)

Le montage gradateur est montré dans la figure II.16 Les deux thyristors T_1 et T_2 permettent d'établir ou de couper la liaison source-récepteur. T_1 et T_2 connectent V_e et la charge pendant $tn = nT$ (pendant n cycles de l'alimentation) et coupe la liaison entre V_e et la charge pendant $tm = mT$ (m cycle de V_e).

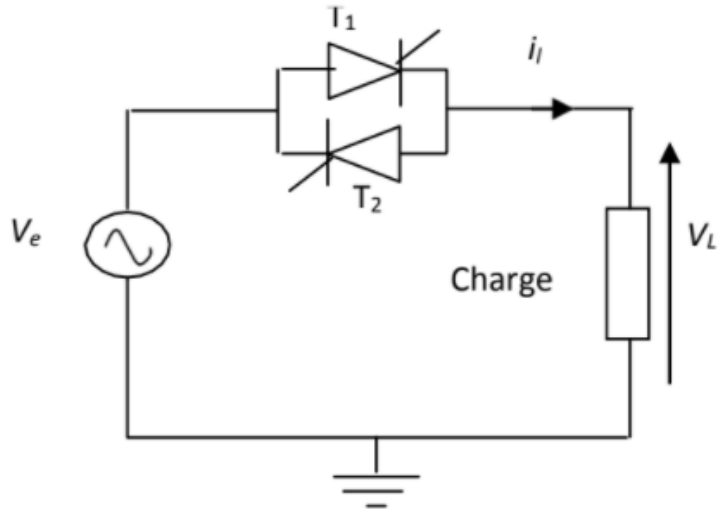


Figure II. 16. Gradateur marche en On-Off.

II.4.1.2 Gradateurs triphasés

Contrairement au monophasé, les gradateurs triphasés donnent des meilleures performances. Il existe plusieurs façons d'associer l'interrupteur avec la charge. Les vrais gradateurs triphasés sont formés de trois ensembles de deux thyristors montés entre le réseau et la charge couplés en triangle ou en étoile. A titre d'exemple, nous limiterons ici à l'étude du groupement en étoile débitant dans une charge inductive, ce qui est le cas le plus fréquent puisque ce type de gradateur est surtout utilisé pour assurer le démarrage statorique des moteurs asynchrones [15].

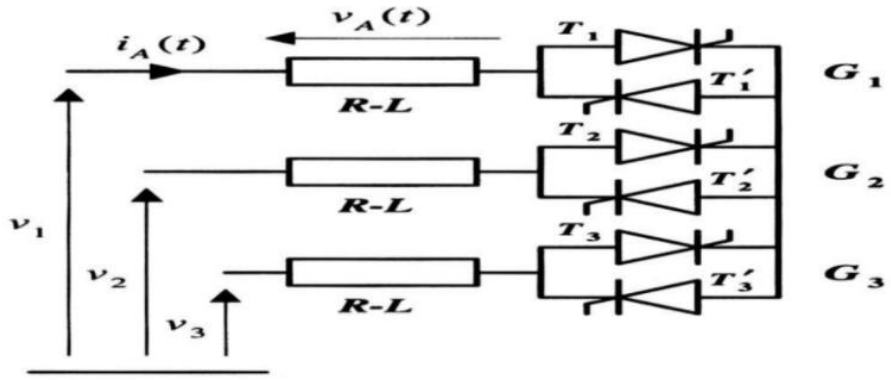


Figure II. 17. Schéma du circuit de principe électrique d'un gradateur triphasé en étoile.

II.5. Les hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui atteignent une tension continue constante et le rendement est proche de l'unité. Ils jouent le même rôle qu'un convertisseur AC.

Conçu pour assurer le transfert d'énergie entre une source de tension continue et une autre source continue. La mise en place d'un tel convertisseur est raisonnable lorsque :

- L'alimentation source continue doit être disponible et immédiatement disponible, comme une alimentation de type batterie. Dans ce cas, il est important de disposer d'un convertisseur direct pour assurer le transfert d'énergie entre ces sources.
- Vous devez fournir une alimentation continue, mais vous disposez d'une alimentation de secours. La conversion d'énergie peut alors se faire en deux étapes :
  - Conversion AC-DC via un convertisseur de courant.
  - Continu—Conversion continue, ajustez la valeur du volume de sortie continu.

II.5.1. Structures fondamentales des hacheurs

II.5.1.1 Hacheur série (Buck Converter)

Le principe d'un tel convertisseur est d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue, et une source de courant continu, ainsi présenté dans la figure II.18.

Par un tel convertisseur, on cherche à fixer une tension moyenne < $\mathbf{U_s}$ > aux bornes de la source Is, qui réponde aux critères suivants :

- $0 << U_s < U_e$
- < $\mathbf{U_s}$ > On désire que $\mathbf{U_s}$ sera réglée dans une fourchette bien déterminer

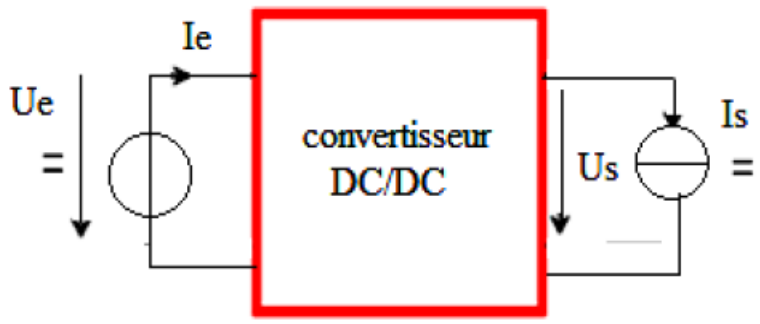


Figure II. 18. Convertisseur Buck.

II.5.1.1.1 Alimentation d'une résistance

La charge est constituée par la résistance R. les éléments L et C forme un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur la tension et le courant de sortie figure II .19

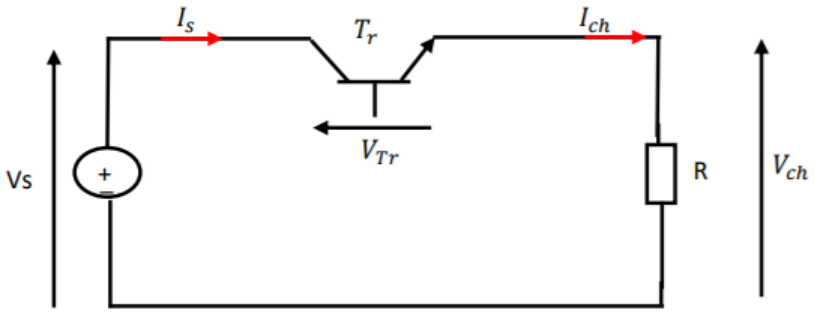


Figure II. 19. Schéma de puissance pour un hacheur dévolteur (charge résistive).

Si ces éléments sont correctement calculés, on peut supposer que Is et V_s sont continu (on néglige l'ondulation résiduelle). L'ensemble (filtre + charge) peut être composé différemment.

L'interrupteur, qui a pour mission de découper la tension continue fonctionne avec l'un des trois procédés suivants :

- Fréquence fixe, durée de conduction variable.
- Fréquence variable, durée de conduction f t fixe.
- Fréquence et durée de conduction variables.

II.5.1.1.2 Alimentation d'une charge inductive

Il est à noter qu'avec la charge résistive inductive le courant ne peut pas être bloqué au moment d'ouverture de l'interrupteur T_r. C'est pourquoi il est nécessaire de placer en parallèle avec la charge une diode à roue libre (free Wheel diode) comme illustré sur la figure II.19.

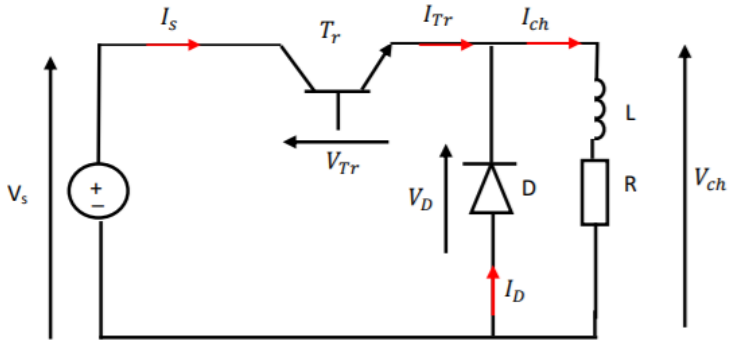


Figure II. 20. Schéma de puissance pour un hacheur série avec charge RL.

II.5.1.1.3 Hacheur série avec charge RLE

Dans ce schéma l'hacheur série est connecté a une charge constituée d'une résistance R, d'une inductance L et d'une f.é.m.

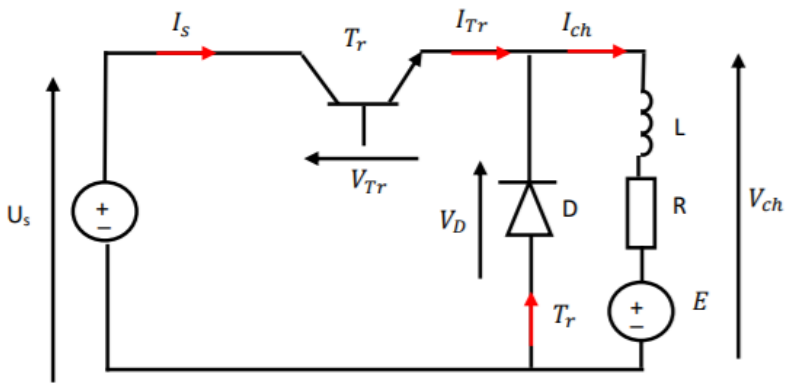


Figure II. 21. Schéma de puissance pour un hacheur série.

Dans le cas de charge RLE, deux cas de conduction se présentent :

- Le courant de charge ne s'annule pas avant la nouvelle conduction du transistor Tr (conduction continue).
- Le courant de charge s'annule avant la nouvelle conduction du transistor Tr (conduction discontinue).

II.5.1.1.4 Hacheur parallèle survolteur (survolteur, Boost Converter)

Lorsque de source U_s est court-circuité, la capacité est supposée élevée afin d'assurer une tension V_{ch} aux bornes de la charge constante. La diode D empêche la décharge du condensateur dans la partie source. L'inductance de la source L est suffisamment grande de sorte que la conduction est continue.

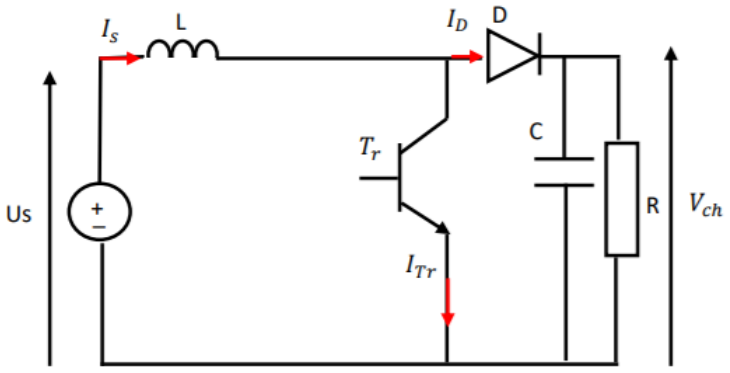


Figure II. 22. Schéma de principe pour un hacheur survolteur.

II.5.1.1.5 Hacheur réversible en courant

Ce montage permet de changer le sens de courant sans changer le signe de la tension aux bornes de la charge. Pour avoir un interrupteur bidirectionnel, on a placé en tête bêche deux interrupteurs unidirectionnels.

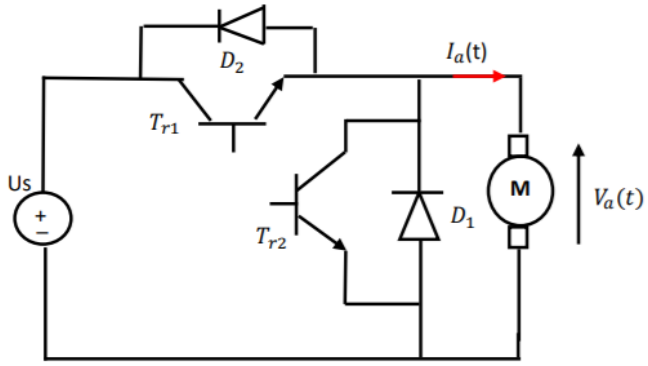


Figure II. 23. Hacheur réversible en courant.

Lors de l'étude on suppose que *:*

- Les transistors et les diodes sont supposés parfait

$$(VT_{r1} = VT_{r2} = VD_1 = VD_2 = 0) \quad \text{(II.3)}$$

  en conduction.

- Les temps de commutation sont négligés.

II.5.1.1.6 Hacheur réversible en tension

Ce type de montage est très utilisé dans le domaine de levage Dans ce cas T_{r1} et T_{r2} sont commandés simultanément avec le même état à la période T et un rapport cyclique α. T_{r1} et T_{r2} assurent la tension Us aux bornes de la machine durant l'intervalle [0, αT] et les diodes D_1 ,D_2 assurent la tension négative –Us durant l'intervalle [αT, T].

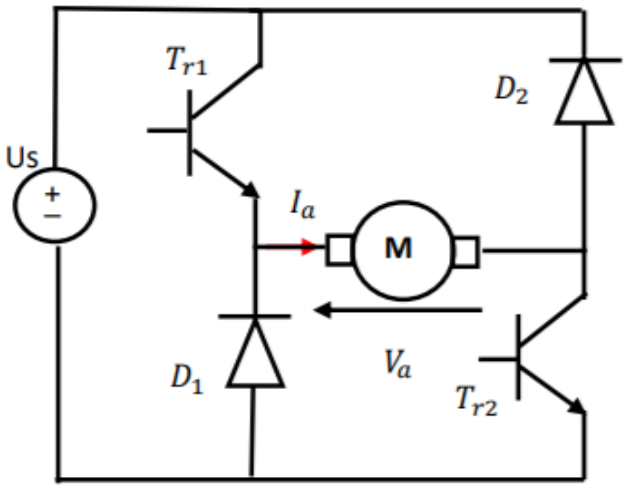


Figure II. 24. Hacheur réversible en tension.

Conclusion

En conclusion, la conception de convertisseurs est un processus essentiel dans le domaine de l'électronique de puissance. Ce chapitre a mis en évidence les différentes étapes clés impliquées dans la conception d'un convertisseur, de la définition des spécifications à la sélection de la topologie, en passant par la conception détaillée et les tests de validation.

La conception d'un convertisseur nécessite une compréhension approfondie des principes de l'électronique de puissance, ainsi que des connaissances en matière de sélection des composants et de dimensionnement des éléments. Les simulations et les calculs sont des Outil précieux pour évaluer les performances attendues du convertisseur avant sa mise en œuvre.

Une conception bien réalisée permet d'obtenir un convertisseur efficace, fiable et adapté aux besoins spécifiques de l'application. Cependant, il est important de rester à jour avec les avancées technologiques et les nouvelles topologies de convertisseurs qui continuent d'émerger.

Outil précieux pour évaluer les performances attendues du convertisseur avant sa mise en œuvre

Une conception bien réalisée permet d'obtenir un convertisseur efficace, fiable et adapté aux besoins spécifiques de l'application. Cependant, il est important de rester à jour avec les avancées technologiques et les nouvelles topologies de convertisseurs qui continuent d'émerger.

Chapitre III

Les perturbations dans les convertisseurs statique

Introduction

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs électroniques qui convertissent une forme d'énergie électrique en une autre forme d'énergie électrique. Ces dispositifs sont souvent utilisés dans les systèmes d'alimentation électrique pour fournir une tension, un courant ou une puissance électrique stable à une charge.

Les perturbations dans les convertisseurs statiques peuvent être causées par divers facteurs, tels que des variations de la tension d'alimentation, des variations de la charge, des perturbations électromagnétiques externes, des perturbations causées par les commutations des transistors, etc. Ces perturbations peuvent entraîner des problèmes tels que des fluctuations de la tension ou du courant de sortie, des pertes de puissance, des interférences électromagnétiques, des défaillances des composants, etc.

Pour réduire les perturbations dans les convertisseurs statiques, il est important de prendre en compte plusieurs facteurs de conception, tels que le choix des composants, la disposition des composants, la conception du circuit imprimé, la mise à la terre, etc. Des techniques de filtrage appropriées peuvent également être utilisées pour réduire les perturbations électromagnétiques. De plus, des techniques de commande avancées peuvent être utilisées pour minimiser les perturbations causées par les commutations des transistors.

Enfin, les tests et la vérification doivent être effectués pour s'assurer que les convertisseurs statiques répondent aux spécifications requises en termes de performances et de compatibilité électromagnétique

III.1. Définition de la perturbation électromagnétique

Une perturbation électromagnétique (PEM) est un phénomène électrique ou magnétique indésirable qui peut altérer le fonctionnement d'un équipement électronique. Les perturbations électromagnétiques peuvent être conduites, c'est-à-dire transmises par des câbles ou des connexions, ou rayonnées, c'est-à-dire transmises par des ondes électromagnétiques dans l'air. Les PEM peuvent être générées par d'autres équipements électroniques, des sources d'énergie électromagnétique naturelles ou artificielles, ou par des perturbations électromagnétiques réfléchies ou diffusées. Les PEM peuvent provoquer des erreurs ou des dysfonctionnements dans les équipements électroniques et peuvent même conduire à des défaillances catastrophiques dans des systèmes critiques tels que les avions, les centrales nucléaires ou les hôpitaux. La conception et le test de la compatibilité électromagnétique sont donc essentiels

pour minimiser les PEM et assurer le bon fonctionnement et la sécurité des équipements électroniques.

III.2. Différents types de perturbations électromagnétiques

Selon la définition [16], le concept de PE est : « Ce sont des phénomènes électromagnétiques susceptibles de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système. Une perturbation électromagnétique

Peut-être un bruit électromagnétique, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation lui-même ».

III.3. Les différentes sources de perturbations

Les perturbations sont soit d'origines naturelles ou d'origines humaines. La figure I.3 illustre les différentes sources de perturbations [17]. Pour les sources artificielles, ils peuvent être intentionnels, pour les systèmes de communication, ils sont dans la plupart des cas de type harmonique ou non intentionnels, tels que les générateurs, les convertisseurs, etc.

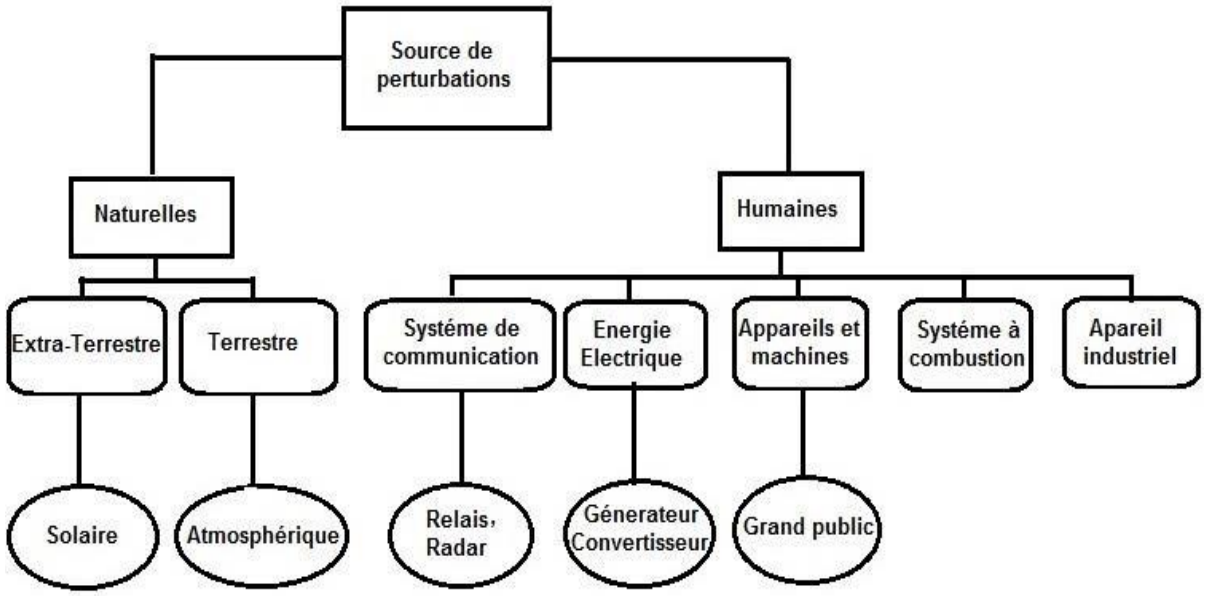


Figure III. 1. Origines des PE.

III.4. Sources permanentes et sources discontinues

On distingue deux types de sources de perturbations, l'une est dite permanente et l'autre est dite discontinue ou intermittente [17].

Source permanente : Elle émet des PE à l'instant de la mise sous tension de l'appareil et durent tant qu'il fonctionne.

- Source discontinue : l'apparition des perturbations est aléatoire ce qui rend extrêmement difficile leurs reconnaissances.

III.5. L'effet de perturbation sur le circuit électronique

La figure I.3 illustre les trois niveaux d'environnement de la CEM atteint par les perturbations électromagnétiques, appliqués à un convertisseur dans le cas de l'électronique de

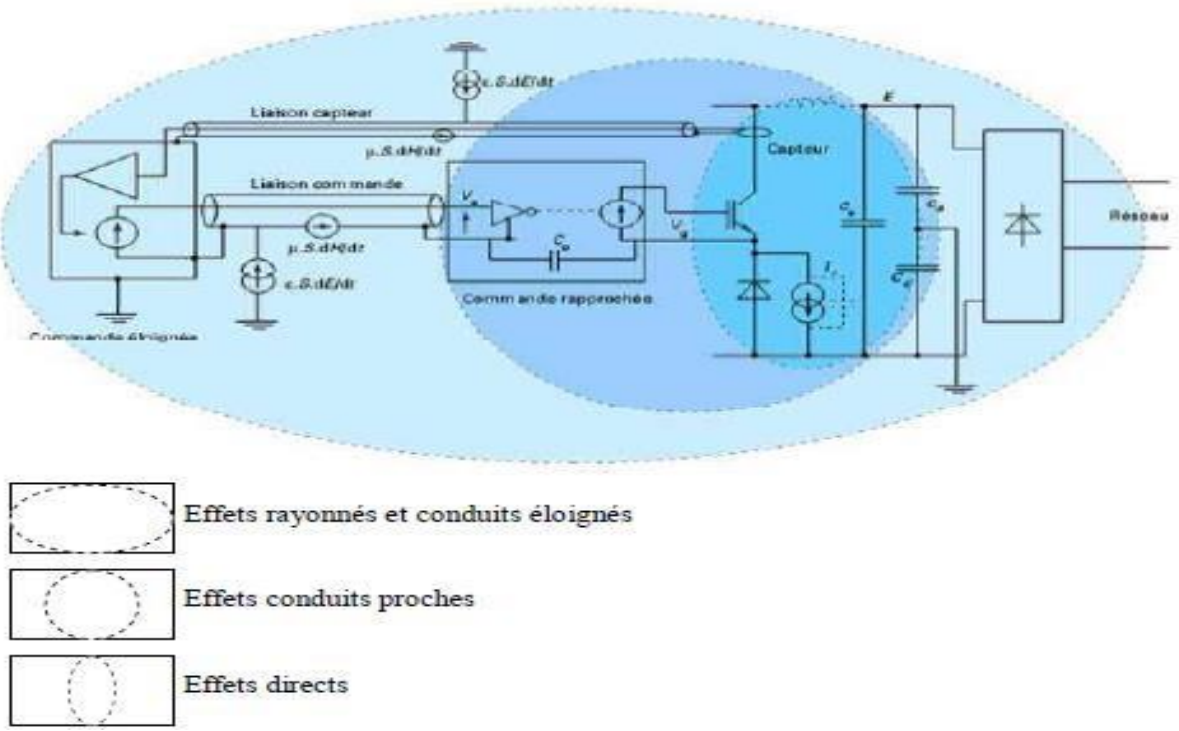


Figure III. 2. Différents niveaux de la CEM en électronique de puissance.

•Premier niveau :

•Ils sont directement liés aux étages de puissance composés de semi-conducteurs et de composants passifs.

• Au niveau de l'interrupteur (transistor, MOSFET,), le courant change très rapidement , lié à l'effet d'inductance indésirable causé par l'inductance parasite et l'inductance de fuite du transformateur, ce qui affecte sérieusement l'apparition de surtension de l'interrupteur de batterie .

•Les surtensions provoquées sont dans la plupart des cas destructifs suite aux phénomènes avalanches non contrôlés dans les semi-conducteurs.

•Les variations très rapides de la tension au niveau des semi-conducteurs ($\boldsymbol{dv/dt}$) associées à des effets capacitifs comme ceux provoqués par les enroulements des transformateurs donnent naissances à des surintensités.

•Les surintensités peuvent être acceptées par les semi-conducteurs suite à leur temps d'apparition très réduits.

•Le deuxième niveau :

Il est en relation direct avec l'environnement électrique voisin qui garantit la fonction de commande du convertisseur.

Les effets des PE sont principalement dus aux couplages proches, conduits ou induits données par les termes suivants :

$$\boldsymbol{V} = u_0 S \frac{d\mathrm{H}}{dt} \quad \text{(III.1)}$$

$$I = \zeta_0 \, jdE/dt \quad \text{(III.2)}$$

Avec :

$\boldsymbol{\mu_0}$: perméabilité du vide.

$\boldsymbol{\zeta_0}$: permittivité du vide.

$\boldsymbol{j}$: densité de puissance

$\boldsymbol{E}$: champ électrique.

$\boldsymbol{H}$: champ magnétique

Ces perturbations sont causées par des courants de mode commun circulant dans le circuit de commande et les PE à proximité. Ce niveau est sujet aux interférences les plus sévères et affecte directement la sécurité et le bon fonctionnement de l'équipement. La Figure I.4 illustre la capacité parasite et la tension de mode commun.

Les courants de mode commun voyagent dans le même sens sur tous les conducteurs et reviennent via la terre via une capacité parasite.

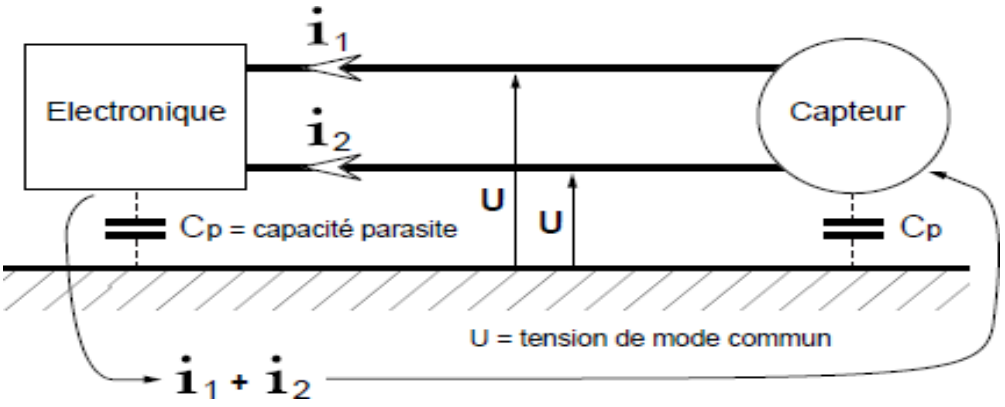


Figure III. 3. Modes de perturbation des commandes rapprochées.

Les interférences de mode commun représentent un problème « CEM » majeur car leurs chemins de propagation sont difficiles à identifier.

Il ne faut pas omettre que les capteurs utilisés dans les convertisseurs de puissance sont soumis aux mêmes perturbations.

•Le troisième niveau :

• Il concerne l'environnement éloigné du convertisseur. Ainsi on a des effets de PE transférés par :

- ***Conduit*** : Ils se propagent à travers le réseau et le convertisseur et la charge de sortie.
- ***Rayonnement*** : provenant de convertisseurs ou de câbles convertisseurs, qui sont généralement attaqués par des potentiels de courant variables.

Les effets des PE listées sur les dispositifs électroniques sont en relation direct avec le type de circuit, numérique ou analogique [18]

III.5.1. Circuits numériques

Il existe deux types d'erreurs pour les circuits numériques, l'un est de type statique et l'autre est de type dynamique. [19]

•Erreurs dynamiques : Ceux sont des PE dues aux délais de propagations dans les circuits logiques. Des retards ou des avances lors de l'apparition des fronts de déclenchement peut désynchroniser les systèmes synchrones est introduire des erreurs logiques. La prédiction de l'erreur de délais est d'autant plus difficile quand le nombre de portes logiques augmente (figure I.5.(a)). Ces erreurs apparaissent bien avant l'apparition des erreurs statiques. [19].

•Erreurs statiques : Ceux sont des PE dues à la variation rapide et brutale des niveaux logiques ne respectant pas les niveaux de sorties autorisés dans les circuits numériques et dépassant le seuil de commutation. Le dispositif considère cette variation comme un changement de l'état logique (figure I.5(b)).

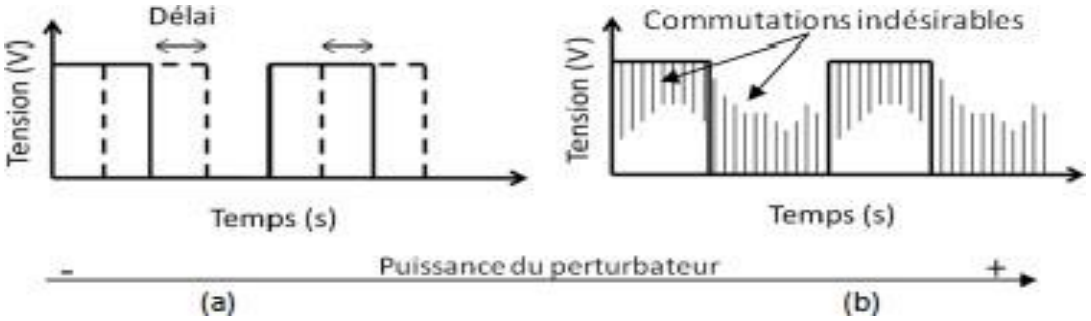


Figure III. 4. (a) Erreurs dynamiques, apparition de délais, (b) Erreur statique, commutation indésirable.

Il existe d'autres types d'erreurs dues soit à la réduction du niveau logique qui engendre réduction de la marge de bruit du dispositif soit à un accroissement du courant consommé qui modifie les caractéristiques statiques du dispositif.

III.5.2. Circuits analogiques

Contrairement aux circuits numériques, les circuits analogiques présentent une très grande aux ondes électromagnétiques. Le PE produit un changement de quelques millivolts, qui fonctionnerait probablement mal s'il se trouvait dans la plage de fonctionnement de l'électronique analogique. En dehors de la bande de fonctionnement de l'équipement, des variations importantes de tension dues au PE sont nécessaires à la défaillance du circuit.

Presque tous les circuits analogiques utilisent des circuits actifs tels que des transistors ou des amplificateurs opérationnels, et après modification des points de fonctionnement de ces composants il est très probable que vous trouviez un décalage dans le signal de sortie, ce qui peut les faire saturer et dégrader la dynamique de l'appareil électronique.

III.6. Classification des émissions des convertisseurs selon les fréquences

Soit la classification en tableau I.1, selon les fréquences et leurs limites de plagescorrespondant aux normes en émission [20].

Tableau III. 1. Classification des émissions des convertisseurs selon les fréquences.

Fréquences	**0 Hz à 50 Hz**	**50 Hz à 2 KHz**	**9 Hz à 150 KHz**	**150 KHz à 30 MHz**	**150 KHz À 300MHz**	**30 MHz à 1 GHz**
Grandeurs les plus souvent observées	Sous harmoniques des courants	Harmoniques des courants et des tensions	Courants radio fréquences Tension perturbatrice Champs magnétiques	Courants radio fréquences Champ proche	Rayonnement des câbles Puissances perturbatrices	Rayonnement avec les champs généralement couplés
Appellation « d'usage »	Flicker	Conduit BF	Conduit limite BF-RF	Conduit RF (ou HF)	Champs conduits	Rayonné
Convertisseurs statiques et appareils Électriques prouvent être Concerné	Gradateur en trains d'ondes Cycloconver-tisseur	Redresseur Gradateurs en angle de phase	Appareils Electriques d'éclairage et analogues	Micro-ordinateurs Alimentation à découpage	Outils électriques avec moteurs ou dispositifs thermiques Appareils Electro-domestiques	Micro-ordinateurs Alimentation à découpage Tout système numérique

III.7. Classification selon le mode propagation

Dans la bibliographie, les chercheurs classe les PE engendrées par le convertisseur statique en fonction du mode de propagation. Il en existe deux :

- perturbations conduites
- perturbations rayonnées.

III.7.1. Perturbations conduites

Les perturbations conduites les plus communes, sont les harmoniques de courant et de tension. Les générateurs d'harmoniques sont des charges non linéaires. Elles n'absorbent pas un courant sinusoïdal, bien qu'elles soient alimentées par une tension sinusoïdale (redresseurs à diode et à thyristors, lampes à décharges…). En plus des harmoniques de courant et de tension, les perturbations conduites comprennent les inter-harmoniques (causésessentiellement par les cyclo-convertisseurs) [21][22][23] et [24]. Pour les convertisseurs DC/DC et DC/AC, ces courants et tensions correspondent

généralement au fondamental et aux harmoniques de bas ordres. Les tensions et courants harmoniques ont un nombre d'effets indésirables sur les appareils et équipements utilisés. Les principales conséquences des effets nocifs de la distorsion harmonique engendrées à court terme sont rappelées ci-dessous [23][24] :

- Échauffement les pertes par effet Joule.
- Dysfonctionnement de certains équipements.
- Excitation des résonances.
- Bruits acoustiques.
- Vibrations mécaniques et bruits acoustiques dans les générateurs et les moteurs.

De plus, ces effets nocifs instantanés (échauffement, surtension, surintensité,...), provoquent un vieillissement accéléré des appareils électriques [23][24]. La perturbation conduite est engendrée par les gradients de tension dV/dt et de courant dI/dt dus essentiellement à la commutation rapide, généralement les convertisseurs statiques sont des sources majeures de ces perturbations.

Dans ce cas les perturbations interviennent soit en mode commun (MC) ou mode différentiel (MD).

III.7.2. Perturbations rayonnées

On parle d'un couplage ou perturbation en mode rayonné lorsque la perturbation électromagnétique de la source vers la victime s'effectue sans aucune liaison physique qui les relie. Les perturbations EM rayonnées sont caractérisées par la « propagation » de champ électrique ou de champ magnétique ou de champ électromagnétique rayonné par un composant (source) qui va attaquer un autre composant (victime) [24] [25]. On distingue deux types de couplages pour ce mode qui sont :

- Couplage en champ lointain ;
- Couplage en champ proche.

Ces types de couplages sont limités physiquement par des zones qui sont appelées : zone de champ proche et zone de champ lointain. La notion de la zone de champ proche et zone de champ lointain est toujours mise en évidence dans le domaine de la CEM. Cependant, nous proposons dans cette partie une définition sur la limite de ces 2 zones [24] [25].

III.8. Les convertisseurs statiques DC/DC

La conversion statique DC/DC est un processus qui permet de convertir une tension continue (DC) en une autre tension continue à un niveau différent. Cette conversion est réalisée en utilisant un dispositif électronique appelé convertisseur DC/DC.

Les convertisseurs DC/DC peuvent être utilisés pour augmenter ou diminuer la tension continue, selon les besoins. Les applications typiques comprennent les alimentations électriques pour l'électronique, les systèmes solaires photovoltaïques, les véhicules électriques, les systèmes de stockage d'énergie et bien plus encore.

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC/DC, mais ils sont généralement classés en deux catégories : les convertisseurs abaisseurs (buck) et les convertisseurs élévateurs (boost). Les convertisseurs abaisseurs sont utilisés pour réduire la tension, tandis que les convertisseurs élévateurs sont utilisés pour augmenter la tension.

Les convertisseurs DC/DC peuvent être conçus avec différents topologies de circuits pour optimiser les performances en termes d'efficacité, de taille, de coût et de fiabilité. Les topologies couramment utilisées comprennent les convertisseurs à découpage (switching converters), les convertisseurs à commutation douce (soft-switching converters) et les convertisseurs à double conversion.

Pour ce type de convertisseur statique, la plage de puissance "supportable" s'étend de quelques watts à une trentaine de kilowatts. Cependant, l'avènement de composants de puissance de plus en plus performants, ainsi que la définition de nouvelles structures (notamment multiniveaux), ont permis d'envisager une tenue en puissance plus élevée. On distingue deux types de convertisseurs DC/DC :

✓ Le convertisseur est appelé ((hacheurs)), qu'il soit buck, boost ou buck-boost, pour des applications de moyenne à forte puissance,

✓ les alimentations à découpages, qui correspondent aux applications petites puissances de la conversion DC/DC [23].

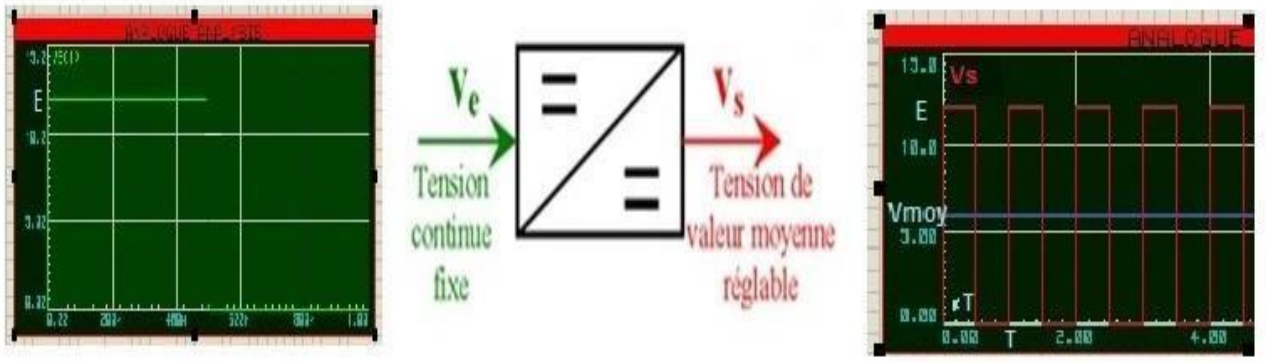


Figure III. 5. Principe de base d'un hacheur.

III.9. Les hacheurs

Un convertisseur CC-CC est utilisé pour fournir une tension CC réglable à une charge à partir d'une source CC fixe.

Une tension moyenne variable est obtenue en commutant l'accumulation et en interrompant périodiquement l'alimentation de la source à la charge.

III.9.1. Elévateur de tension « Boost »

- **Définition**

Un convertisseur élévateur ou hacheur shunt est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure.

- **Principe de fonctionnement**

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K (voir Figure II.2) :

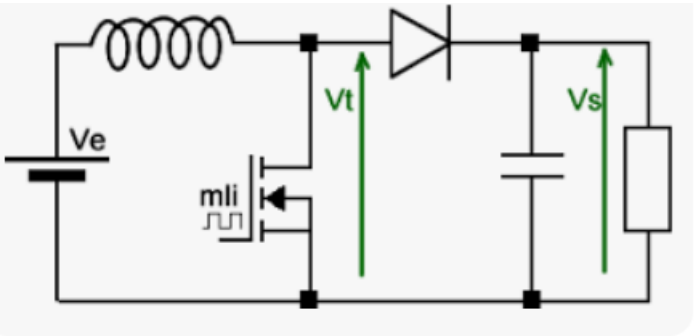


Figure III. 6. Principe de base d'un hacheur boost.

• Phase d'accumulation d'énergie : La fermeture de l'interrupteur K (voir Figure II.2) (état

passant) provoque l'augmentation du courant dans l'inductance emmagasinant ainsi une certaine quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est ensuite déconnectée de l'alimentation.

• Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance est en série avec le générateur et sa fem. a été ajouté au générateur (effet booster).

• Le courant circulant dans l'inductance traverse alors la diode D, le condensateur C et la charge R. Cela entraîne le transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur.

Dans ce mémoire, on étudiera en détail l'hacheur de type boost

➢ **Application**

• Lorsqu'il est nécessaire d'augmenter la tension disponible à partir d'une source continue, on peut utiliser un convertisseur boost.

• Les systèmes alimentés par batterie utilisent souvent plusieurs accumulateurs en série pour atteindre le niveau de tension requis.

• Toutefois, étant donné que l'espace disponible est souvent limité, il peut être difficile de disposer d'un nombre suffisant d'éléments pour obtenir la tension souhaitée.

• En utilisant un convertisseur boost, il est possible d'augmenter la tension fournie par les batteries, ce qui permet de réduire le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension souhaité. Les véhicules hybrides et les systèmes d'éclairage sont deux exemples courants où les convertisseurs boost sont utilisés pour atteindre cet objectif.

• convertisseurs boost sont utilisés dans les applications de faible puissance, telles que les systèmes d'éclairage portables. Pour faire fonctionner une diode électroluminescente blanche, une tension d'environ 2,7 à 3,6 V est nécessaire, ce qui peut être obtenu en utilisant un convertisseur boost pour augmenter la tension fournie par une pile de 1,5 V. Cette technique est souvent utilisée pour créer des lampes torche à faible consommation d'énergie.

• Les convertisseurs boost sont également capables de fournir des tensions beaucoup plus élevées pour alimenter des composants tels que les tubes à cathode froide utilisés dans les rétroéclairages des écrans à cristaux liquides ou les flashs des appareils photo.

III.10. Le MOSFET

Le MOSFET (Métal Oxide Semi-conducteur Field Effect Transistor), en français Transistor à Effet de Champ (à grille) Métal-Oxyde. Un transistor MOSFET de puissance est formé d'un grand nombre de cellules élémentaires mises en parallèle. Sa structure verticale permet au courant de traverser la puce de silicium perpendiculairement et assure une assez grande tenue en tension. La figure II.5 (a) représente une vue en coupe de deux cellules voisines

et la Figure II.5 (b) montre le symbole usuel du MOSFET de puissance avec les notations classiques [26,27].

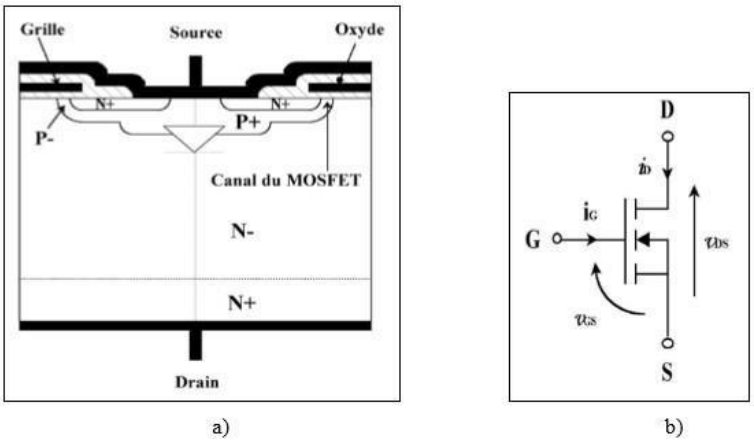


Figure III. 7. Structure (a) et symbole de MOSFET (b).

Les grands avantages du MOS sont les suivants :

•Une grande rapidité de commutation, notamment en ce qui concerne le blocage par rapport au transistor bipolaire.

•Une simplicité dans la mise en œuvre de la commande : amorcer ou bloquer un MOS consiste en la simple charge ou décharge de la capacité grille-source. C'est une commande en tension [26].

Caractéristiques statiques

Les caractéristiques donnent le courant de drain $\boldsymbol{ID}$en fonction de la tension drain-source $\boldsymbol{VDS}$, pour diverses valeurs de la tension grille-source $\boldsymbol{VGS}$. La figure II.6 montre une allure de caractéristiques statiques obtenues de datasheet pour le MOSFET IRF540N [28]

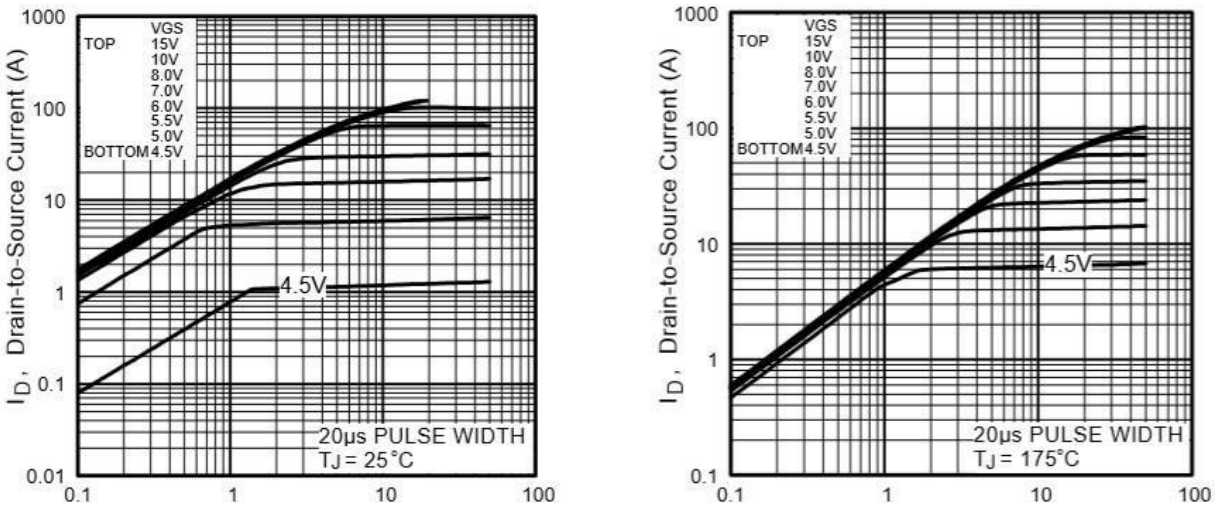


Figure III. 8. Caractéristiques de sortie typiques du MOSFET IRF540N.

Lorsque la tension $\boldsymbol{VGS}$ est inférieure à la tension de seuil $\boldsymbol{VT}$, le transistor est bloqué. Le courant $\boldsymbol{ID}$est pratiquement nul, du moins tant que $\boldsymbol{VDS}$n'atteint pas la tension d'avalanche $\boldsymbol{VRB}$de la jonction PN-N+ qui supporte cette tension.

Lorsque la tension $\boldsymbol{VGS}$dépasse la tension de seuil, l'apparition d'un canal rend le transistor conducteur. A partir de la tension $\boldsymbol{VDS}$=0, le courant $\boldsymbol{ID}$croît d'abord proportionnellement à $\boldsymbol{VDS}$, ce qui correspond à une résistance $\boldsymbol{RDS}$onentre drain et source presque constante.

Lorsque la tension $\boldsymbol{VDS}$atteint une valeur appelée tension de pincement $\boldsymbol{VP}$(pinching voltage), le canal est interrompu par la zone de charge de la jonction PN-: le courant $\boldsymbol{ID}$devient presque indépendant de $\boldsymbol{VDS}$. Car les électrons passent en vitesse limite. Cela correspond au régime de saturation du MOSFET.

A l'aide de la figure II-7, la caractéristique de transfert, on peut extraire la valeur $\boldsymbol{VT}$, la tension de seuil. Cette caractéristique donne les variations du courant de drain $\boldsymbol{ID}$en fonction de la tension grille-source $\boldsymbol{VGS}$lorsque le MOSFET est en régime de saturation.

La tension $\boldsymbol{VGS}$doit rester inférieure à une valeur limite, sinon il y a risque de claquage de la couche d'oxyde grille [27].

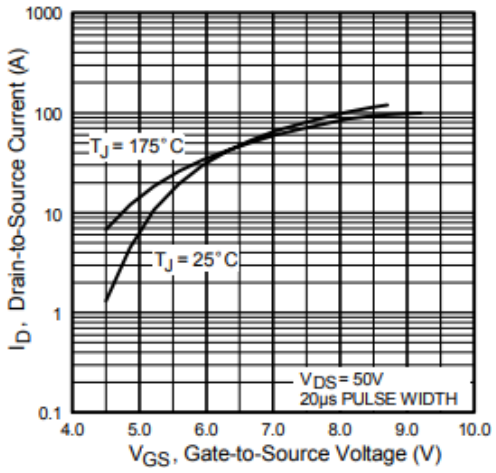


Figure III. 9. Caractéristique de transfert pour un MOSFET IRF540N.

III.10.1. Le MOSFET en mode interrupteur

Le transistor MOSFET est un interrupteur unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant [29].

Conclusion

En conclusion, les perturbations électromagnétiques sont des variations indésirables dans le signal électrique qui peuvent affecter le bon fonctionnement des circuits électroniques. Il existe différents types de perturbations électromagnétiques, qui peuvent être causées par différentes sources, telles que les convertisseurs statiques. Les circuits analogiques sont particulièrement vulnérables aux perturbations électromagnétiques. Les émissions des convertisseurs peuvent être classées selon les fréquences et selon le mode de propagation. Les hacheurs sont des convertisseurs statiques couramment utilisés, et il existe différents types d'hacheurs, tels que l'élévateur de tension "Boost". Il est important de prendre en compte les effets de perturbation lors de la conception des circuits électroniques pour éviter des erreurs de fonctionnement et garantir la fiabilité et la durabilité du système.

Dans le dernier chapitre, nous essaierons d'étudier la théorie du phénomène perturbation électromagnétique sur le transformateur (Hacheur boost) et de corriger certaines des erreurs qui en résultent en appliquant le logiciel de la simulation des circuits électronique Proteus

Chapitre IV

Mesure et réduction des perturbation d'un circuit

Introduction

L'électronique de puissance joue un rôle important dans de nombreuses applications industrielles telles que les alimentations électriques, les systèmes d'éclairage, les véhicules électriques, etc. Un hacheur élévateur est l'un des types de convertisseurs de puissance les plus couramment utilisés dans ces domaines. Cependant, ces appareils peuvent générer des interférences électromagnétiques (CEM), qui peuvent interférer avec le bon fonctionnement d'autres composants du système.

Afin de garantir une CEM adéquate et de réduire le risque d'EMI, il est essentiel d'étudier et de quantifier les EMI générées par un hacheur élévateur. Ceci permet de prendre des mesures appropriées pour minimiser ces perturbations et assurer un fonctionnement fiable du système.

La simulation numérique est un outil puissant pour analyser le comportement électromagnétique des circuits électroniques, y compris les hacheurs de type boost. Deux logiciels couramment utilisés pour la simulation de circuits électroniques sont Proteus et COMSOL. Dans cette étude, nous utiliserons à la fois Proteus et COMSOL pour simuler et analyser les perturbations électromagnétiques générées par un hacheur de type boost. Nous examinerons les différentes méthodes de modélisation et les approches de simulation disponibles dans ces logiciels, et nous évaluerons l'efficacité des solutions proposées pour réduire les perturbations électromagnétiques et garantir une compatibilité électromagnétique optimale.

L'objectif de cette étude est de fournir des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des hacheurs de type boost, en prenant en compte les aspects de compatibilité électromagnétique. Les résultats obtenus aideront les ingénieurs et les concepteurs de systèmes électroniques à comprendre et à atténuer les problèmes de CEM associés aux hacheurs de type boost, contribuant ainsi à la réalisation de systèmes électroniques plus fiables et performants.

IV.1. Convertisseur parallèle

Illustre le convertisseur parallèle (hacheur de type boost) utilisé pour nos simulations. Il est composé essentiellement

- D'un MOSFET IRF540N

- d'une diode 1N4148

- Condensateur C1 ECJ-5YF0J107Z

C2 ECJ-5YF0J107Z

- D'une Resistance

- d'une bobine L IND-AIR

Tableau IV. 1. Reference et valeur d'un composant.

Reference	Valeur
BAT1	5V
C1	100uF
C2	100uF
D1	1N4148
L1	3uH
Q1	IRF540N
R1	18Ω

IV.2. Plan de Masse

Un plan de masse, également connu sous le nom de "plan de masse de référence", est une technique utilisée dans la conception de cartes de circuits imprimés (PCB) pour fournir une référence de potentiel commun (masse) et une distribution uniforme sur le PCB. Il s'agit d'une surface conductrice continue généralement placée sur un ou plusieurs couches internes d'un PCB et connectée à la masse du système (GND).

IV.2.1. Les types de la réalisation d'un circuit imprimé selon plan de masse

Circuit imprimé simple face : Dans ce type de réalisation, toutes les connexions du circuit sont situées sur une seule face du circuit imprimé. Les composants sont montés du côté cuivre, et les pistes de cuivre sont routées sur le même côté du circuit imprimé. Ce type de réalisation est généralement utilisé pour des circuits simples avec un nombre limité de composants.

Circuit imprimé double face : Dans ce type de réalisation, les connexions du circuit sont situées sur les deux faces du circuit imprimé. Les composants peuvent être montés des deux côtés, permettant ainsi une densité plus élevée de composants et une meilleure optimisation offre plus de flexibilité dans la conception.

Circuit imprimé multicouche : Dans ce type de réalisation, le circuit imprimé est composé de plusieurs couches de cuivre superposées avec des interconnexions à travers des trous métallisés (vias). Cela permet d'augmenter considérablement la densité des composants et la complexité du circuit. Les couches supplémentaires peuvent être utilisées pour fournir des plans de masse, des signaux de puissance ou des signaux de référence supplémentaires.

Circuit imprimé flexible : Dans certains cas, il peut être nécessaire d'utiliser un circuit imprimé flexible pour un hacheur de type boost. Les circuits imprimés flexibles sont réalisés sur des matériaux flexibles tels que le polyamide, ce qui permet une flexibilité et une adaptabilité accrues dans les applications où une forme courbée ou pliable est requise.

Dans notre simulation d'un hacheur de type boost le type de réalisation du circuit imprimé le plus couramment utilisé est le circuit imprimé simple face ou le circuit imprimé double face. Le choix entre ces deux types dépend de la complexité du circuit, du nombre de composants et de la densité requise.

Un hacheur de type boost est généralement relativement simple en termes de schéma et de nombre de composants. Par conséquent, dans la plupart des cas, un circuit imprimé simple face peut être utilisé avec succès. Les connexions et les pistes de cuivre peuvent être facilement routées sur une seule face du circuit imprimé, ce qui simplifie la fabrication et réduit les coûts.

IV.3. Les Logiciels utilisé

IV.3.1. Proteus

Proteus est un logiciel de conception électronique qui est largement utilisé dans l'industrie électronique et l'éducation. Il permet aux ingénieurs et aux concepteurs de circuits de créer, de simuler et de tester des circuits électroniques avant leur mise en production.

Proteus offre une suite d'outils intégrés qui permettent la conception de schémas électroniques, la simulation de circuits, la création de modèles de composants, la conception de PCB (Printed Circuit Board), et même la programmation et le débogage de microcontrôleurs. Il permet aux utilisateurs de travailler avec une large gamme de composants électroniques tels que des résistances, des condensateurs, des diodes, des transistors, des circuits intégrés, etc..

Le logiciel offre une interface graphique conviviale qui permet de dessiner des schémas de circuits en utilisant une bibliothèque de composants électroniques préexistante. Les utilisateurs peuvent également ajouter leurs propres composants personnalisés à la bibliothèque. Une fois que le schéma est créé, Proteus permet de simuler le comportement du circuit,

d'analyser les signaux, de mesurer les tensions et les courants, et de vérifier le bon fonctionnement du circuit.

IV.3.1.1. simulation de circuit imprimé d'un hacheur de type (boost) dans Proteus

La simulation d'un hacheur boost dans Proteus permet de modéliser le comportement du circuit et d'analyser ses performances. Proteus offre des outils de simulation avancés qui permettent de créer le schéma d'un hacheur boost en utilisant une bibliothèque de composants électroniques prédéfinis. Les utilisateurs peuvent définir les paramètres d'un hacheur, tels que la tension d'entrée, la fréquence de commutation, le rapport cyclique, l'inductance de l'inducteur, la capacité du condensateur, etc

Pour réaliser le circuit imprimé d'un hacheur de type boost dans Proteus Nous sommes passés par ces étapes :

1)- Sélectionnez l'éditeur de schématique et dessine le schéma électrique en utilisant les composants disponibles dans la bibliothèque de Proteus. Et Vérifiez le schéma pour assurer qu'il est correct et qu'il ne contient pas d'erreurs Comme ci montré :

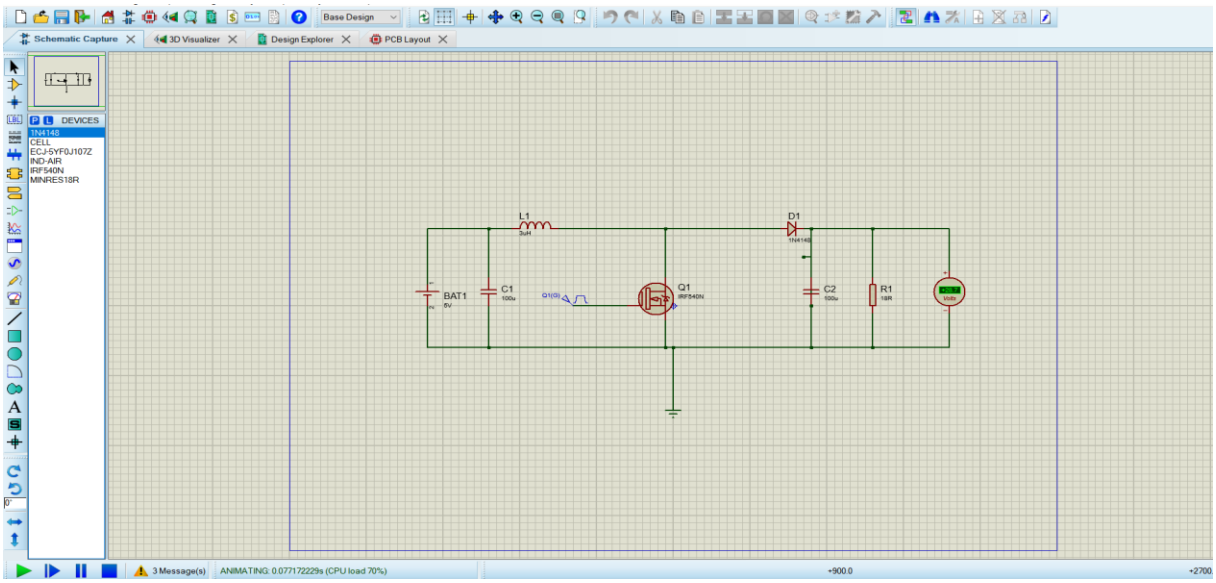


Figure IV. 1. Schéma de la Création de la simulation sous Proteus (hacheur boost).

2)-si le schéma est correct et qu'il ne contient pas d'erreurs nous passons à la conception du circuit imprimé , Nous sélectionnons l'outil de conception de PCB (Printed Circuit Board) dans Proteus après placer les composants sur la carte virtuelle .

A la fin Nous connectons les composants en traçant les pistes sur le PCB Comme ci montré :

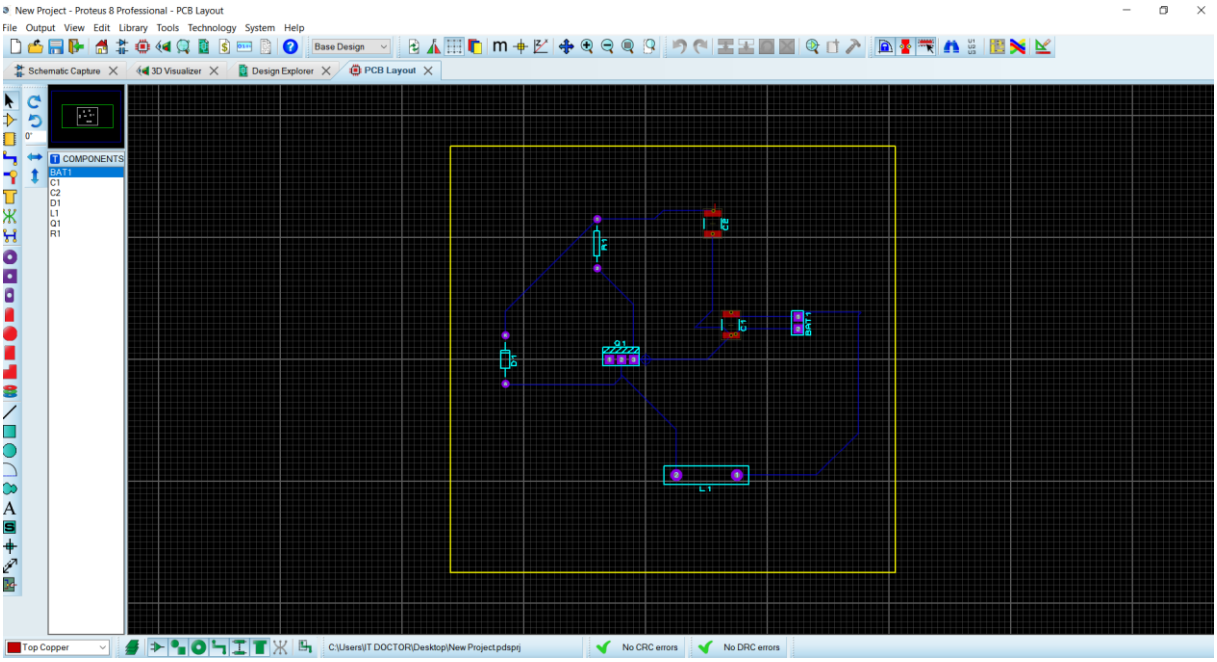


Figure IV. 2. Schéma de la Pcb layoot.

.

Une fois le routage terminé, nous vérifions le PCB pour détecter d'éventuelles erreurs. Et Nous utilisons l'outil de simulation de Proteus pour simuler le comportement du circuit et vérifier son bon fonctionnement Comme ci montré :

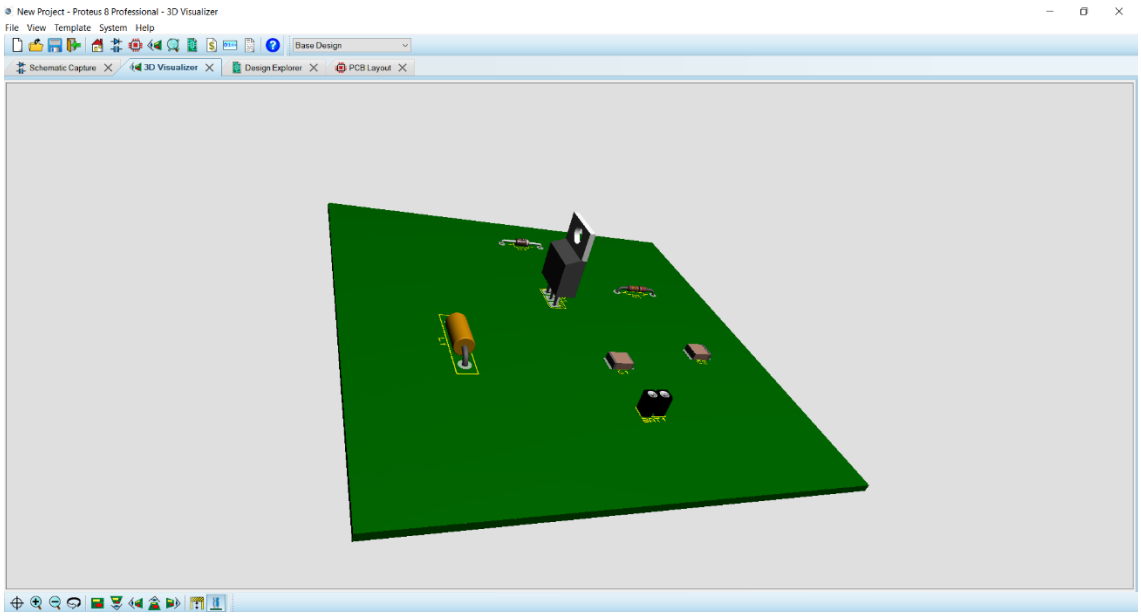


Figure IV. 3. Schéma de la Circuit imprime d'un hacheur boost.

IV.3.2. COMSOL Multiphasiques

COMSOL Multiphasiques est un puissant environnement de modélisation et de simulation multiphysique qui permet aux ingénieurs et aux scientifiques de résoudre des problèmes complexes impliquant de multiples phénomènes physiques. Il est basé sur la méthode des éléments finis, une technique numérique couramment utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles décrivant le comportement de systèmes physiques.

Avec COMSOL Multiphasiques, les utilisateurs peuvent modéliser et simuler divers phénomènes physiques tels que la mécanique des structures, l'électromagnétisme, le transfert de chaleur, l'écoulement des fluides et l'acoustique. Le logiciel fournit une interface graphique conviviale qui permet de construire des modèles, de définir les propriétés des matériaux, de configurer les conditions aux limites et d'effectuer des analyses numériques avancées.

L'utilisation de la méthode des éléments finis dans la modélisation CEM permet une représentation précise du comportement électromagnétique complexe des systèmes et des structures. Un logiciel de simulation par éléments finis, tel que FemLab (le nom du prédécesseur de COMSOL Multiphasiques), fournit des systèmes fonctionnels pour construire des modèles CEM, définir les propriétés des matériaux et des composants, simuler des sources de rayonnement électromagnétique, simuler des champs électromagnétiques et quantifier les interactions électromagnétiques entre différents composants.

COMSOL Multiphasiques peut être utilisé pour résoudre des problèmes de perturbation électromagnétique (EMC). COMSOL offre des fonctionnalités pour modéliser et simuler les interactions électromagnétiques entre différents composants et systèmes, ce qui peut aider à analyser et à atténuer les perturbations électromagnétiques.

IV.3.2.1. bibliothèque de logiciel COMSOL

La bibliothèque de logiciels COMSOL contient une large gamme de modules qui permettent aux utilisateurs de résoudre des problèmes complexes dans une variété de disciplines scientifiques et d'ingénierie. Ces modules peuvent être utilisés individuellement ou combinés pour des simulations multiphysiques couvrant plusieurs domaines physiques.

À l'aide des modules de la bibliothèque COMSOL, les utilisateurs peuvent créer des modèles personnalisés, définir les propriétés des matériaux, spécifier les conditions aux limites, résoudre des équations physiques, générer des maillages appropriés, exécuter des simulations

et analyser les résultats. La bibliothèque offre flexibilité et extensibilité, permettant aux utilisateurs d'adapter leurs simulations à leurs besoins spécifiques.

IV.3.3. simulation de circuit imprimé d'un hacheur de type (boost) dans COMSOL

Pour ouvrir le logiciel COMSOL, allez dans le menu "Fichier" puis sélectionnez "Nouveau Projet". Ensuite AC/DC puis on va sur le terrain de champs magnétique courants nuls Comme montré dans la figure IV.4

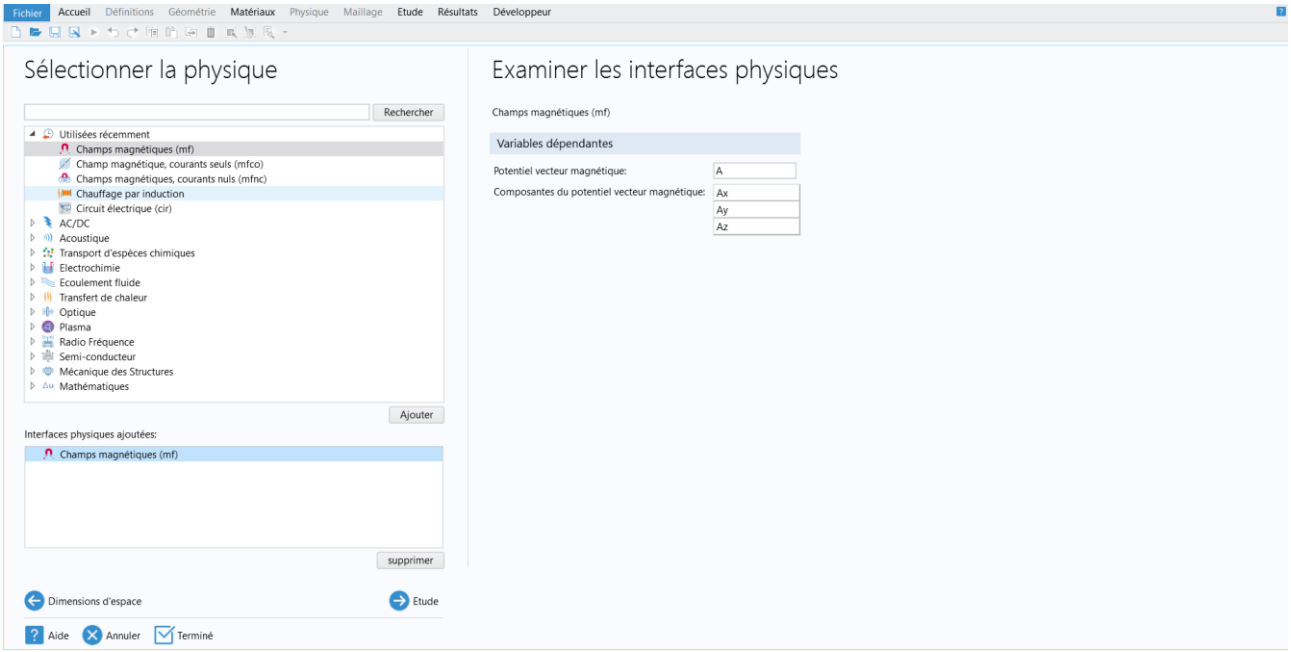


Figure IV. 4. Interface du programme Comsol.

Puis nous passons aux étapes de création Classement comme suit :

IV.3.4. Définir la géométrie

Nous commençons par définir la géométrie de l'hacheur de type boost dans COMSOL. Cela implique de créer les formes et dimensions appropriées

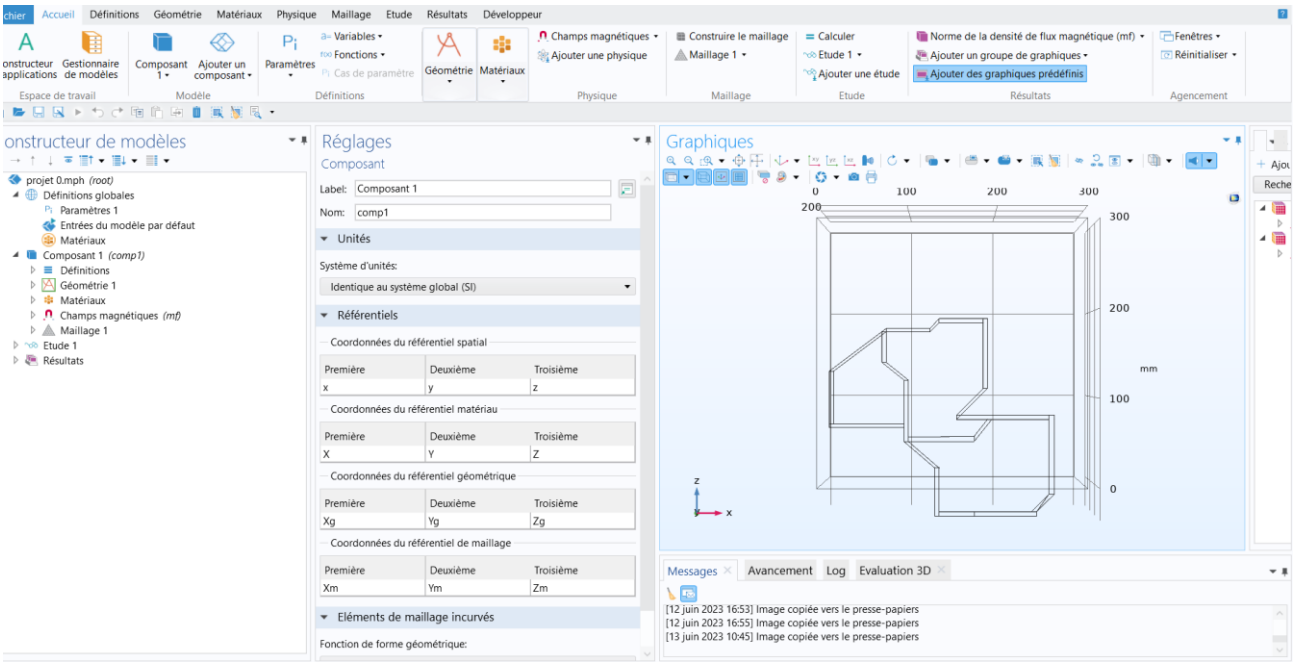


Figure IV. 5. Schéma de la Création de la simulation sous Comsol.

IV.4. Définir les propriétés matérielles

Ensuite, nous spécifions les propriétés matérielles des composants, Cela comprend la perméabilité magnétique, la conductivité électrique, la permittivité diélectrique, etc. Nous entrons ces valeurs en fonction des caractéristiques des matériaux réels que nous utilisons.

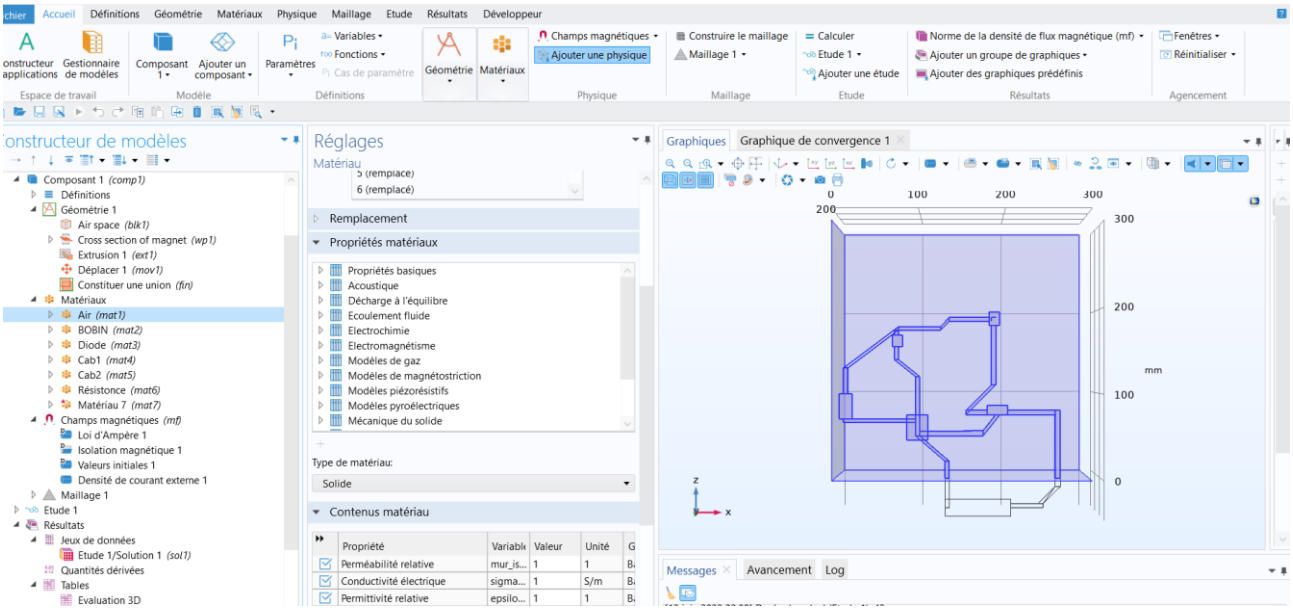


Figure IV. 6. Schéma de L'Air en comsol.

Nous avons sélectionné les propriétés de L'Air comme suit :

Tableau IV. 2. Les caractéristiques de L'Air.

Propriété	**Valeur**	**Unité**
Perméabilité relative	1	1
Conductivité électrique	1	S /m
Permittivité relative	1	1

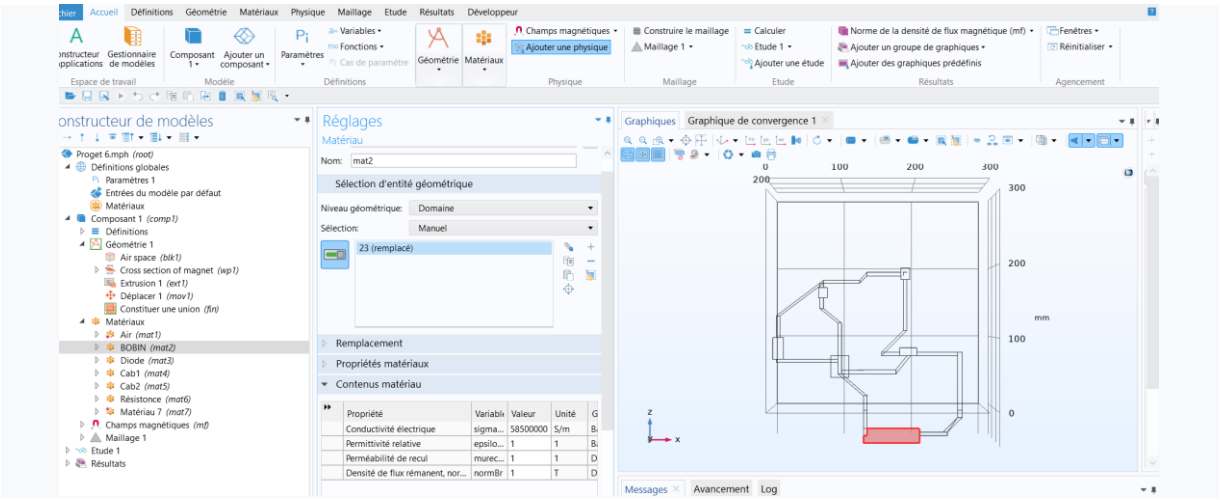


Figure IV. 7. Schéma de La bobine en comsol.

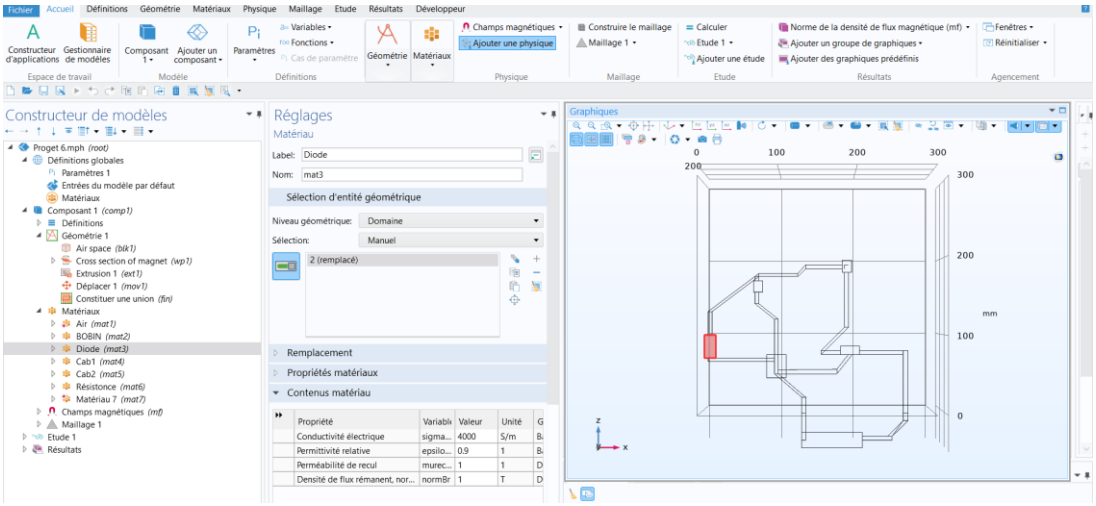


Figure IV. 8. Schéma de La diode en comsol.

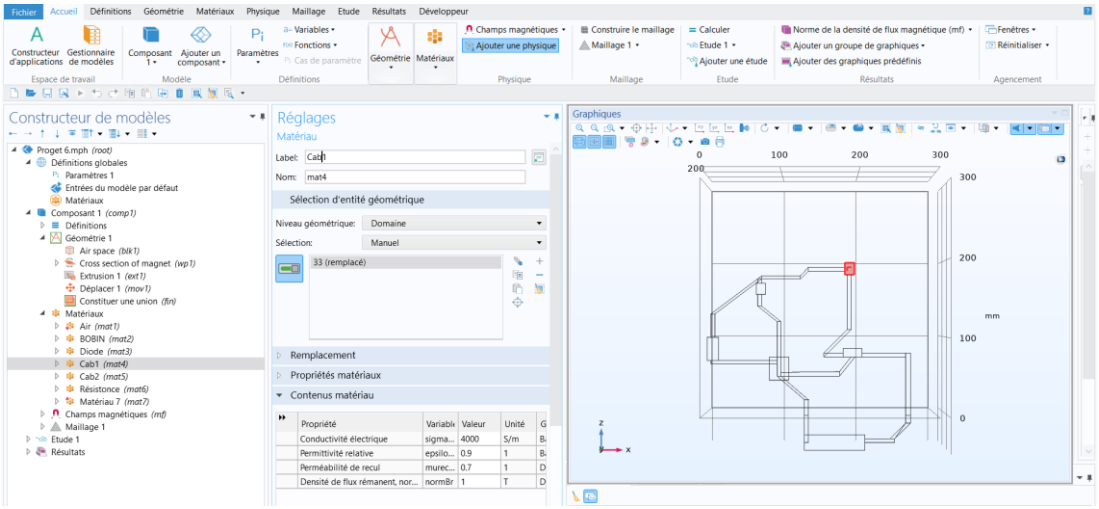


Figure IV. 9. Schéma de la Condensateur (1) en comsol.

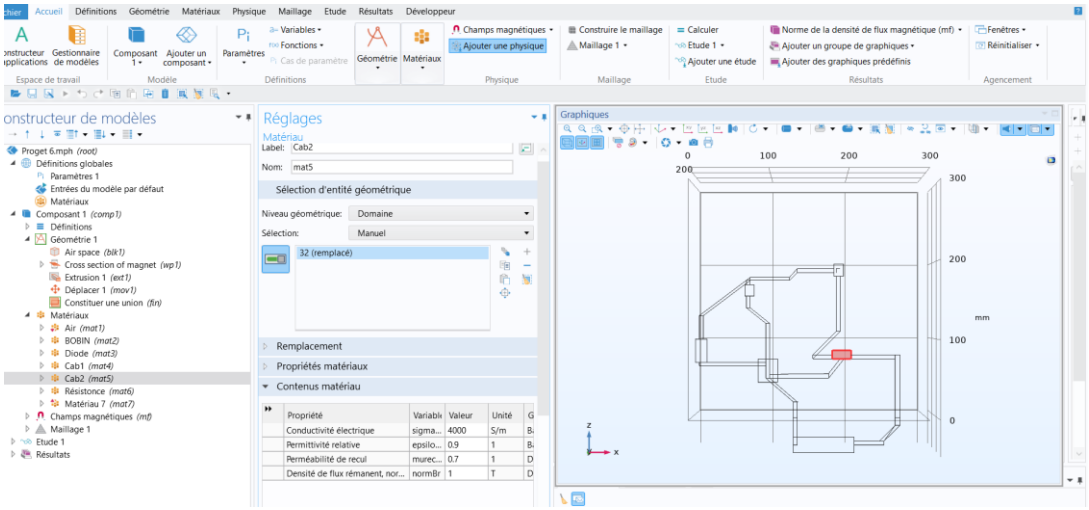


Figure IV. 10. Schéma de la Condensateur (2) en comsol.

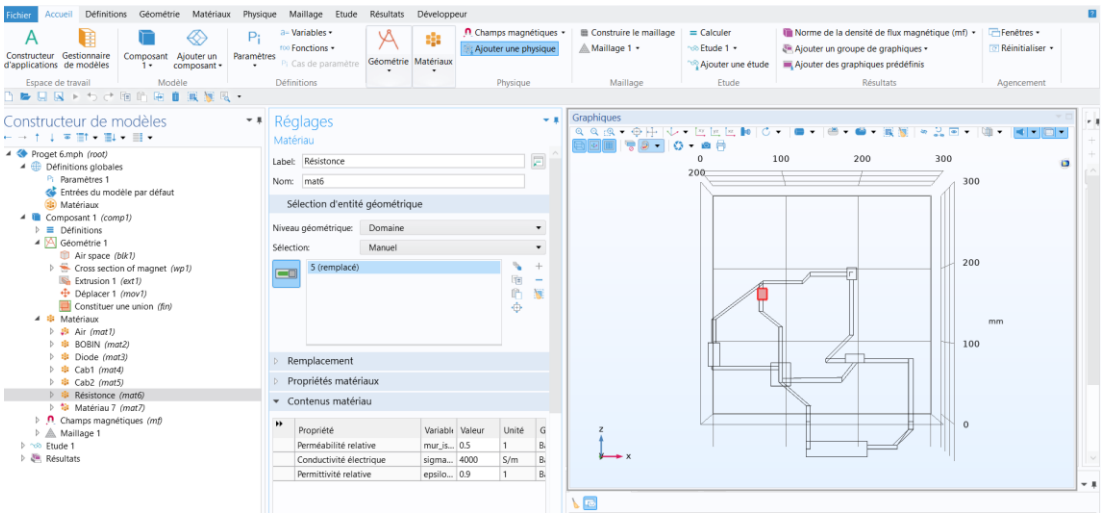


Figure IV. 11. Schéma de la Résistance en comsol.

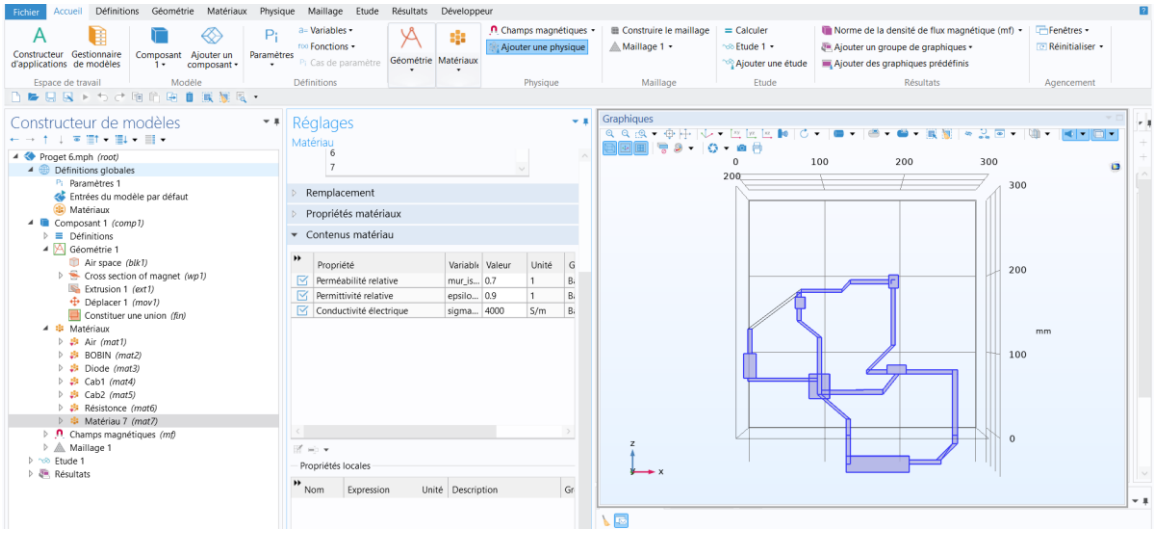


Figure IV. 12. Schéma de Les pistes de cuivre en comsol.

Pour les pistes nous avons choisi le cuivre Et ce sont ses caractéristiques :

Tableau IV. 3. Les caractéristiques sont cuivre.

Propriété	**Valeur**	**Unité**
Perméabilité relative	1	1
Conductivité électrique	1	S/m
Permittivité relative	1	1

IV.4.1. Conditions aux limites

Ensuite, nous spécifions les équations et les paramètres physiques qui régissent le comportement de l'hacheur de type boost. Cela inclut les équations de Maxwell pour le champ magnétique (Loi d'Ampère) et la densité de courant. Pour la loi d'Ampère, nous pouvons sélectionner l'équation de courant magnétique .

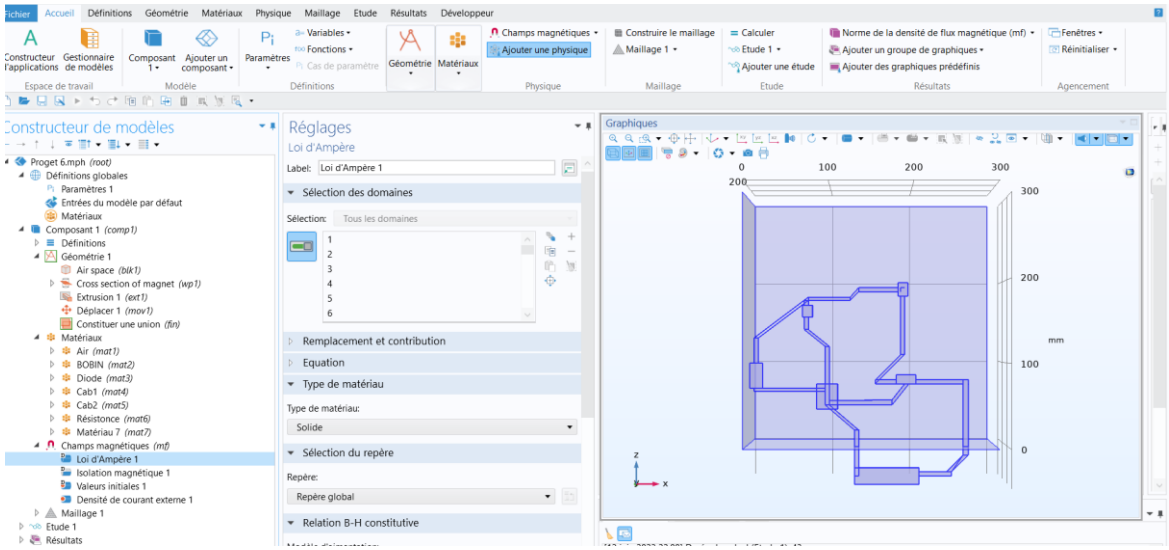


Figure IV. 13. Schéma de la Loi d'Ampère.

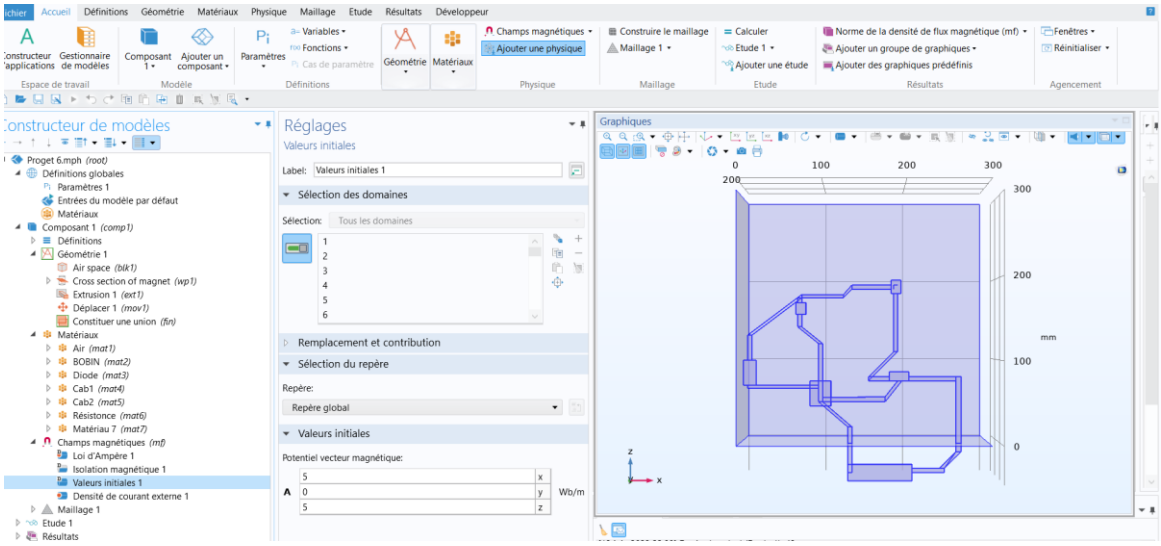


Figure IV. 14. Schéma de la Valeurs initiales.

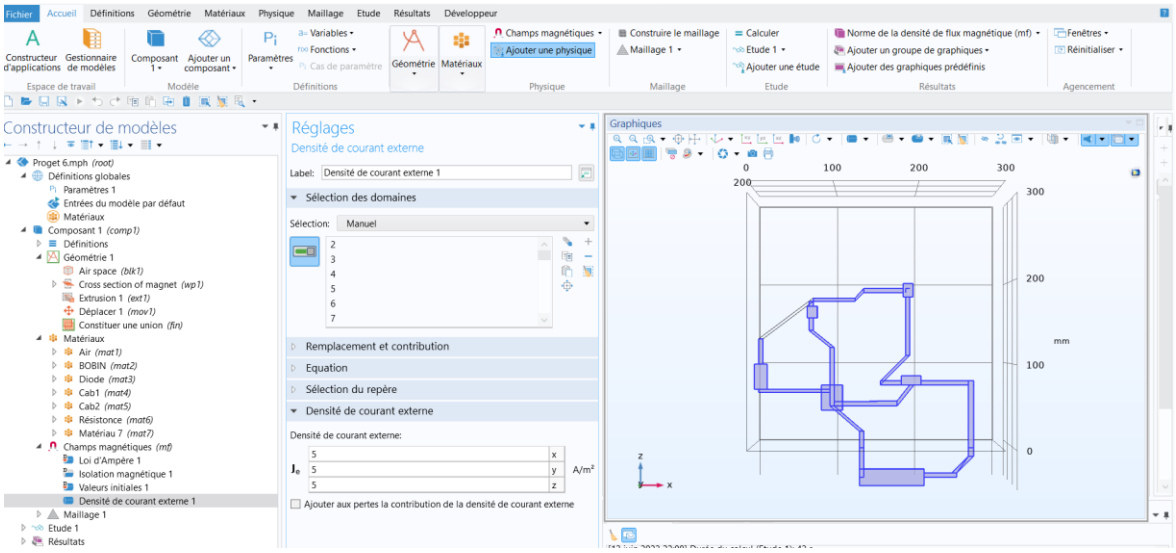


Figure IV. 15. Schéma de la Densité de courant.

IV.5. Résultats de simulation

Lors de l'alimentation du circuit en courant, on note que la densité de flux magnétique augmente à mesure que nous approchons du circuit, comme la montre la figure (IV.16)

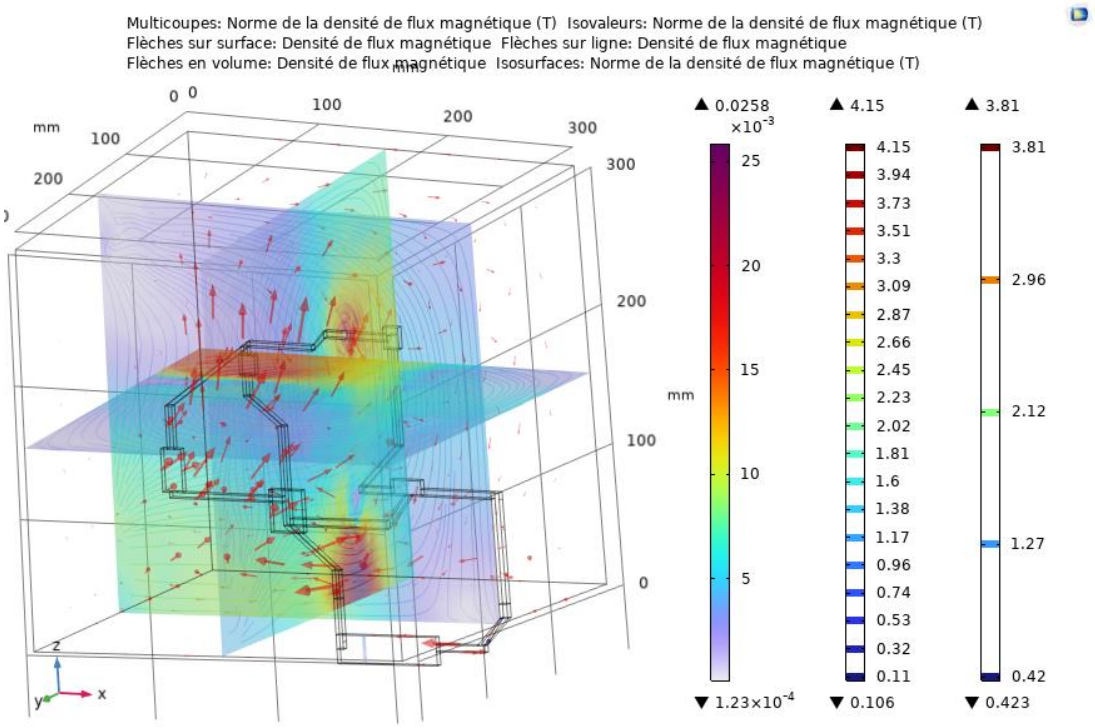


Figure IV. 16. Schéma de la Norme de la densité de flux magnétique (hacheur boost).

Et sur cette figure, on remarque que le nombre de Flèches sur ligne augmente également à mesure que l'on se rapproche du circuit étudié, comme la montre la figure (IV.17) et figure (IV.18).

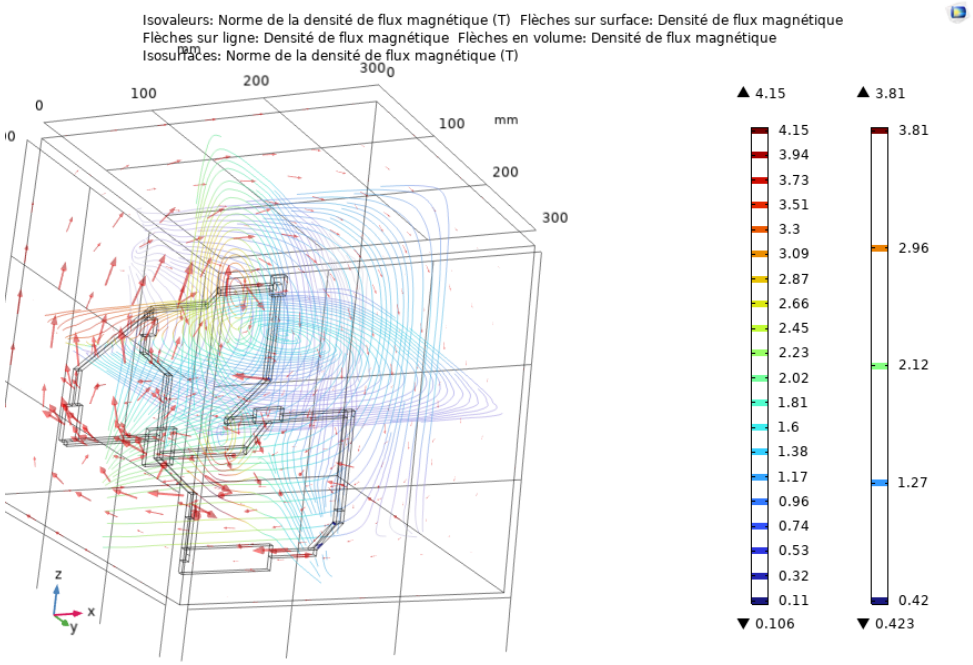


Figure IV. 17. Schéma de la Norme du nombre de Flèches sur ligne (hacheur boost) sans multicoupes.

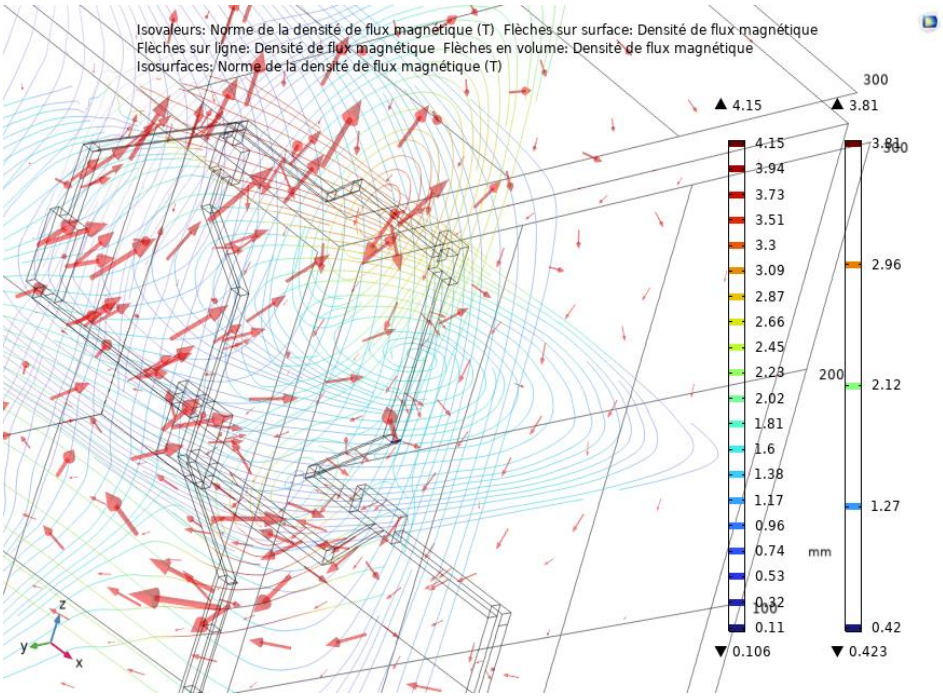


Figure IV. 18. Schéma de la Norme du nombre de Flèches sur ligne (hacheur boost) sans multicoupes.

.

La figure (IV.19) montrée en nous montre les lignes de flux magnétique.

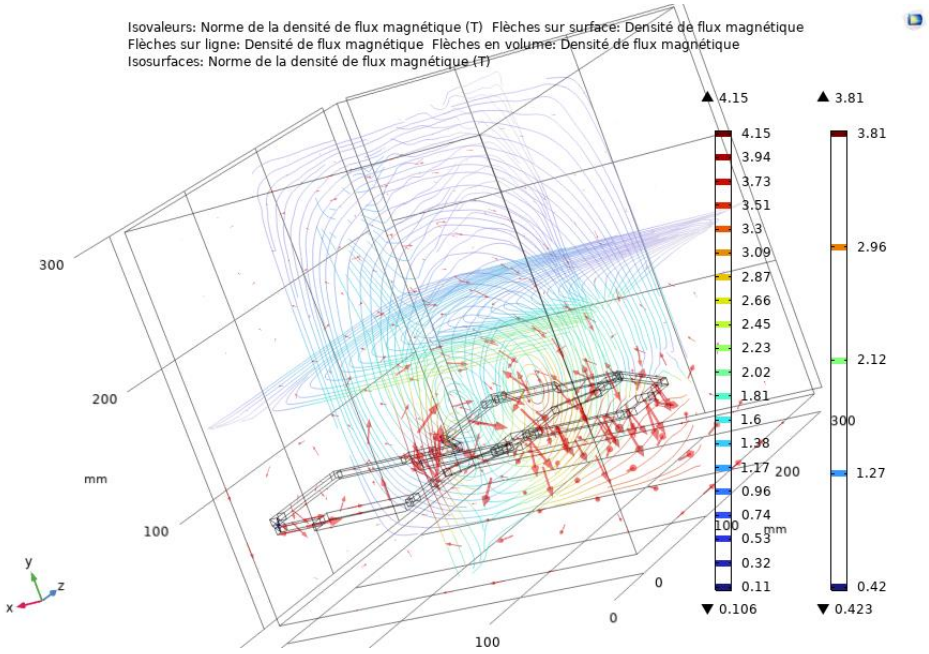


Figure IV. 19. Schéma de Les ligne de flux magnétique.

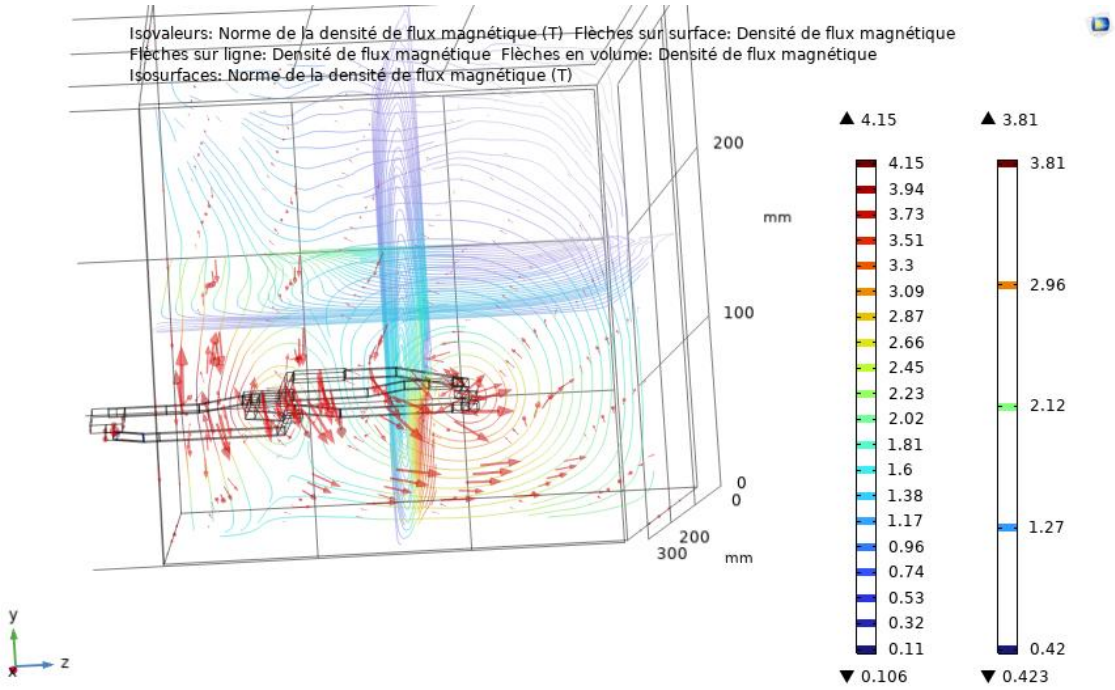


Figure IV. 20. Schéma de Les ligne de champ magnétique.

En examinant ce résultat, nous constatons que plus nous nous approchons vers les nœuds, La valeur de la densité de courant augmente Comme montré dans la figure (IV.21).

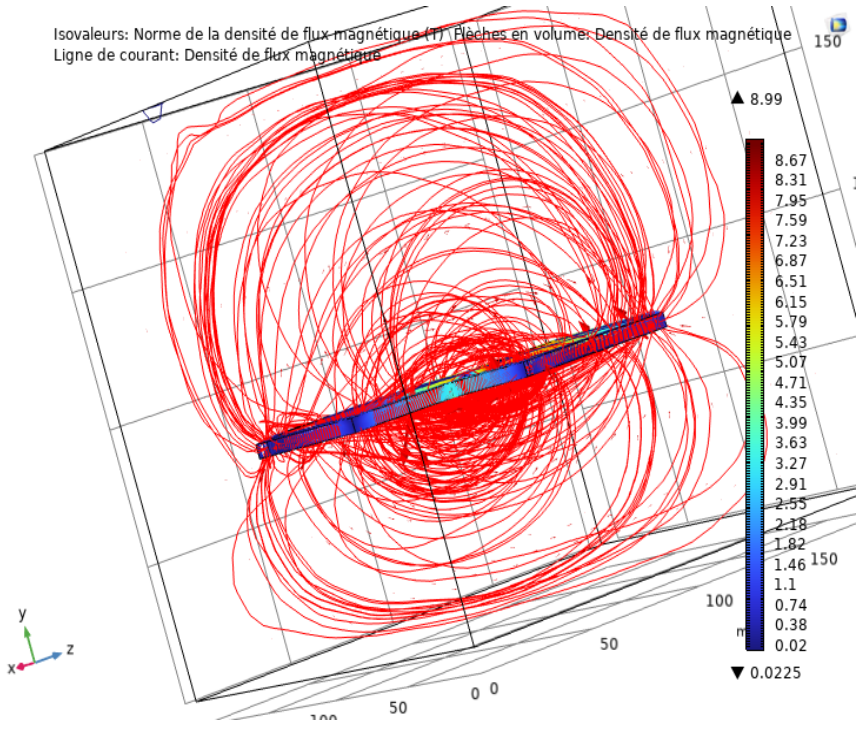


Figure IV. 21. Schéma de la Lignes de champ magnétique.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude approfondie du circuit dans l'application Proteus. Nous avons sélectionné les valeurs des composants électroniques appropriées pour notre application spécifique. En utilisant les outils de modélisation disponibles, nous avons extrait une représentation tridimensionnelle du circuit pour mieux visualiser sa structure. Ensuite, nous avons utilisé l'application COMSOL pour mener une étude plus détaillée de la forme obtenue. Nous avons analysé la distribution du champ magnétique et calculé la valeur de la densité de flux magnétique à différents points du circuit. Cette information est essentielle pour évaluer les performances et les caractéristiques magnétiques du circuit. Enfin, nous avons examiné le nombre de flèches sur la ligne. Ce nombre représente le flux de champ magnétique à travers une ligne donnée. En l'analyse des résultats, il est important de prendre en compte la direction et l'intensité du flux magnétique pour comprendre pleinement le comportement du circuit.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons effectué une étude approfondie du transformateur boost à hacheur en utilisant l'application Proteus. Nous avons ensuite pris le résultat obtenu, qui est une représentation tridimensionnelle de la structure, et l'avons analysé dans l'application Comsol pour obtenir des informations sur les lignes de champ magnétique, la densité de flux magnétique et le nombre de flèches sur les lignes.

L'analyse des lignes de champ magnétique nous a permis de visualiser la distribution du champ magnétique dans le transformateur et de comprendre comment il se propage à travers les différentes parties de l'ouvrage. Nous avons également calculé la norme de la densité de flux magnétique pour évaluer son intensité dans les différentes régions du transformateur.

Le nombre de flèches sur les lignes nous donne des informations sur le flux magnétique et son intensité dans chaque ligne spécifique. Cela nous aide à comprendre comment le flux magnétique se déplace à travers les différentes parties du circuit et à évaluer les performances du transformateur.

En conclusion générale, ce travail nous a permis d'obtenir une vision plus claire de la structure du transformateur boost à hacheur en utilisant des outils de modélisation et de simulation avancés. Nous avons pu étudier la distribution du champ magnétique, la densité de flux magnétique et le flux de champ magnétique à travers les lignes. Ces informations sont essentielles pour évaluer les performances et l'efficacité du transformateur et pour optimiser sa conception et son fonctionnement.

Reference Bibliographie

[1] Mavier, Jérôme. " Convertisseurs génériques à tolérance de panne-Applications pour le domaine aéronautique". Diss. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2007.

[2] MILOUDI, Mohamed. Perturbations électromagnétiques dans les alimentations à découpage. Diss. 2018.

[3] P. Poulichet. " introduction à la compatibilité électromagnétique " une école de la chambre de commerce et d'industrie de Paris , Septembre 2010.

[4] AMIROUCHE Nadia, " La compatibilité électromagnétique en électronique", Mémoire de fin d'étude en Master en Electronique, Université MOULOUD MAMMERI de TIZI OUZOU,2018.

[5] Guy. S. L. Philippe, D. " Électronique de puissance structure, commande, application" (10eme ed). Paris, 2015.

[6] << Electronique Les diodes >> http://www.zpag.net.

[7] Bühler, Hansruedi. " Convertisseurs statiques. PPUR presses polytechniques ", 1991.

[8] Cours Electronique de Puissance, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul Département Génie Electrique.

[9] Guy, Ch. Daniel, B. Michel, B. jacques, V. Daniel, " Manuel de Génie Electrique Rappel des cours" méthodes, exemples et exercices corrigés. Dunod, Paris, 2006.

[10] Pinard, M. "Convertisseurs et électronique de puissance, Commande, Description, Mise en œuvre " Dunod, paris, 2007.

[11] Kanaan, H." Contribution à la modélisation et au réglage des redresseurs triphasés non polluants unidirectionnels de type élévateur et à fréquence de commutation fixe " Doctoral dissertation, École de technologie supérieure, 2002.

[12] REBAOUI Brahim. "Etude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multi niveaux " magister Mohamed Boudiaf, Oran, 2014.

[13] Boukaroura Abdelkader, "modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche bond-graph" magister en électrotechnique université Ferhat abbas de setif, 2008.

[14] Francis weinachter, "Electronique de puissance", Maitrise EEA Tronc commun

Université Henri poincaré, Nancy 1

[15] Claude, C ' Électronique de puissance Principes', 2013.

[16] Abdelghafour Boutar, "Contribution au développement de modèles circuits pour l'étude de couplages électromagnétiques à l'intérieur d'enceintes métalliques", Thèse de doctorat de l'université de Limoges, France, 29 Octobre 2014.

[17] Sofiane Atrous, "Mise en Place d'une Méthodologie de Caractérisation en Immunité Champ Proche de Dispositifs Electroniques", Thèse de Doctorat de l'Université de Rouen, France, 16 Janvier 2009.

[18] Ala Ayed. "Développement de méthodologies pour l'extraction et la construction des macro modelés d'immunité électromagnétique appliqués aux circuits intégrés". Electronique. Université de Bordeaux, Français , 2014.

[19] M. Melit, "Etude des perturbations dans les convertisseurs de l'´electronique de puissance», Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, France ,2008.

[20] BENHADDA Nassireddine, "Analyse des Perturbations Electromagnétiques et Prédiction des Niveaux d'Emissions Conduites Générées par un Convertisseur Statique DC/DC ", Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILALI LIABES DE SIDI BEL-ABBES,2019

[21] Zbigniew Hanzelka and Andrzej Bien, Guide " Power Quality, Section 3: Harmoniques ", AGH University of Science and Technology. Leonardo Eenergy, Edition Août 2007.

[22] Guide technique,"Les Perturbations Electromagnétiques basse et haute fréquence "Intersections, le magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel, Juin 2000.

[23] Alain Charoy " Compatibilité Électromagnétique " 2ieme édition DUNOD, paris, 2005.

[24] BENNI kamel et BOUKREDIMI Kamel, "Analyse spectro-temporelle d'un convertisseur DC/DC de type BUCK " mémoire de master en électromécanique, Centre universitaire d'Aïn Témouchent, septembre 2020.

[25] L. Jean Luc, "Cours de CEM : Les couplages électromagnétiques ". mai-2012.

[26] Philippe Barrade, "Electronique de puissance : méthodologie et convertisseurs

élémentaires " Presse polytechnique et universitaire romande, 2006.

[27] Wei MI, "Extraction des paramètres et domaine de validité du modèle d'un composant

de puissance " Thèse de doctorat,2006.

[28] Eliana Rondon-Pinilla, "Conception de convertisseurs électroniques de puissance à faible impact électromagnétique intégrant de nouvelles technologies d'interrupteurs à semiconducteurs " Thèse de doctorat de l'école centrale de Lyon, France, 18 juin 2014.

[29] Guy Séguier "Électronique de puissance " Paris 1999.

ANNEXE

I. Les lois et les équations de maxwell

Les équations de Maxwell sont un ensemble de quatre équations qui décrivent le comportement des champs électromagnétiques. Ils ont été proposés par le physicien écossais James Clerk Maxwell au 19ème siècle et sont considérés comme l'une des réalisations les plus importantes de la physique théorique.

Les lois de Maxwell décrivent le comportement des champs électromagnétiques et peuvent être utilisées pour calculer les perturbations électromagnétiques dans les systèmes électroniques. Voici les quatre équations de Maxwell :

1)- Loi de Gauss sur l'électricité : cette équation relie le flux de courant à travers une surface à la charge à l'intérieur de cette surface. Il peut s'écrire sous forme intégrale ou différentielle :

Forme intégrale : $\oiint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\zeta_0}$

Forme différentielle : $\Delta \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\zeta_0}$

Avec $\vec{E}$ est le champ électrique, **S** est la surface fermée (surface de Gauss), Q est la charge à l'intérieur de **S**, ε_0 est la permittivité du vide, $\boldsymbol{\rho}$ est la densité de charge et Δ est l'opérateur gradient

2)- Loi de Gauss sur le magnétisme : cette équation indique qu'il n'y a pas de charge magnétique, ce qui signifie qu'il n'y a pas de monopôles magnétiques. Il peut aussi s'écrire sous forme intégrale ou différentielle :

Forme intégrale : $\oiint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$

Forme différentielle : $\Delta \cdot \vec{B} = 0$

Avec B est le champ magnétique et Δ est l'opérateur gradient

3)-Loi de Faraday : Cette équation décrit comment un champ magnétique variant dans le temps induit un champ électrique. Il peut aussi s'écrire sous forme intégrale ou différentielle :

Forme intégrale : $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -{d\Phi}/{dt}$

Forme différentielle : $\Delta \times \vec{E} = -{d\vec{B}}/{dt}$

Avec $\boldsymbol{E}$ est le champ électrique, l est le contour fermé, $\boldsymbol{\Phi}$ est le flux magnétique traversant **S**, t est le temps et Δ est l'opérateur de rotation

4)-Loi d'Ampère-Maxwell : Cette équation décrit comment un courant ou un champ magnétique variant dans le temps induit un champ magnétique. Il peut aussi s'écrire sous forme intégrale ou différentielle :

Forme intégrale : $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i + \zeta_0 \mu_0 \, {}^{d\Phi}/_{dt}$

Forme différentielle : $\Delta \times \vec{B} = \mu_0 j + \zeta_0 \mu_0 \, {}^{d\vec{E}}\Big/_{dt}$

Avec $\vec{B}$ est le champ magnétique, l'est le contour fermé, $\boldsymbol{\mu_0}$ est la perméabilité du vide, *i* est le courant électrique à travers *S*, *j* est la densité de courant électrique, ζ_0 est la permittivité du vide, Φ est le flux magnétique à travers S.