

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
Et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

## **Mémoire de Magister**

Spécialité : **Electrotechnique**  
Option : **Machines Electriques**

Présenté par :

KIRECHE Nora

Thème

**Comportement Electromagnétique de l'Alimentation  
d'une Machine Asynchrone avec Défaut**

Présenté le .. /.. /.... devant le jury suivant:

|             |                |                           |
|-------------|----------------|---------------------------|
| Président:  | Mr IBTIOUEN R. | Professeur ENP            |
| Directeur:  | Mr TOUHAMI O.  | Professeur ENP            |
|             | Mr TAHMI R.    | Maitre de conférences ENP |
| Examineurs: | Mr MEKHALDI A. | Professeur ENP            |
|             | Mr MEKHTOUB S. | Maitre de conférences ENP |

ENP 2007

## *Remerciements*

*J'adresse en premier lieu mes remerciements aux personnes qui ont accepté de faire partie du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.*

*Je remercie mon promoteur monsieur Redouane TAHMI et mon co-promoteur monsieur Omar TOUHAMI pour leur soutien moral, leurs conseils et encouragements qu'ils m'ont prodigué le long de ce travail.*

*Je souhaite aussi remercier monsieur Rachid IBTIOUENE pour ses conseils.*

*Mes remerciements sont aussi à tous mes enseignants, sans oublier mes amis et mes collègues.*

*Si j'en suis ici aujourd'hui, c'est grâce au soutien et aux encouragements de mes parents, j'exprime mes plus vifs remerciements*

# SOMMAIRE

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

## Chapitre I : La Compatibilité Electromagnétique

|   |    |
|---|----|
| Introduction .....  | 3  |
| I-1-les sources de perturbations .....                          | 4  |
| I-2- Les moyens de propagations.....                            | 4  |
| I-2-1- Les perturbations conduites.....                         | 4  |
| I-2-2- Perturbation rayonnée .....                              | 5  |
| I-3- Les couplages .....  | 6  |
| I-3-1- Couplage par impédance commune.....                      | 6  |
| I-3-2- Couplage capacitif “carte à châssis ”.....               | 6  |
| I-3-3- Couplage par diaphonie inductive .....                   | 7  |
| I-3-4- Couplage par diaphonie capacitive.....                   | 8  |
| I-3-5- Couplage champ à câble .....                             | 9  |
| I-3-6- Couplage champ à boucle .....                            | 10 |
| I-4 – Normes et réglementation.....                             | 11 |
| a- Normes de produits-perturbations conduites et rayonnées..... | 12 |
| b- Normes génériques.....                                       | 13 |
| I-5- Méthodes et moyens de mesure en CEM.....                   | 13 |
| I-5-1- Test d’émission.....                                     | 13 |
| I-5-1-a- Test d’émission en mode conduit.....                   | 14 |
| I-5-2- Test d’immunité.....                                     | 14 |
| I-5-2-a- Test d’immunité en mode conduit.....                   | 14 |
| I-5-2-b- Test d’immunité en mode rayonné .....                  | 15 |
| I-6- Conclusion.....  | 15 |

## Chapitre II :Dimensionnement de l’onduleur

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 17 |
| II-1- Dimensionnement du convertisseur statique.....                     | 17 |
| II-1-1-Description de l’alimentation.....                                | 17 |
| II-1-2-Dimensionnement du redresseur.....                                | 18 |
| II-2- Dimensionnement du filtre .....                                    | 19 |
| II-2-1-Calcul des paramètres du filtre.....                              | 19 |
| II-2-1-a-Harmoniques du courant d’entrée et de la tension de sortie..... | 19 |
| II-2-1-b-Application à l’onduleur triphasé en pont.....                  | 20 |
| II-3- Dimensionnement de l’onduleur de tension.....                      | 22 |
| II-3-1-Propriété de la modulation triangulo-sinusoidale .....            | 22 |
| II-3-2-Caractéristiques.....   | 23 |
| II-3-2-1-Calcul des tensions.....  | 23 |
| II-3-2-1-a-Tension simple $v_{a0}$ .....                                 | 23 |
| II-3-2-1-b-Tensions composées.....                                       | 24 |
| II-3-2-2- Calcul des courants.....                                       | 24 |
| II-3-2-2-a- Les courants dans les interrupteurs $k_i$ .....              | 24 |
| II-3-2-2-b-Courant dans le semi-conducteur contrôlé .....                | 24 |
| II-3-2-2-c- Courant dans la diode.....                                   | 25 |
| II-4-Présentation du logiciel.....                                       | 25 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| II-5- Conclusion..... | 25 |
|-----------------------|----|

### **Chapitre III : Dimensionnement CEM de l'onduleur.**

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 27 |
| III-1-Localisation des sources de perturbations de l'onduleur.....      | 27 |
| III-2-Couplages capacitifs dus aux transistors .....                    | 28 |
| III-3- Etudes des variations des dv/dt en sortie de l'onduleur.....     | 28 |
| III-4-Fonctionnement de l'onduleur à commande par MLI intersective..... | 29 |
| III-4-1-Principe.....   | 30 |
| III-4-2- Débit sur charge RL.....                                       | 30 |
| III-4-2-1- Influence des capacités parasites des transistors.....       | 32 |
| III-4-2-1-a-Simulation temporelle.....                                  | 33 |
| III-4-2-1-b- Etude spectrale des signaux .....                          | 34 |
| III-5-Conclusion .....  | 36 |

### **Chapitre IV : Alimentation d'une machine asynchrone saine.**

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 38 |
| IV-1- Modélisation du câble d'alimentation.....  | 38 |
| IV-1-1- Modèle à constantes réparties.....   | 38 |
| IV-1-2- Modèle à constantes localisées .....   | 40 |
| IV-2- Modélisation de la machine asynchrone.....   | 43 |
| IV-2-1- Etude de l'évolution de l'impédance d'une phase en fonction de la.....           | 43 |
| fréquence  |    |
| IV-3 : Etude spectrale.....  | 44 |
| IV-3-1 : Spectres de fréquences après l'ajout des capacités parasites de l'onduleur...44 |    |
| IV-3-2 : Spectres de fréquences après l'ajout des capacités parasites.....47             |    |
| de l'onduleur et de l'impédance du câble avec ses capacités parasites                    |    |
| IV-3-3 : Spectres de fréquences après l'ajout des capacités parasites.....51             |    |
| de l'onduleur, de l'impédance du câble avec ses capacités parasites ainsi les            |    |
| capacités parasitesde la machine asynchrone  |    |
| IV-3-4 : Spectres de fréquences après l'ajout des capacités parasites.....54             |    |
| de l'onduleur, de l'impédance du câble avec ses capacités parasites, ainsi               |    |
| que les capacités parasites et les résistances de fuites de la machine                   |    |
| asynchrone   |    |
| IV-4 : Conclusion .....  | 59 |

### **Chapitre V : Alimentation d'une machine asynchrone avec défaut**

|  |           |
|--|-----------|
| Introduction .....                         | 61        |
| V-1- Modèle de la machine asynchrone.....  | 61        |
| V-2-Transformation de Park .....           | 62        |
| V-3-Introduction du défaut statorique..... | 63        |
| V-3-1-Simulation temporelle.....           | 63        |
| V-3-2- Etude spectrale.....                | 64        |
| V-4- Conclusion .....                      | 68        |
| <b>Conclusion générale .....</b>           | <b>69</b> |

## Introduction générale

Le programme d'étude des systèmes de conversion de l'énergie électrique concerne essentiellement la production, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. L'accent étant mis sur la sécurité et les protections, soucis permanents de l'électrotechnicien, d'où vient l'intérêt de la CEM (Compatibilité Electromagnétique). Elle se définit comme étant la capacité d'un appareil ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante dans un environnement électromagnétique.

Actuellement les dispositifs assurant la variation de la vitesse des machines asynchrones sont constitués d'onduleurs de tensions triphasés. Ces dispositifs constituent des systèmes complexes fortement perturbateurs pour l'environnement électromagnétique, tant en mode conduit que rayonné. Ainsi les entreprises spécialisées dans la conception des convertisseurs statiques sont confrontées aux exigences de prévisions des perturbations électromagnétiques au cours de la phase d'élaboration du produit.

Le filtrage est la technique la plus favorable pour maîtriser les perturbations électromagnétiques conduites. L'étude de ces dernières, ayant pour origine les commutations des interrupteurs, et l'influence des éléments de la structure sur elles, font l'objet de notre travail.

Les perturbations conduites sont présentes dans la plupart des montages constitués de composants électriques et/ou électroniques. L'alimentation d'une machine asynchrone saine et avec défaut constituent deux cas critiques pour l'étude de ces phénomènes.

Ainsi, afin de mener à bien notre activité, nous l'avons organisé comme suit :

- . Dans le chapitre I, nous présentons un travail préliminaire qui consiste à vulgariser la CEM.
- . Nous consacrons le deuxième chapitre au dimensionnement de l'alimentation de la machine. Ainsi, nous proposons une étude d'un redresseur puis d'un filtre, avant d'étudier un onduleur triphasé de tension à transistors de puissance (MOS) avec une modulation sinus-triangle.
- . Le dimensionnement CEM de l'onduleur fait l'objet du chapitre III.
- . Le chapitre IV est consacré à l'alimentation d'une machine asynchrone. Nous nous sommes intéressés à la modélisation de la chaîne formée par l'association de l'onduleur, le câble d'alimentation et la machine asynchrone sans défaut.
- . Enfin au dernier chapitre, chapitre V, nous exposons les différents résultats de l'association de l'onduleur, câble d'alimentation et de la machine asynchrone avec défaut statorique.

# **Chapitre I**

## **La Compatibilité Electromagnétique**

## Introduction

L'évolution sans cesse des technologies a eu pour conséquence une grande sensibilité des circuits électriques et/ou électroniques, cette dernière entraîne une perturbation électromagnétique, un phénomène susceptible de dégrader la performance d'un système ou équipement.

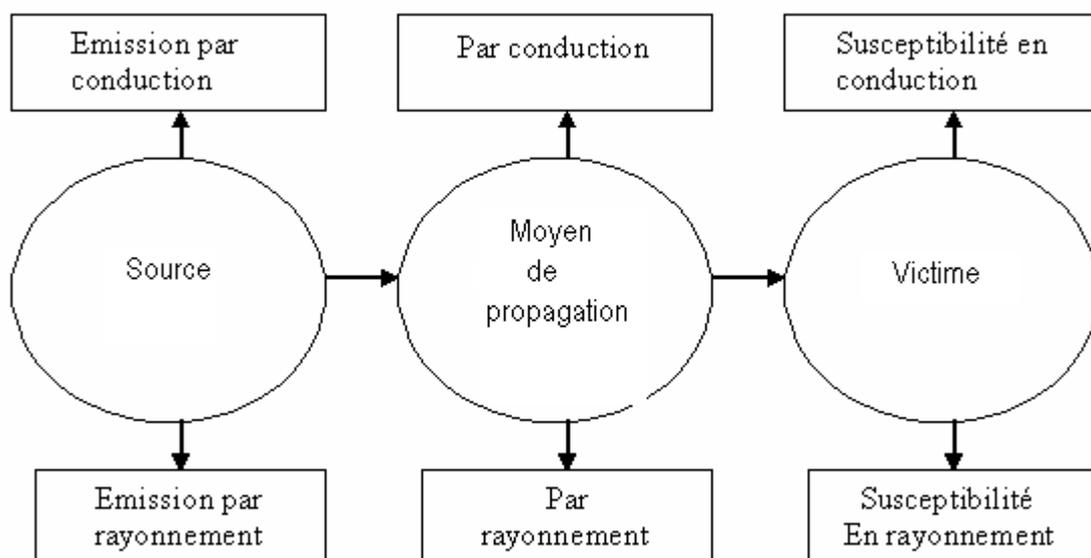
Toute émission électromagnétique, naturelle ou produite par l'être humain est potentiellement source de perturbations pour tout équipement sensible. Elle peut créer un dysfonctionnement, ou pire, le mettre en panne.

Deux problématiques organisent toute réflexion autour de la CEM apparue au début des années 1900 :

- limiter les émissions des équipements sources,
- immuniser correctement les équipements face à ces perturbations auxquelles leur environnement les expose.

'Emission et Susceptibilité' représentent donc deux mots clés de la CEM. Si l'émission représente l'aptitude d'un appareil à transmettre des signaux perturbateurs à son entourage, la susceptibilité concerne la capacité de ce même dispositif à être perturbé par l'extérieur. Le couplage de ces deux phénomènes entraîne une troisième définition : l'« auto-perturbation », autrement dit, la possibilité d'un système de se perturber lui-même. Ces termes génériques permettent d'introduire les trois notions de bases de l'analyse CEM des dispositifs électriques : les sources, les chemins et les victimes.

En effet les générateurs de perturbations ou sources vont, par l'intermédiaire de chemins de propagation, agir sur une victime.



**Figure I-1 :** Composantes de la compatibilité électromagnétique.

Pour améliorer les niveaux des perturbations, il faut réduire le niveau d'émission, interrompre le chemin de propagation ou protéger le récepteur de façon à l'immuniser contre toute émission.

## I-1-les sources de perturbations

Une perturbation électromagnétique peut être une tension électrique, un courant électrique ou un champ électromagnétique, susceptibles de perturber le fonctionnement d'un système électrique et/ou électronique [1].

Les sources perturbatrices sont nombreuses, elles sont d'origines naturelles ou artificielles,

\*les perturbations naturelles : sont essentiellement dues aux orages et la foudre.

\*les perturbations artificielles : sont dues aux activités industrielles de l'être humain tels que les émissions d'émetteurs divers, les harmoniques ...

Le tableau I-1 nous montre les principaux phénomènes causant les perturbations électromagnétiques [2].

|  |   |
|--|---|
| Perturbations conduites basse fréquence                | -Harmoniques, interharmoniques<br>-Fluctuations de tension<br>-Les creux de tension et microcoupures<br>-Les flickers<br>-Les variations de fréquence |
| Perturbations rayonnées basse fréquence                | -Le champ magnétique<br>-Le champ électrique  |
| Perturbations conduites haute fréquence                | -Courant et tension induits<br>-Oscillations transitoires   |
| Perturbations rayonnées haute fréquence                | -Le champ magnétique<br>-Le champ électrique  |
| Décharges électrostatiques                             | /   |
| Impulsion électromagnétique d'origine nucléaire (IEMN) | /   |

**Tableau I-1 :** Les principaux phénomènes causants les perturbations électromagnétiques.

## I-2- Les moyens de propagations

Les chemins ou moyens de propagation sont multiples. Suivant la distance séparant la victime de la source et la présence ou l'absence d'une liaison galvanique entre les deux modes :

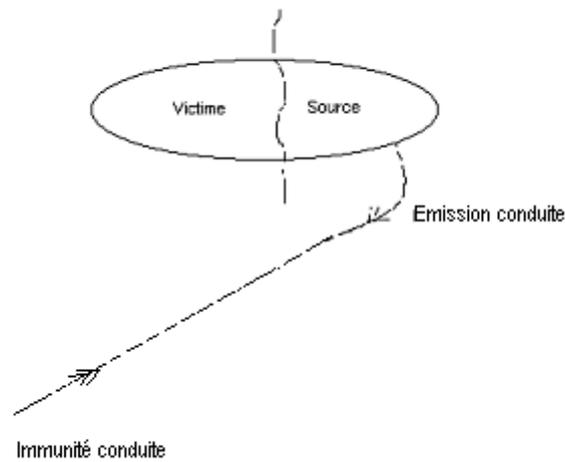
-mode conduit : si la source et la victime sont proches l'une de l'autre et liées galvaniquement.

- mode rayonnée, si la source et la victime n'ont aucune liaison galvanique.

### I-2-1- Perturbation conduite

Selon que leur fréquence soit inférieure ou supérieure à 1Mhz, les perturbations conduites peuvent être des perturbations basse fréquence ou haute fréquence. Elles peuvent être permanentes ou transitoires, en mode commun ou en mode différentiel. Leur voie de

propagation est une voie filaire comme la montre la figure (I-2) dont laquelle le circuit représente la source et/ou la victime.



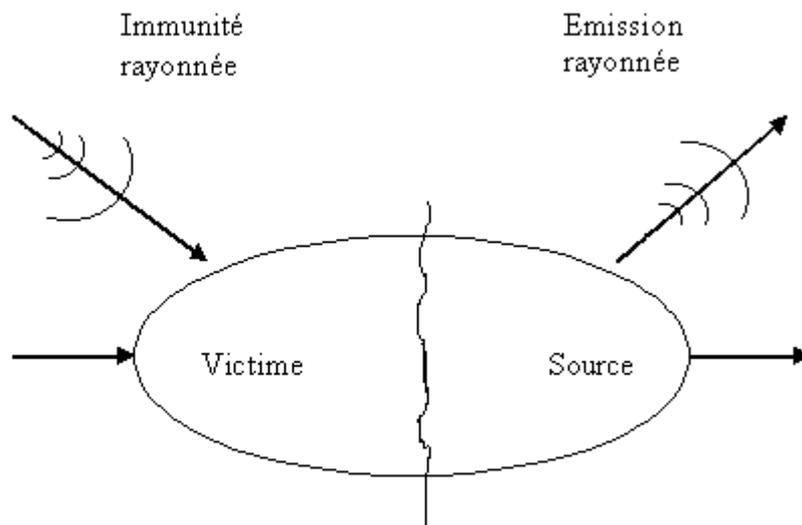
**Figure I-2 :** Schéma d'un système soumis à des perturbations conduites.

Parfois, du fait de leur longueur, les conducteurs parcourus par des perturbations conduites (courants parasites), se comportent comme des antennes et peuvent ainsi rayonner des champs électriques dans leur environnement [3].

### **I-2-2- Perturbation rayonnée**

Contrairement aux perturbations conduites qui se manifestent sous forme de gradients de tension  $dv/dt$  et de courant  $di/dt$ , les perturbations rayonnées, sont des gradients de champ magnétique  $dH/dt$  et électrique  $dE/dt$ . Elles se propagent par voie hertzienne et donc rayonnées dans l'espace sous forme de champ magnétique et de champ électrique.

A son tour, une perturbation rayonnée peut être à basse ou à haute fréquence, permanente ou transitoire.



**Figure I-3 :** Schéma d'un système soumis à des perturbations rayonnées.

### I-3- Les couplages

La notion de couplage détermine le mode d'action d'une perturbation électromagnétique sur un circuit victime. On distingue 6 types de couplages :

- couplage par impédance commune,
- couplage capacitif "carte à châssis",
- couplage par diaphonie inductive,
- couplage par diaphonie capacitive,
- couplage champ à fil,
- couplage champ à boucle.

#### I-3-1- Couplage par impédance commune

C'est l'effet d'un courant  $I$  circulant dans un conducteur ayant pour impédance  $Z$ .

Le couplage par impédance commune est décrit par la loi d'Ohm :

$$U = ZI \quad (I-1).$$

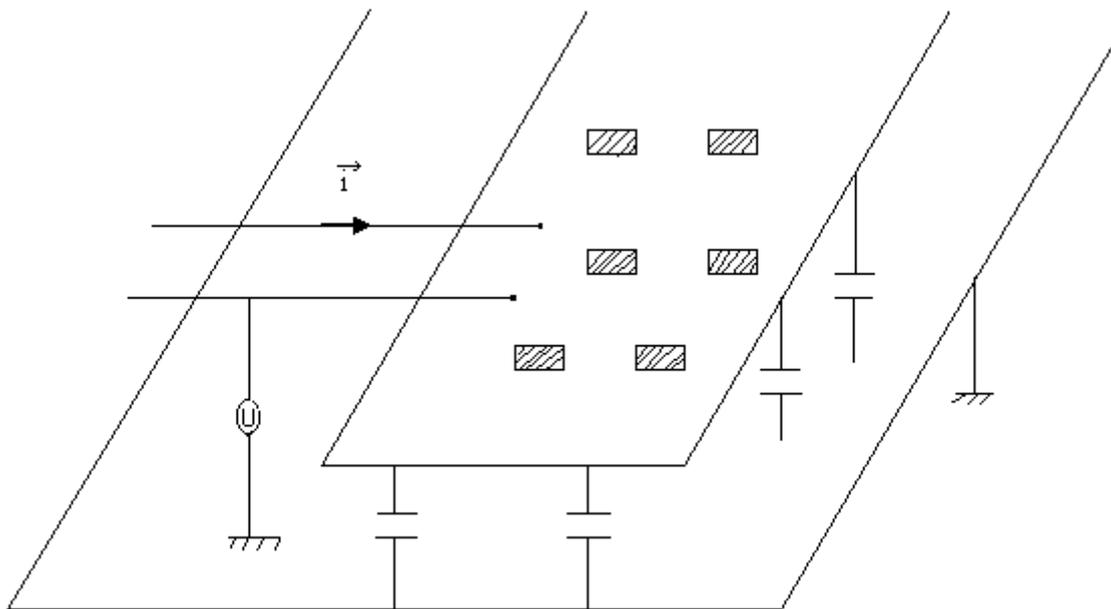
Le résultat fâcheux qu'une telle situation peut produire est surtout pour les hautes fréquences où l'impédance devient inductive contrairement aux basses fréquences.

Pour réduire et/ou éliminer les couplages par impédance commune, il faut soit diminuer la valeur de l'impédance commune, soit réduire le courant qui la traverse, soit utiliser les deux moyens à la fois [3].

#### I-3-2- Couplage capacitif "carte à châssis "

Pour une carte isolée (carte électronique dont le "0V" n'est pas relié à la masse du système auquel elle appartient ou au châssis), chaque piste peut former avec le plan de masse ou le châssis, une capacité parasite par laquelle peut circuler un courant de fuite. Ainsi quand une perturbation de mode commun arrive, le courant perturbateur ne se referme pas par la masse mais se propage de sorte qu'il parasite tous les éléments se trouvant sur la carte (il choisit le chemin le moins impédant).

On peut conclure donc qu'une carte électronique craint à la fois les courants de mode commun trop importants, qui induiraient un couplage par impédance commune, et les forts gradients de d.d.p. entre la carte et son environnement.



**Figure I-4 :** Couplage carte à châssis.

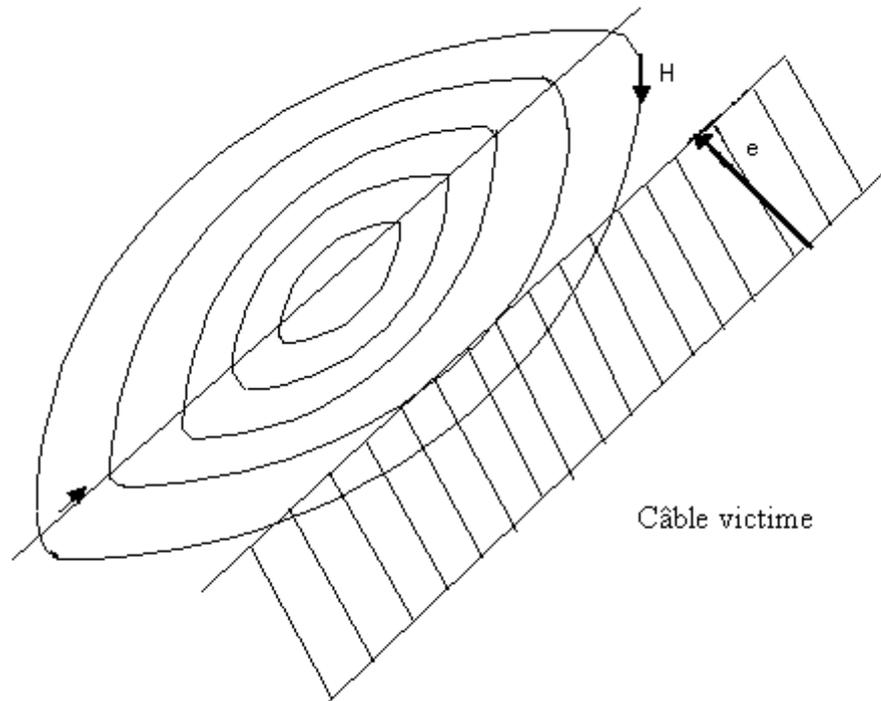
Réduire le couplage revient à diminuer les capacités parasites ou réduire les variations brutales de différence de potentiel  $du/dt$  (par exemple fronts d'horloge) entre la carte et la masse.

Autre solution, efficace mais pas toujours possible, consiste à raccorder de façon équipotentielle la référence de potentiel (0V) de la carte au châssis [3].

### I-3-3- Couplage par diaphonie inductive

Appelé aussi couplage magnétique, il a pour origine une variation de courant.

Ainsi une variation de courant dans un conducteur génère un champ magnétique (H) variable [4]. Ce champ va créer une force électromotrice qui développera une tension perturbatrice (e) dans une boucle victime de surface (s).



**Figure I-5 :** Couplage par diaphonie inductive.

$$e = \mu_0 s \frac{dH}{dt} \quad (\text{I-2}).$$

La diaphonie inductive peut être de mode commun ou différentiel.

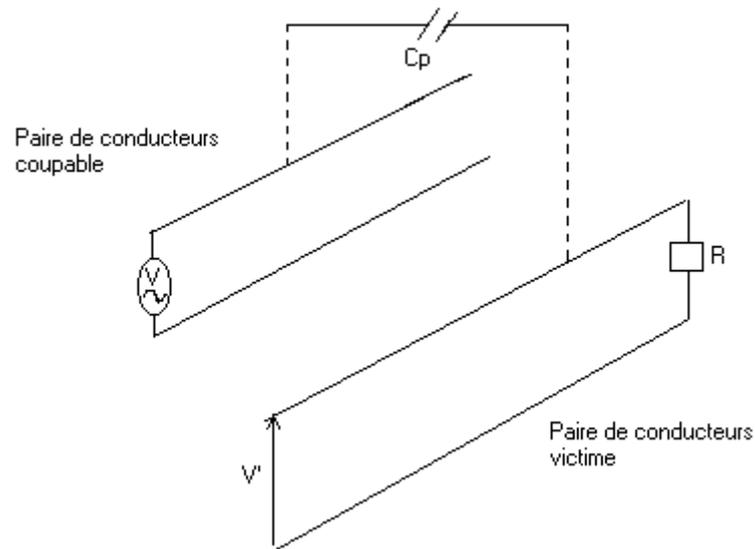
Il existe plusieurs remèdes pour réduire ce couplage dont les plus connus sont :

- réduction de la surface de câblage,
- torsadage des câbles,
- éloignement source/victime,
- blindage des câbles victimes,
- filtrage ou ajout des tores de ferrite sur les câbles sensibles.

#### **I-3-4- Couplage par diaphonie capacitive**

Une variation brusque de tension  $U$  entre un fil et un plan de masse ou entre deux fils conducteurs (figure I-6), génère un champ électrique. Ce champ induira un courant «  $i$  » sur le conducteur voisin par effet capacitif et donc une tension  $U'$  sur le câble victime comme le montre la figure (I-6).

La diaphonie capacitive existe en mode commun où le courant se propage en phase sur tous les conducteurs et se reboucle par les circuits de masse via les capacités parasites, et en mode différentiel où le courant se propage sur l'un des conducteurs, traverse l'appareil victime en le polluant et revient par l'autre conducteur en sens inverse.



$C_p$  = capacité parasite

**FigureI-6** : Diaphonie capacitive.

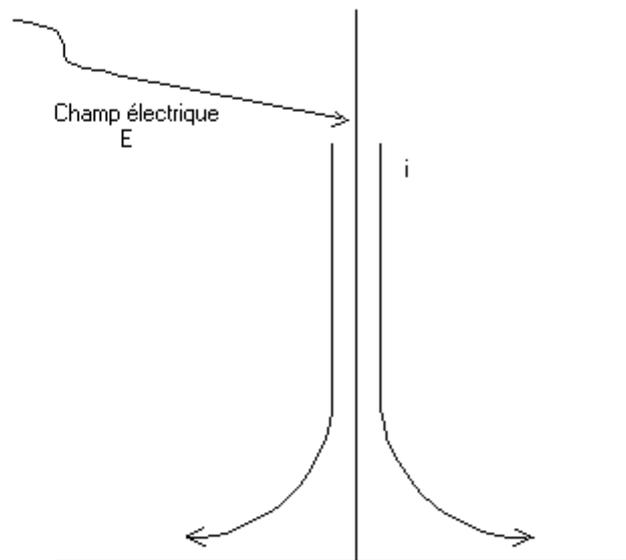
#### Remèdes :

Pour réduire ce couplage, on peut :

- 1- utiliser un écran conducteur ou bien blinder la paire de conducteurs coupable ou la victime ou les deux, en cas de mode différentiel,
- 2- diminuer la capacité entre les circuits coupable et victime et/ou limiter les gradients de tension du circuit coupable, dans le cas de la diaphonie en mode commun.

#### **I-3-5- Couplage champ à câble**

Lorsque le conducteur est soumis à un champ électrique variable  $E$ , un courant est induit sur ce conducteur, c'est le courant parasite «  $i$  » qui parcourt ce dernier comme le montre la figure (I-7).



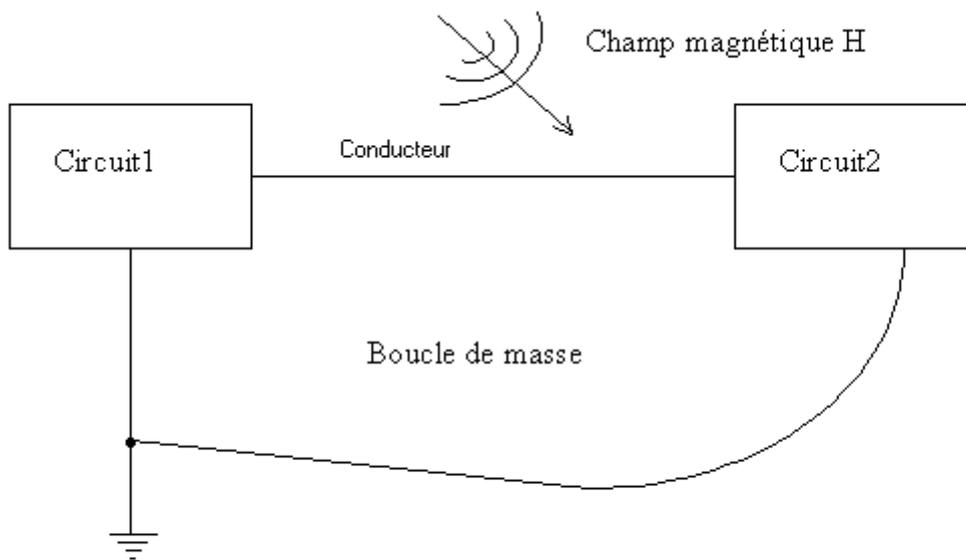
**Figure I-7** : Couplage champ à câble.

Remède : [4]

- éloignement source/victime,
- plaquer les câbles victimes près des structures métalliques (chemins de câble, conduit métallique...) évitant les phénomènes d'antenne,
- ajouter des câbles d'accompagnement de masse,
- blinder les câbles victimes en joignant le raccordement à la masse des deux côtés,
- filtrage haute fréquence ou ferrites sur le câble victime.

### **I-3-6- Couplage champ à boucle**

Quant un champ magnétique variable traverse une boucle, il induit une force électromotrice parasite, on parle alors de couplage champ à boucle.



**Figure I-8 :** Couplage champ à boucle.

Pour remédier à ce problème, il faut limiter la surface de la boucle victime en réduisant la longueur des câbles et/ou réduire le champ magnétique coupable.

## I-4 – Normes et réglementation

La CEM ou compatibilité électromagnétique, est le pouvoir d'un appareil, équipement ou système à fonctionner avec satisfaction dans un environnement électromagnétique sans introduire des perturbations intolérables à quoi que ce soit dans cet environnement [5].

“*Un équipement ne doit pas perturber le fonctionnement des autres dispositifs électroniques et il ne doit pas être perturbé par ces derniers*”, cette expression répandue dans le langage industriel a pour conséquence la naissance d'une expression d'un grand intérêt “La normalisation dans le domaine de la CEM” apparue dans les années 30, avec la création du Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR), sous-comité de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI).

Le comité Européen de Normalisation en Electrotechnique (CENELEC), est chargé d'élaborer les directives de normalisation en Europe, en donnant des références de normes harmonisées entre les pays de la CEE.

Une directive a été établie le 03-05-1989. Il s'agit de la directive 89/336/CEE. Le champ d'application de cette directive concerne tous les appareils électriques et électroniques ainsi que les équipements et installations qui contiennent des composants électriques ou électroniques.

A partir du 1 janvier 1996, tous les équipements matériels électriques et électroniques mis sur le marché de l'Union Européenne doivent être conformes à la directive Européenne en matière de perturbations électromagnétiques, ce qui signifie qu'«*un équipement ne perturbe*

*pas le fonctionnement des autres dispositifs électroniques et n'est pas perturbé par eux* ». Le marquage "CE" apposé sur tous les produits électriques et électroniques, après différents tests effectués par les laboratoires accrédités, constitue la preuve de la conformité de ces produits.

La directive Européenne oblige les constructeurs de tout produit (appareils électriques et électroniques) à répondre à ces exigences c-à-d :

- ne pas provoquer des dysfonctionnements périphériques,
- avoir un niveau minimum d'immunité.

Les niveaux d'émission et d'immunité sont fixés par une série de normes correspondantes.

Se basant sur les recommandations du CISPR et du CENELEC, chaque pays décrète ses propres réglementations en la matière et en confie l'élaboration et la mise en application à ses propres organismes de normalisation [1].

- Suisse : Association électrotechnique Suisse, SEV,
- Allemagne : Association Allemande des Electrotechniques, FTZ/VDE,
- USA : Commission fédérale des communications, FCC,
- France : Association Française de Normalisation, AFNOR.

Tout produit vendu en Europe doit être accompagné d'une notice, dont l'application respecté est donnée par le tableau (I-2). [1]

| Directive de l'Union Européenne   | Marque CE  |
|---|--|
| Directive "Basse tension", directive pour les produits de construction.                   | Sur le produit, sur l'emballage ou sur les documents joints :<br>mode d'emploi, bon de garantie, prospectus.                                     |
| Directive de CEM  | Sur le produit et, lorsque cela n'est pas possible, sur l'emballage ou sur les documents joints :<br>mode d'emploi, bon de garantie, prospectus. |
| Directive sur les machines, directive sur les équipements terminaux de télécommunication. | Directement sur le produit uniquement.   |
| Directive "Basse tension" et directive de CEM.  | Sur le produit et, lorsque cela n'est pas possible, sur l'emballage ou sur les documents joints :<br>mode d'emploi, bon de garantie, prospectus. |

**Tableau I-2** : Apposition du marquage CE d'après les directives de l'Union Européenne.

\*- **Les principales normes Européennes** [3]

\*-a- **Normes de produits-perturbations conduites et rayonnées**

- EN55011 - Appareils industriels, scientifiques et médicaux.
- EN55013 - Récepteurs de radiodiffusion sonore, télévisions, appareils associés.
- EN55014 – Appareils électrodomestiques.
- EN55015 – Appareils électriques d'éclairage.
- EN55022 – Appareils de traitement de l'information.

**\*-b- Normes génériques****\*-b-1- Environnement résidentiel et commercial**

- EN50081-50081-Perturbations conduites et rayonnées.
- EN50082-1-Immunité.

**\*-b-2- Environnement industriel**

- EN50081-2-Perturbations conduites et rayonnées.
- EN50082-2-Immunité.

**\*-c- Immunité**

- EN61000-4-2- aux décharges électrostatiques.
- EN61000-4-3- aux rayonnements.
- EN61000-4-4- aux transitoires rapides.
- EN61000-4-5- aux ondes de choc.
- EN61000-4-6- aux champs radioélectriques.
- EN61000-4-8/9/10- aux champs radioélectriques.
- EN61000-4-11- aux creux de tension.

**\*-d- Perturbations**

- EN61000-3-2- Emissions de courants harmoniques pour courant appelé < 16A.
- EN61000-3-3- Fluctuation de tension et flicker pour courant appelé < 16A.
- EN61000-3-5- Fluctuation de tension et flicker pour courant appelé < 16A.
- Laboratoire d'essais CEM.

**I-5- Méthodes et moyens de mesure en CEM**

Les perturbations électromagnétiques existent en mode conduit (dans les câbles ou les pistes d'un circuit imprimé). Elles se propagent par le biais de couplage : un câble peut rayonner un champ électromagnétique et inversement un champ peut induire un courant parasite sur un conducteur.

Mesurer ces perturbations revient à sélectionner le signal à mesurer parmi tous les signaux qui accompagnent ce dernier lors de la mesure, chose qui n'est pas facile surtout dans le cas des perturbations rayonnais.

Afin de mesurer les perturbations électromagnétiques, on dispose de deux catégories de tests :

- test d'émission,
- test d'immunité.

**I-5-1- Test d'émission**

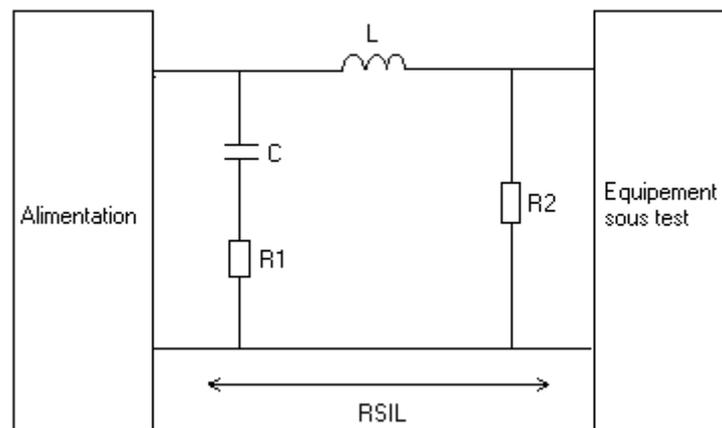
Selon la distance de protection , on définit deux classes :

- classe A : distance de protection de 30m,
- classe B : distance de protection de 10m (matériel de grande diffusion).

On distingue deux types de tests d'émission : le test d'émission en mode commun et le test d'émission en mode rayonné.

### I-5-1-a- Test d'émission en mode conduit

Pour pouvoir mesurer ce genre de perturbation, il faut d'abord sélectionner le signal à mesurer parmi tous les autres signaux qui l'accompagnent lors de cette mesure. En d'autres termes, il faut filtrer les perturbations qui pourraient provenir du réseau ou ailleurs afin de ne pas fausser la mesure. Pour cela on utilise un Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne (RSIL) qui en plus du filtrage qu'il assure, alimente l'équipement sous test à travers son impédance parfaitement définie.



**Figure I-8 :** Insertion du RSIL.

Avec :

R1, R2 : résistances du RSIL,

C : capacité du RSIL,

L : inductance du RSIL.

Le site de test est une cage de Faraday ou, ce qui est meilleur, une chambre anéchoïque.

### I-5-2- Test d'immunité

Comme pour les tests d'émission, il existe deux types de tests d'immunité : test d'immunité en mode conduit et le test d'immunité en mode rayonné.

Le principe de ces tests est de plonger l'appareil dans un environnement électromagnétique créé par un système d'émission d'ondes radioélectriques externes, le site est un site confiné.

#### I-5-2-a- Test d'immunité en mode conduit

On peut rencontrer deux types d'essais :

-essai à haute énergie, dans le cas d'une perturbation représenté par des ondes oscillatoires amorties.

-essai à haute fréquence peu énergétique qui n'est appliqué qu'en mode commun, dans le cas d'une perturbation représenté par des salves d'impulsions transitoires rapides.

### **I-5-2-b- Test d'immunité en mode rayonné**

Ces mesures s'effectuent pour connaître le degré d'aptitude d'un équipement à tester aux différentes agressions des perturbations rayonnées. Lors de ces essais, une source puissante peut être exigée, d'où la nécessité de les réaliser dans une enceinte blindée ou une chambre anéchoïque.

## **I-6- Conclusion**

Les dysfonctionnements divers et variés du matériel électronique et/ou électrique, sont des faits que tous les utilisateurs n'aiment pas voir survenir.

Déterminer les causes de ces dysfonctionnements revient à s'intéresser à un domaine particulier de compétences qui est celui de la compatibilité électromagnétique définie par le comité 77 de la CEI comme étant l' *“Aptitude d'un appareil, équipement ou système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement”*.

Le rôle de la compatibilité électromagnétique devient de plus en plus important, c'est pour cette raison qu'il faut toujours penser CEM lors de la conception de tout système ou appareil électrique et/ou électronique et essayer de régler ce genre de problèmes lors de la conception même du produit, et donc prévenir ces problèmes au lieu de les éliminer après la conception du produit, ce qui aide à la baisse du prix de ce dernier.

Prédire et prévenir les problèmes de la compatibilité électromagnétique nécessite des connaissances spécialisées et donc des ingénieurs électriciens qualifiés en CEM.

Assurer la compatibilité électromagnétique entre équipements revient à limiter au maximum les phénomènes perturbateurs à la source et à doter la victime d'un degré d'immunité raisonnable, par construction et en prenant des précautions convenables pour son installation.

Pour qu'un produit soit commercialisable et puisse circuler librement de par le monde, il est primordial que les industriels respectent les normes et les réglementations de la compatibilité électromagnétique.

# **Chapitre II**

## **Dimensionnement de l'alimentation**

## Introduction

Les progrès technologiques incessants dans le domaine des dispositifs semi-conducteurs, particulièrement les différents types de transistors, ont entraînés le développement des interrupteurs statiques de grandes puissances et présentant des temps de commutation très réduits.

L'onduleur commandé en modulation de largeur des impulsions est le plus utilisé actuellement, il nous permet d'obtenir par découpage de la tension  $u$  ou du courant  $i$  donné à l'entrée, un système triphasé d'amplitude et de fréquence variables.

Suivant le choix des instants de commutation des interrupteurs (transistors), il apparaît un nombre important de stratégies différentes reposant le plus souvent sur un compromis entre :

- Un spectre d'harmoniques minimal,
- une plage de variation de l'amplitude de sortie maximale,
- une facilité d'implantation et de mise au point,
- un coût abordable,
- une facilité de réglage de l'amplitude et de la fréquence des ondes de sortie.

Nous proposons de faire l'étude d'un redresseur puis d'un filtre avant d'étudier un onduleur triphasé de tension à transistors de puissance (MOS), avec une modulation sinus-triangle.

## II-1- Dimensionnement du convertisseur statique

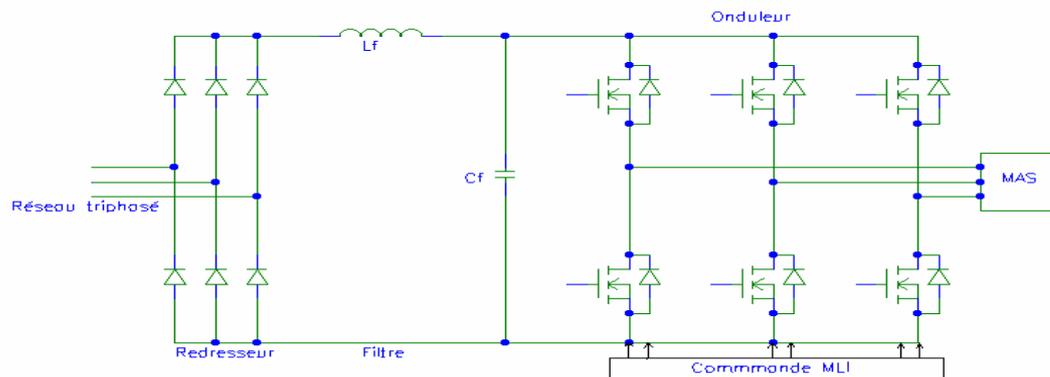
Les importantes mutations qu'a connu le domaine d'application des machines électriques sont surtout dues au développement de nouvelles structures de conversion électromagnétique associant machines et convertisseurs statiques.

La machine utilisée dans notre cas est alimentée par des tensions parfaitement sinusoïdales où la fréquence des tensions et des courants d'alimentation est délivrée par une association redresseur -filtre - onduleur de tension.

### II-1-1-Description de l'alimentation

L'alimentation de la machine asynchrone est constitué de :

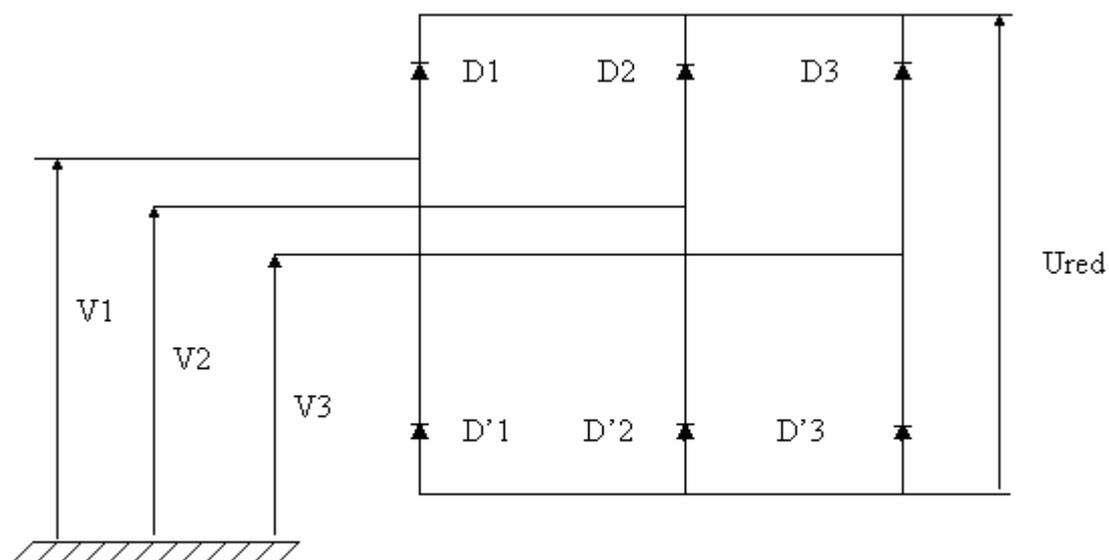
- un redresseur non commandé,
- un filtre passe-bas,
- un onduleur de tension contrôlé par la technique MLI.



**Figure II-1** : Association redresseur –filtre -onduleur de tension -MAS.

### II-1-2-Dimensionnement du redresseur

Assurant la conversion alternatif-continu, un redresseur peut être défini comme étant un montage électronique dont le but est de modifier un signal électrique afin de rendre sa tension toujours unidirectionnelle.



**Figure II-2** : Schéma du redresseur.

## II-2- Dimensionnement du filtre

Le filtre d'entrée (LC) inséré entre la source d'alimentation et l'onduleur, comporte deux éléments essentiels :

-une inductance  $L_f$  en série, permettant de lisser le courant  $i_{red}$ , afin de protéger de toute perturbation le réseau d'alimentation,

-une capacité  $C_f$  en dérivation, servant à supprimer les brusques variations de la tension  $v_f$  durant les intervalles de commutation.

Les équations du filtre schématisé par la figure (II-3) sont :

$$U_{red} = L_f (di_f/dt) + u_f \quad (II-1)$$

$$du_f/dt = 1/C_f (i_{red} - i_f) \quad (II-2)$$

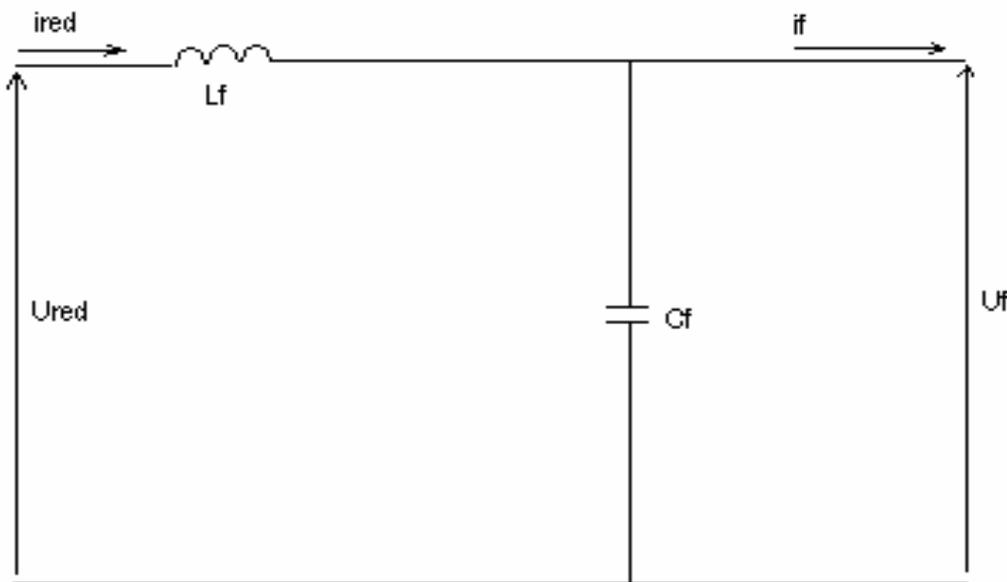


Figure II-3: Schéma du filtre.

### II-2-1-Calcul des paramètres du filtre

#### II-1-a-Harmoniques du courant d'entrée et de la tension de sortie

Les équations liants  $i_{red}$  et  $u_f$  à  $U_{red}$  et  $i_f$  sont les équations (II-1) et (II-2).

Les équations de  $i_f$ ,  $i_{red}$  et  $u_f$  sont données par les trois équations suivantes :

$$i_f = I_f + \sum_n I_{fn} \sin(n \omega t) \quad (II-3)$$

$$i_{red} = I_{red} + \sum_n I_{redn} \sin(n \omega t) \quad (II-4)$$

$$u_f = U_f + \sum_n U_{fn} \sin(n \omega) \quad (II-5)$$

Les valeurs efficaces  $I_{\text{redn}}$ ,  $I_{\text{fn}}$ , et  $U_{\text{fn}}$  de pulsation  $\omega$ , sont données par les équations (II-6) et (II-7).

$$I_{\text{redn}} = \frac{I_{\text{fn}}}{\left| 1 - L_f C_f n^2 \omega^2 \right|} \quad (\text{II-6})$$

$$U_{\text{fn}} = \frac{L_f n \omega I_{\text{fn}}}{\left| 1 - L_f C_f n^2 \omega^2 \right|} \quad (\text{II-7})$$

$$\omega_f = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (\text{II-8})$$

$$(\text{II-6}) \text{ et } (\text{II-8}) \Rightarrow I_{\text{redn}} = I_{\text{fn}} \frac{1}{\left| 1 - \frac{(n\omega)^2}{\omega_f^2} \right|} \quad (\text{II-9})$$

$$(\text{II-7}) \text{ et } (\text{II-8}) \Rightarrow U_{\text{fn}} = \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} I_{\text{fn}} \frac{n\omega / \omega_f}{\left| 1 - (n\omega / \omega_f)^2 \right|} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

$I_f$  = valeur moyenne de  $i_f$ .

$I_{\text{fn}}$  = valeur efficace des harmoniques (de pulsation  $n \omega$ ) de  $i_f$ .

$U_f$  = valeur moyenne de  $u_f$ .

$U_{\text{red}}$  = constante.

$I_{\text{red}}$  = valeur moyenne de  $i_{\text{red}}$ .

$\omega_f$  = pulsation propre du filtre.

$U_f = U_{\text{red}}$ .

$I_f = I_{\text{red}}$ .

Pour les fortes valeurs de  $n \omega / \omega_f$ ,  $I_{\text{redn}}/I_{\text{fn}} \approx 1/(n \omega / \omega_f)^2$  et  $\omega_{\text{fn}}/\sqrt{L_f/C_f} \approx \omega_f/n \omega$ .

### II-2-1-b-Application à l'onduleur triphasé en pont

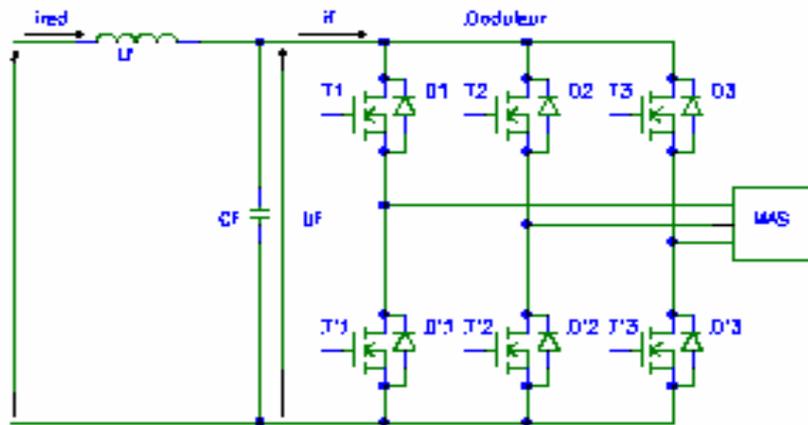


Figure II-4: Onduleur triphasé en pont

On a :

$$I_f = (3/\pi) I' \sqrt{2} \cos \varphi \quad (\text{II-11})$$

avec:  $I'$  = valeur efficace du courant de sortie.

Le courant  $i_f$  est la somme d'un terme moyen  $I_f$  et de termes de pulsations  $6\omega$ ,  $12\omega$ ,  $18\omega$ , ..... ayant pour valeur efficace  $I_{6k} = I' \frac{6|\cos \varphi|}{\pi(36k^2 - 1)} \sqrt{1 + 36k^2 \tan^2 \varphi}$  (II-12)

Dans notre cas, la charge est équilibrée, donc le premier harmonique du courant  $i_f$  à l'entrée de l'onduleur est celui de pulsation  $6\omega$ ; ce qui donne :

$$I_{f6} = I' \frac{6|\cos \varphi|}{35\pi} \sqrt{1 + 36 \tan^2 \varphi} \quad (\text{II-13})$$

$$I_{f6 \max} = I' \frac{36}{35\pi} \quad (\text{II-14})$$

$$I_{red \max} = I' \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \quad (\text{II-15})$$

$$\frac{\Delta i_{red \max}}{I_{red \max}} = \frac{2\sqrt{2} I_{f6 \max}}{I_{red \max}} = \frac{24}{35} \frac{1}{36 L_f C_f \omega^2 - 1} \quad (\text{II-16})$$

En prenant  $\frac{\Delta i_{red \max}}{I_{red \max}} = \frac{\Delta u_f \max}{U_{red}} = 0.1$ ; on aura :

$$\sqrt{L_f C_f} \cdot 6\omega = 2.8; L_f = 0.123 \frac{U_{red}}{\omega I'}; C_f = 1.77 \frac{I'}{\omega U_{red}}.$$

$$\omega = 1410 \frac{2\pi}{60} = 147.58 \text{ rd/s.}$$

$$I' = 5.2 \text{ A.}$$

$$U_{\text{red}} = 515 \text{ V.}$$

$$L_f = 82 \text{ mH.}$$

$$C_f = 120 \mu \text{ F.}$$

## II-3- Dimensionnement de l'onduleur de tension

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

L'onduleur est composé de six transistors  $T_i$  et  $T_i'$  shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération  $D_i$  et  $D_i'$ .

Pour assurer la continuité des courants alternatifs de sortie, les interrupteurs du même bras doivent être complémentaires, lorsque l'un conduit l'autre est bloqué.

Dans cette étude, nous nous intéressons de plus près au cas de la MLI sinus-triangle qui consiste à délivrer un signal triangulaire (porteuse) et des tensions de références (tensions de commande) qui sont l'image des tensions de sortie que nous désirons avoir. Ainsi les séquences d'ouverture des interrupteurs complémentaires  $T_1$  et  $T_1'$ ,  $T_2$  et  $T_2'$ ,  $T_3$  et  $T_3'$  (Figure :II-1), sont donnés par les intersections entre l'onde de modulation (porteuse) et les tensions de références.

### II-3-1-Propriété de la modulation triangulo-sinusoidale

La commande est caractérisée par :

-le coefficient de réglage définit par :

$$r = \frac{A_m}{A_p}$$

-l'indice de modulation :

$$m = \frac{f_p}{f_m}$$

Afin d'avoir une modulation synchrone on prend  $f_p = \text{multiple entier de } f$ .

L'équation de la référence est de la forme  $v_a(t) = r \sin(\omega t)$ .

Les équations des droites formant la porteuse sont de la forme  $y(t) = at + b$ .

Les instants de commutations des interrupteurs  $T_1$  et  $T_1'$  sont donnés par la résolution analogique de l'équation  $y(t) = v_a(t)$ .

En utilisant la méthode de Newton-Raphson, on aboutit aux résultats donnés par le tableau ( II-1) pour une amplitude du fondamental de l'onde MLI=0.75. [8]

| Numéro d'harmonique | Angles (ki) en degré | Vk(i) en % |
|---------------------|----------------------|------------|
|---------------------|----------------------|------------|

|    |                       |       |
|----|-----------------------|-------|
| 1  | K1= 44.13<br>K2=42.74 | 100   |
| 3  | K3=41.06<br>K4=40.64  | 22.51 |
| 5  | K5=36.14              | 3.80  |
| 7  | K6=34.79              | 3.11  |
| 9  | K7=22.17              | 3.642 |
| 11 | K8=20.04              | 1.165 |
| 13 | K9=19.3               | 2.49  |
| 15 | K10=15.02             | 5.267 |
| 17 | K11=13.63             | 5.792 |
| 19 | K12=12.04             | 4.944 |

**TableauII-1** : Valeurs des angles et coefficients des harmoniques.

### II-3-2-Caractéristiques

#### II-3-2-1-Calcul des tensions

##### II-3-2-1-a-Tension simple $v_{a0}$

La tension entre le neutre fictif et la phase a est donnée par la relation suivante :

$$v_{a0}(\omega t) = \frac{V_f}{2} S_1(\omega t) = \frac{V_f}{2} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{imp}}}^{\infty} A_n \sin(n \omega t). \quad (\text{II-17})$$

On pose  $\omega t = \theta$

$$v_{a0}(\omega t) = \frac{V_f}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left( \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin(n\theta) d\theta \right) \sin(n\theta) \right\}$$

$$v_{a0}(\omega t) = \frac{V_f}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{4}{\pi} \left[ \int_0^{\theta_1} -\sin(n\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(n\theta) d\theta + \int_{\theta_2}^{\theta_3} -\sin(n\theta) d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_4} \sin(n\theta) d\theta \right. \right.$$

$$+ \left. \int_{\theta_4}^{\theta_5} -\sin(n\theta) d\theta + \int_{\theta_5}^{\theta_6} \sin(n\theta) d\theta + \int_{\theta_6}^{\theta_7} -\sin(n\theta) d\theta \right] \sin n\theta \left. \right\}.$$

$$v_{a0}(\omega t) = \frac{V_f}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{4}{\pi} \frac{1}{n} [(\cos(n\theta_1) - \cos(0)) + (-\cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_1)) + (\cos(n\theta_3) - \cos(n\theta_2)) + (-\cos(n\theta_4) - \cos(n\theta_3)) + (\cos(n\theta_5) - \cos(n\theta_4)) + (-\cos(n\theta_6) - \cos(n\theta_5)) + (\cos(n\theta_7) - \cos(n\theta_6))] \sin(n\theta) \right\}.$$

$$v_{a0}(\omega t) = \frac{V_f}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{4}{\pi} \frac{1}{n} [-1 + 2(\cos n\theta_1) - \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3) - \cos(n\theta_4) + \cos(n\theta_5) - \cos(n\theta_6) + \cos(n\theta_7)] \sin n\theta \right\}.$$

$$v_{a0}(\omega t) = \frac{V_f}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{4}{\pi} \frac{1}{n} (-1) \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^7 \cos(n\theta_k) (-1)^k \right] \sin n\theta \right\}$$

$$v_{a0}(\omega t) = \frac{V_f}{2} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{nimp}}}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{4}{\pi} (-1)^k \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^7 \cos(n\theta_k) (-1)^k \right] \sin n\theta \quad (\text{II-18})$$

$$v_{b0}(\omega t) = v_{a0} \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{II-19})$$

$$v_{c0} = v_{a0} \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{II-20})$$

### II-3-2-1-b-Tensions composées

$$v_{ab}(\omega t) = v_{a0}(\omega t) - v_{b0}(\omega t)$$

$$v_{ab}(\omega t) = \frac{V_f}{2} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{nimp}}}^{\infty} A_n \left\{ 2 \cos n \left( \omega t - \frac{\pi}{3} \right) \sin \left( n \frac{\pi}{3} \right) \right\} \quad (\text{II-21})$$

$$v_{bc}(\omega t) = v_{ab} \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{II-22})$$

$$v_{ca}(\omega t) = v_{ab} \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{II-23})$$

### II-3-2-2- Calcul des courants

#### II-3-2-2-a- Les courants dans les interrupteurs $k_i$

Les courants qui traversent les interrupteurs  $k_1$  ( $T_1, D_1$ ),  $k_2$  ( $T_2, D_2$ ) et  $k_3$  ( $T_3, D_3$ ) sont donnés respectivement par les expressions ( II-24), (II-25) et (II-26).

$$i_{s1}(\omega t) = i_a(\omega t) S_2(\omega t) \quad (\text{II-24})$$

$$i_{s2}(\omega t) = i_a \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) S_2 \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{II-25})$$

$$i_{s3}(\omega t) = i_a \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) S_2 \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{II-26})$$

$$\text{avec: } S_2(\omega t) = \frac{1}{2} + S_1(\omega t).$$

La décomposition de  $S_1(\omega t)$  en série de Fourier s'écrit sous la forme [9][10] :

$$S_1(\omega t) = \sum_{\substack{n=1 \\ \text{nimp}}}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{4}{\pi} (-1)^k \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^7 \cos(n\theta_k) (-1)^k \right] \sin n\theta$$

#### II-3-2-2-b-Courant dans le semi-conducteur contrôlé

Le semi-conducteur contrôlé écoule la partie positive du courant traversant l'interrupteur.

La valeur de  $i_T(\omega t)$  s'écrit :

$$\begin{aligned} i_T(\omega t) &= i_s(\omega t) && \text{quant } i_s(\omega t) > 0 \\ i_T(\omega t) &= 0 && \text{quant } i_s(\omega t) < 0 \end{aligned} \quad (\text{II-27})$$

### II-3-2-2-c- Courant dans la diode

Contrairement au semi-conducteur contrôlé, la diode écoule la partie négative du courant traversant l'interrupteur. Son expression est :

$$\begin{aligned} i_{iD}(\omega t) &= -i_s(\omega t) && \text{pour } i_s < 0 \\ i_{iD}(\omega t) &= 0 && \text{pour } i_s(\omega t) > 0 \end{aligned} \quad (\text{II-28})$$

### II-3-2-2-d- Courant d'entrée

Le courant à l'entrée de l'onduleur s'écrit :

$$I_f(\omega t) = i_{s1}(\omega t) + i_{s2}(\omega t) + i_{s3}(\omega t). \quad (\text{II-29})$$

## II-4-Présentation du logiciel

La création de l'ordinateur avait pour conséquence la soumission de tous les secteurs d'activité aux techniques de l'informatique, des outils de simulation se sont répandus. L'électrotechnique ne pouvait pas être épargnée. La simulation donne au chercheur la possibilité de réaliser puis de tester un prototype virtuel. Les avantages sont évidents : économie de temps et d'argent.

Un nombre important de logiciels existe sur le marché. PSpice, un logiciel de simulation de circuits électroniques conçu au début des années 70, a divers avantages :

- C'est un logiciel très répandu dans l'industrie.
- Basé sur le standard industriel Spice, il donne accès à d'immenses bibliothèques de modèles développées par les fabricants.
- La prise en main du logiciel est facile.
- Quoi qu'il en soit, ses limites devraient rarement être atteintes dans le cadre d'une simulation en électrotechnique.

## II-5- Conclusion

Ce deuxième chapitre a été consacré au dimensionnement électrique de l'alimentation à base des transistors MOSFET ; un dimensionnement traduit par l'étude d'un redresseur, d'un filtre et enfin d'un onduleur triphasé de tension, avec une modulation sinus-triangle, dans le but d'alimenter une machine asynchrone.

# **Chapitre III**

## **Dimensionnement CEM de l'onduleur.**

## Introduction

Les variateurs de vitesses se doivent de répondre aux normes de la CEM comme tous les équipements électriques de nos jours.

Même si leur utilisation, prépondérante dans le secteur industriel, leur permettrait parfois d'échapper à cette contrainte, leur utilisation progressive en milieu tertiaire nécessite de remplir, ou au moins de prévoir, l'aspect normatif. C'est dans ce type d'exigences que sont aujourd'hui confrontées les entreprises spécialisées dans la conception de variateurs de vitesse et plus globalement de convertisseurs statiques.

Il est alors impératif de prendre en compte l'environnement du convertisseur, ce qui implique la modélisation des éléments situés en amont et en aval de ce dernier (câbles, machines tournantes.....)

Les blocs représentant chacune des parties du système étudié dans notre cas est présenté par la figure (III-1).

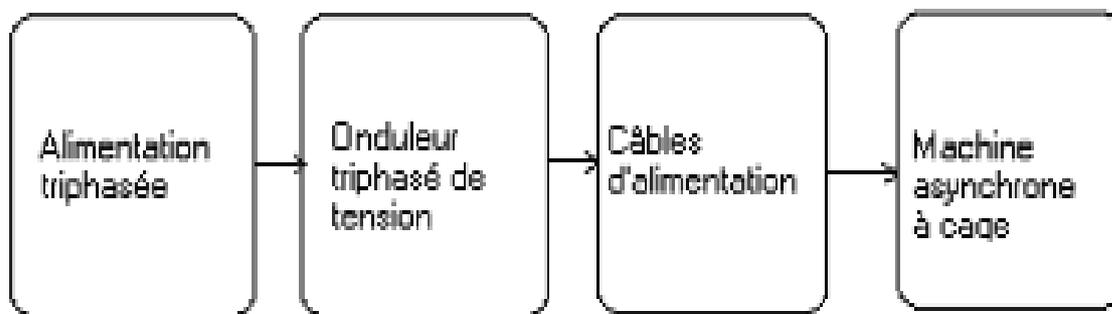


Figure III-1 : Chaîne d'éléments à modéliser.

### II-1-Localisation des sources de perturbations de l'onduleur

L'onduleur triphasé est considéré comme étant un convertisseur dit symétrique. Cette symétrie se situe notamment au niveau des cellules de commutation où chacune possède deux interrupteurs identiques ayant la même fonction et commandés de façon complémentaire.



Figure III-2 : Cellule de la commutation représentant un bras de l'onduleur

Le schéma équivalent d'une cellule d'un onduleur se compose de deux générateurs de perturbations représentant d'une part les fortes variations de potentiel du point milieu (le point M sur le schéma de la figure III-2), considérés comme une cause directe des courants de mode commun, et d'autre part les variations de courant générées par le découpage du courant de puissance absorbé par la charge.

Les sources de perturbations sont relativement simples à localiser puisqu'elles sont essentiellement associées aux fortes variations de potentiel et de courants que les interrupteurs de puissances provoquent.

### III-2-Couplages capacitifs dus aux transistors

Les six transistors MOSFET de l'onduleur, avec leurs diodes en antiparallèle, source de perturbations, sont généralement brasés sur des pistes de cuivre. Les composants seront reliés à la terre par l'intermédiaire d'un radiateur se trouvant naturellement relié à la terre.

De ce fait, un couplage capacitif représenté par des capacités parasites, apparaît entre les composants et la masse, contribuant ainsi à la circulation de courants parasites de mode commun.

La valeur de la capacité parasite (C) est souvent très petite et sa mesure est très approximative.

Connaissant la géométrie des composants électroniques utilisés dans notre cas, la valeur de la capacité parasite s'obtient facilement en appliquant la relation classique (III-1).

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r s}{e} \quad (\text{III-1})$$

Avec :

$\epsilon_0$  = permittivité du vide.

$\epsilon_r$  = permittivité relative du matériau (mica dans notre cas)

s = surface occupée par le composant.

e = épaisseur de l'isolant (1mm pour notre cas).

Application numérique :

$$C = 700 \text{ pF}$$

### III-3- Etudes des variations des dv/dt en sortie de l'onduleur

Comme on l'a déjà vu au paragraphe I, les variations de potentiel du point milieu (M sur la figure III-2) des cellules de commutation sont la cause principale des perturbations. Cela se manifeste par l'apparition de couplage de mode commun. Ces capacités seront le lieu de propagation des courants de mode commun, créés par les variations rapides de tensions représentant les générateurs de tension harmoniques équivalents.

Définir ces générateurs revient à calculer les sources de perturbations au niveau de l'onduleur. La forme d'onde la plus élémentaire et la plus générique que l'on puisse leur donner est trapézoïdale [11] comme le montre la figure (III-3).

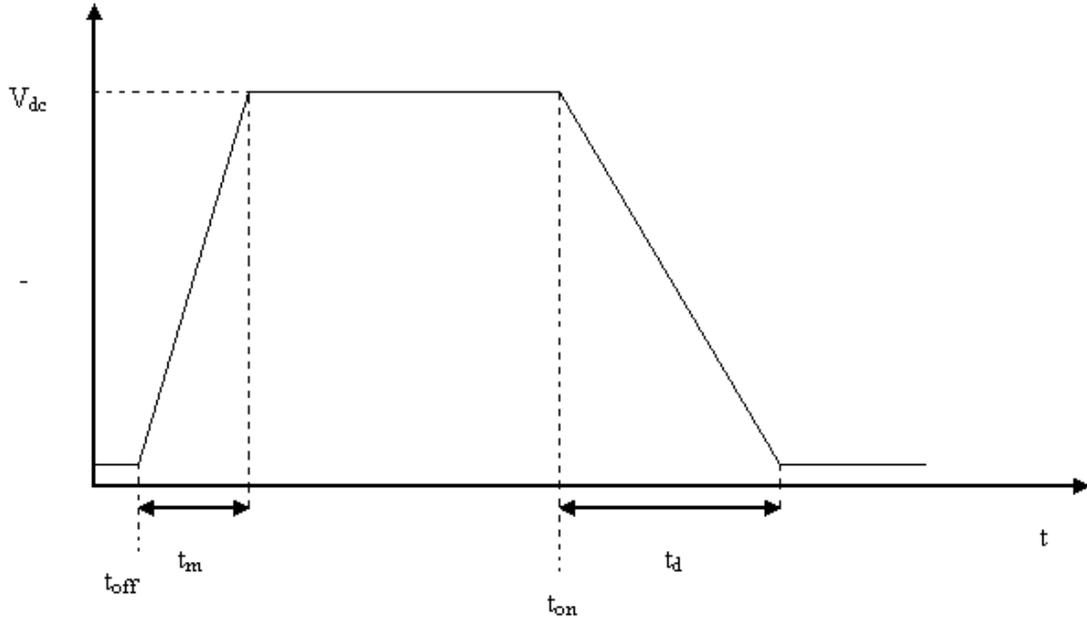


Figure III-3 : Trapèze élémentaire.

Avec :

$t_m$  = temps de montée.

$t_d$  = temps de descente.

$t_{on}$  = instant relatif à la mise en conduction du transistor.

$t_{off}$  = instant correspondant au blocage du transistor.

La décomposition harmonique sur toute une période est fournie par l'expression III-2 [11] dans laquelle  $N$  représente le nombre entier de périodes de découpage comprise dans la fenêtre temporelle étudiée.

$$V_{sn} = V_{ds} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\sin C \left( \frac{t_m n}{T_s} \right) e^{-\pi j \frac{(2t_{off} + t_m)n}{T_s}} - \sin C \left( \frac{t_d n}{T_s} \right) e^{-\pi j \frac{(2t_{on} + t_d)n}{T_s}}}{2\pi j n} \quad (\text{III-2})$$

$t_{oni}$  et  $t_{offi}$  représentent respectivement l'instant correspondant à la mise en conduction du transistor et celui relatif à son blocage, pour la  $i^{\text{ème}}$  période étudiée.

La relation ci-dessus montre que le spectre décroît et sa décroissance est inversement proportionnelle à la fréquence.

L'enveloppe HF du spectre des tensions en sortie de l'onduleur (et donc des courants) va être directement liée à la dérivée des tensions, dont la variation est la cause des courants de mode commun, lors de la commutation. Cette enveloppe est donc fonction de la fréquence de découpage. Le  $dv/dt$  des tensions de sortie dépend du courant de ligne commuté dans les transistors de puissance [12]. Seulement le courant de ligne ne représente pas la seule composante qui influe sur la valeur de  $dv/dt$ , plusieurs autres paramètres inscrivent leur influence tels que la résistance de grille des transistors.

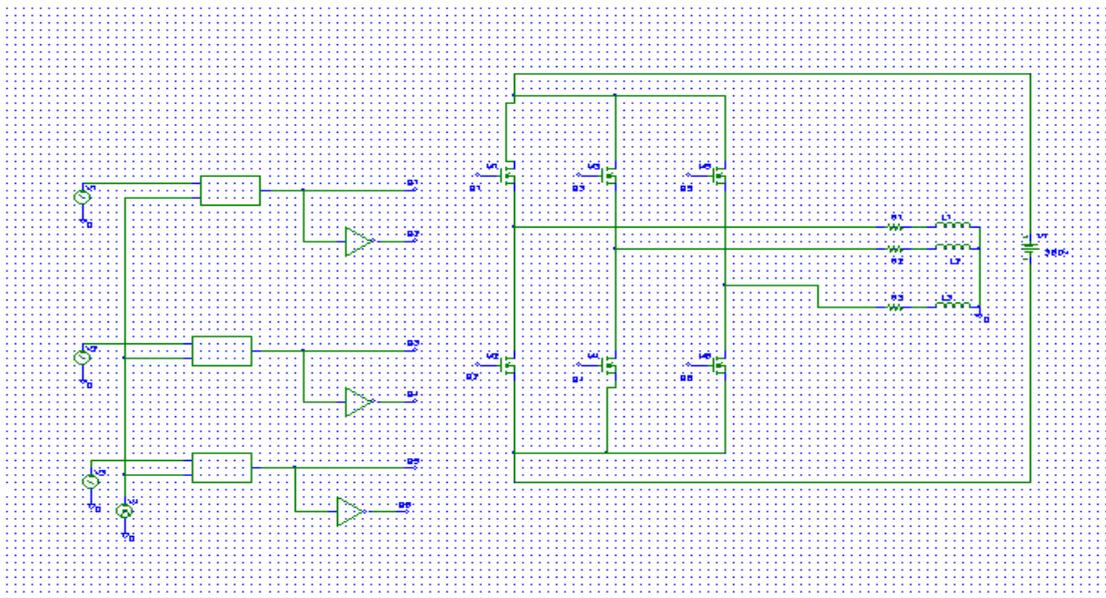
### III-4-Fonctionnement de l'onduleur à commande par MLI intersective

### III-4-1-Principe

La MLI sinus-triangle consiste à détecter l'intersection de deux signaux : un signal (triangulaire dans notre cas) chargé de transporter l'information utile à la charge, appelée Porteuse, et un signal sinusoïdal dont on souhaite imposer la forme temporelle à la charge, appelée Modulante. Cela peut être réalisé en utilisant des comparateurs et des inverseurs fournis par les bibliothèques du logiciel Pspice.

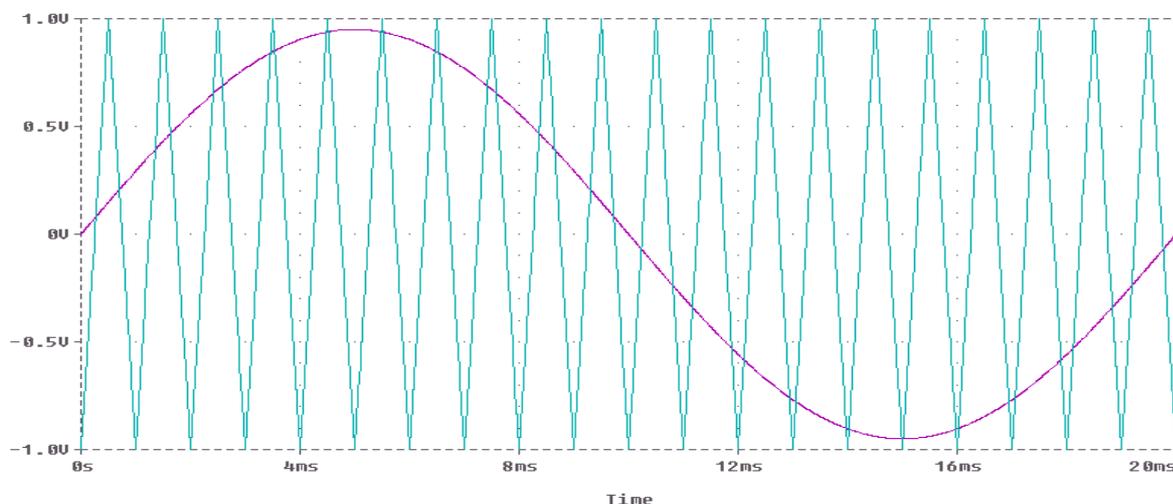
### III-4-2- Débit sur charge RL

Pour notre simulation, nous avons choisi le logiciel Pspice7.1. Le montage de simulation est donné par la figure III-4.



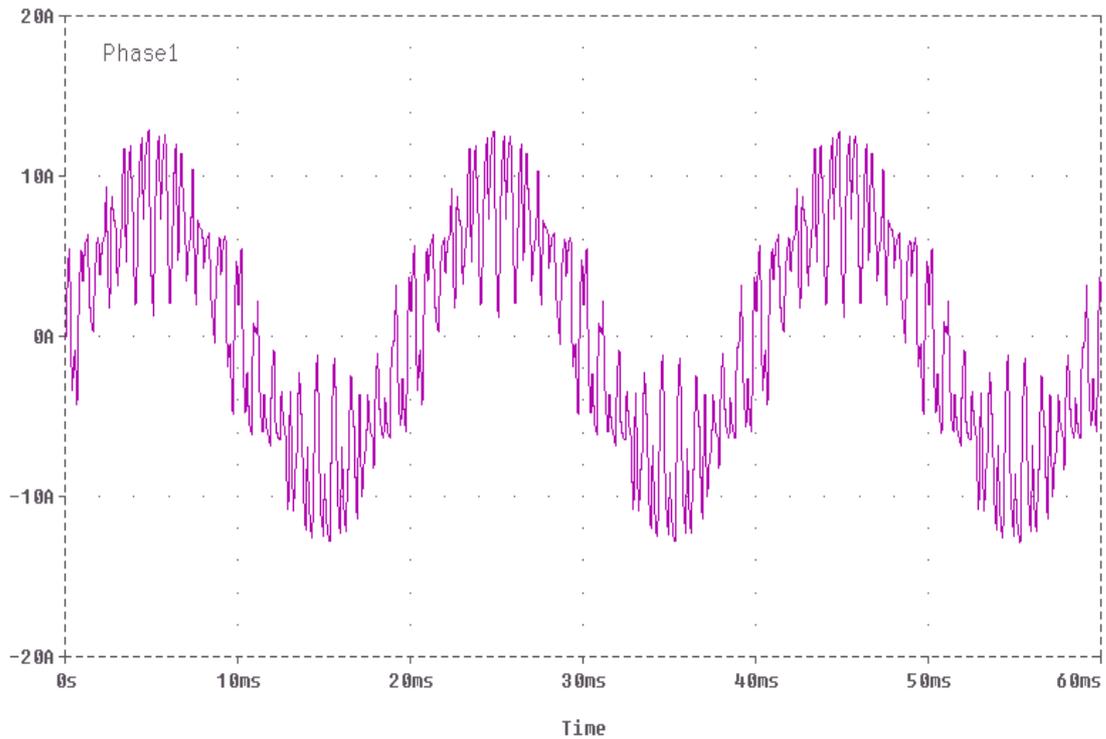
**Figure III-4** : Schéma de l'onduleur, commandé par MLI, associé à la charge RL.

Pspice permet de générer une commande MLI à partir de signaux sinus et triangle comme le montre la figure ci-dessous (figure III-5).

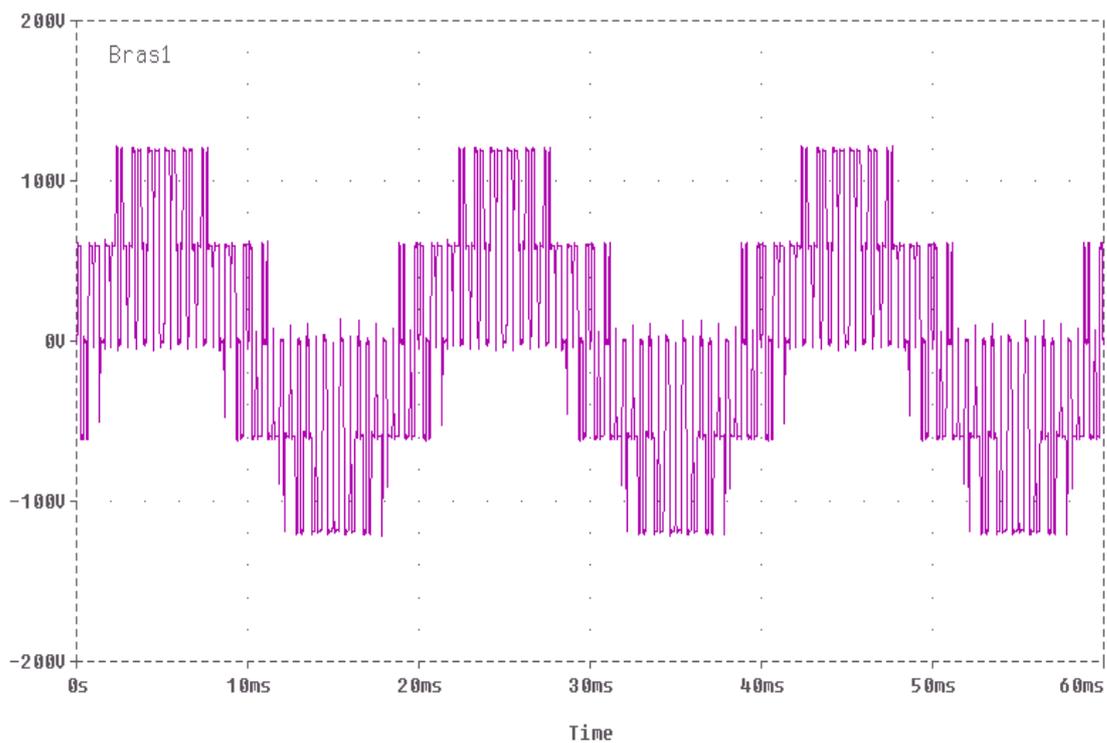


**Figure III-5** : Modulation triangulo-sinusoidale.

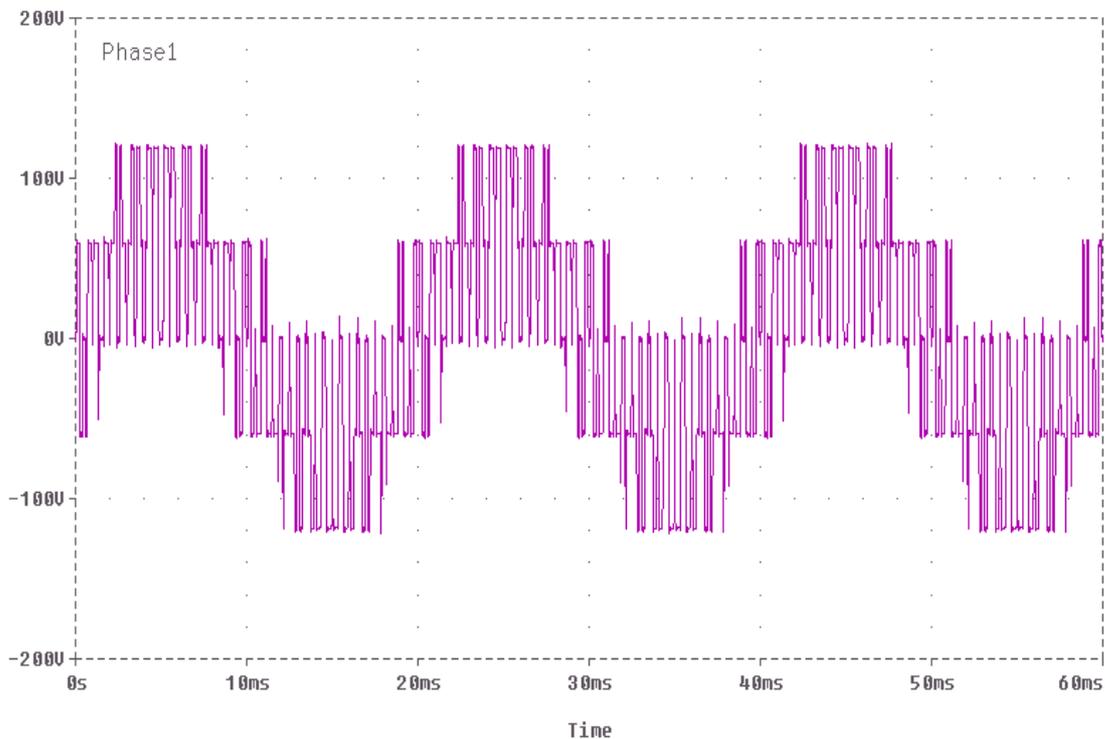
La simulation du fonctionnement de l'ensemble convertisseur-machine a donné les résultats suivants :



**Figure III-6 : Courant de phase.**



**Figure III-7 : Tension à la sortie du bras**

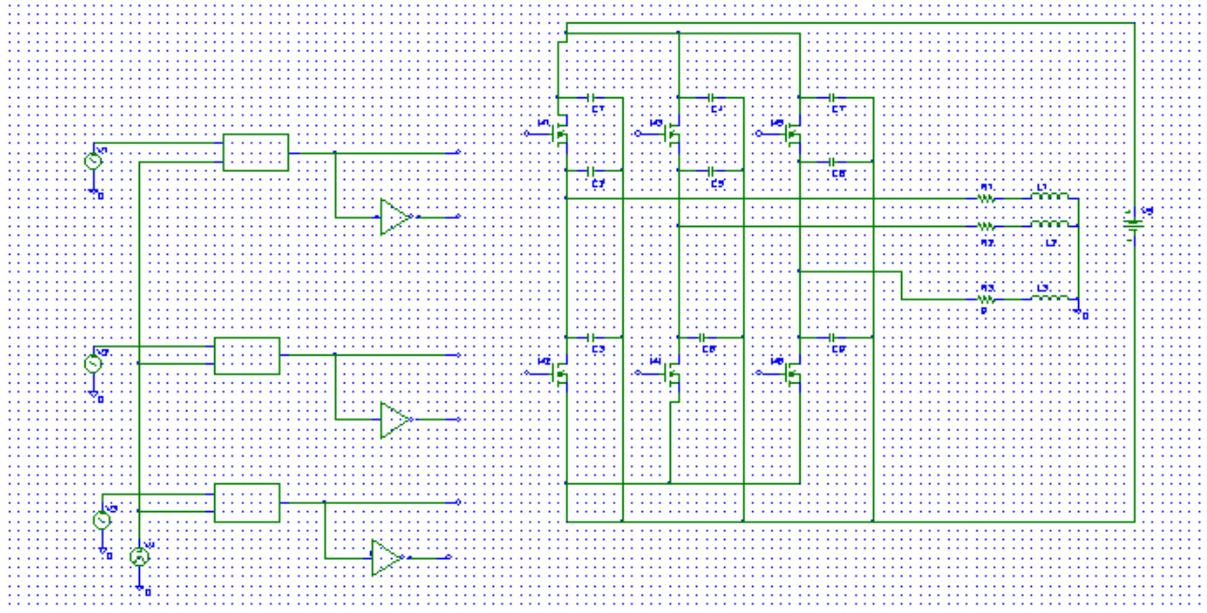


**Figure III-8** : ddp aux bornes de la charge.

On remarque que les tensions et le courant ont une allure proche d'une sinusoïde. A noter que les trois tensions à la sortie des trois bras sont superposables et décalées de  $2\pi/3$ . Les trois ddp aux bornes des trois phases (1, 2, 3) de la charge sont aussi identiques et décalées de  $2\pi/3$ . La même remarque est valable pour les trois courants dans les trois phases.

#### III-4-2-1- Influence des capacités parasites des transistors

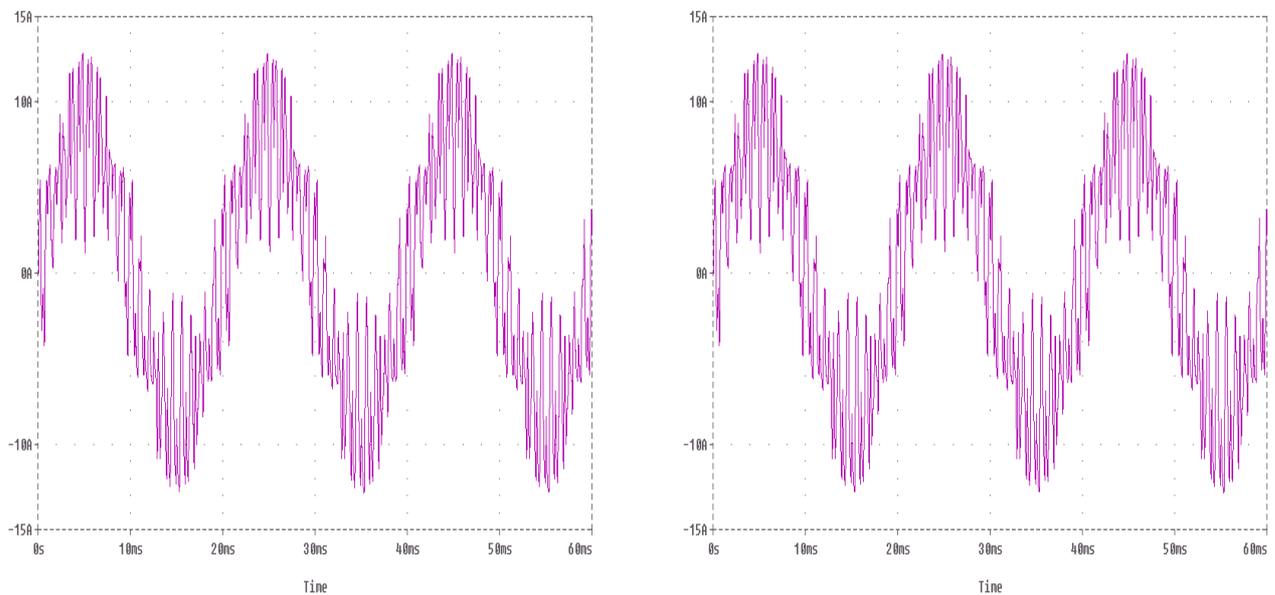
Après l'ajout des capacités parasites dont l'origine est la diaphonie capacitive, le schéma de la figure III-4 prend la forme de la figure suivante (figure III-9) :



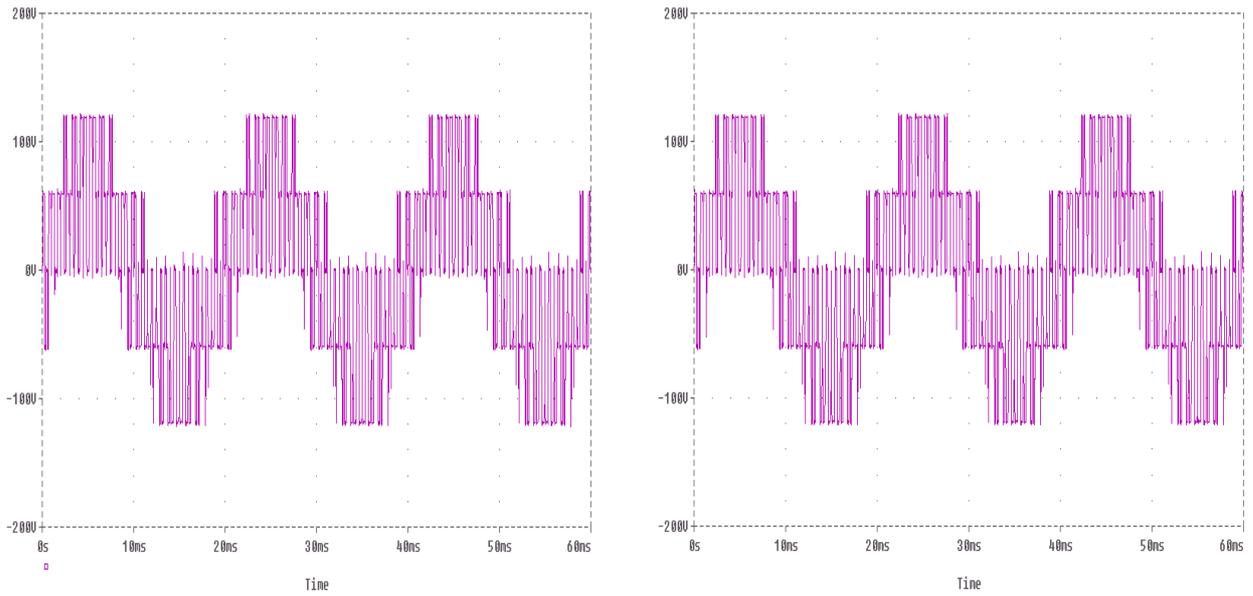
**Figure III-9 :** Schéma de l'onduleur avec capacités parasites, commandé par MLI, associé à la charge RL.

#### III-4-2-1-a-Simulation temporelle

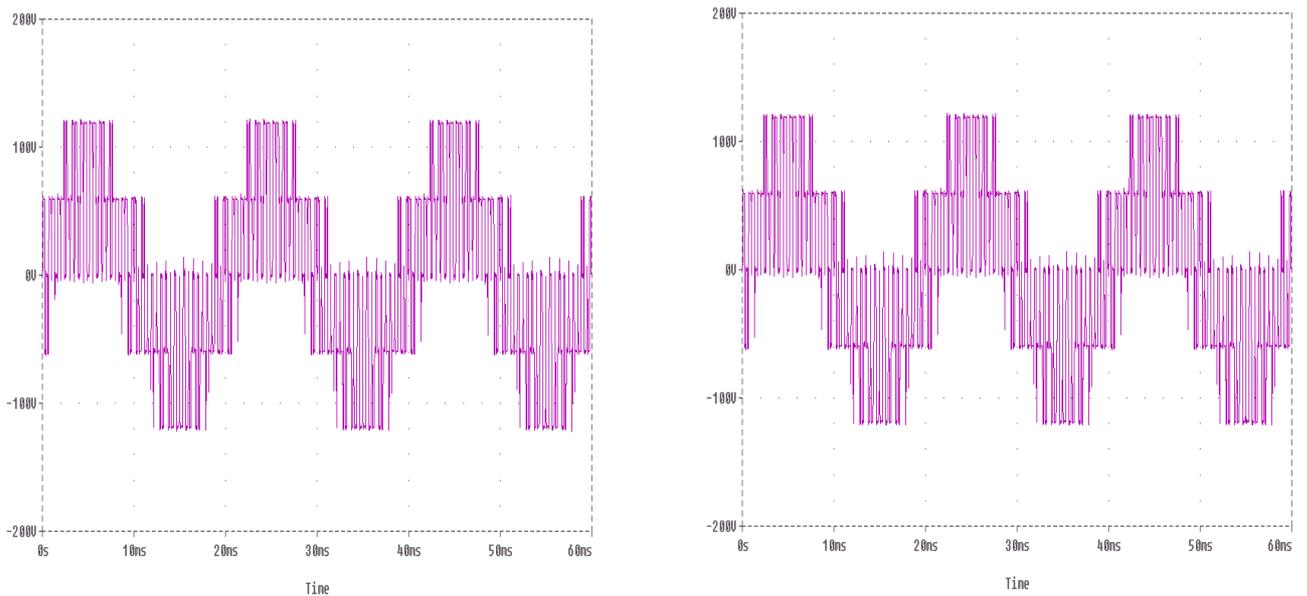
Les deux simulations temporelles, avant et après l'ajout des capacités parasites (figures III-10, III-11, III-12), ne montrent pas une grande différence, cela est dû aux valeurs très petites de ces dernières.



**Figure III-10 :** Courant phase 1 avant (à gauche) et après (à droite) l'ajout des capacités.

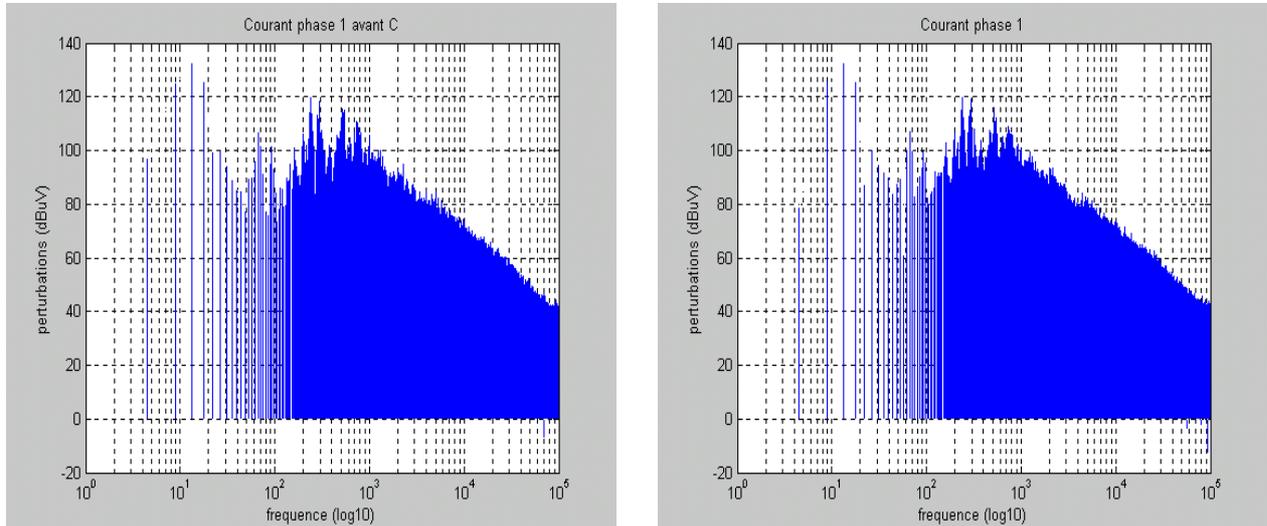


**Figure III-11 :** Tension à la sortie du bras 1 avant (à gauche) et après (à droite) l'ajout des capacités parasites.



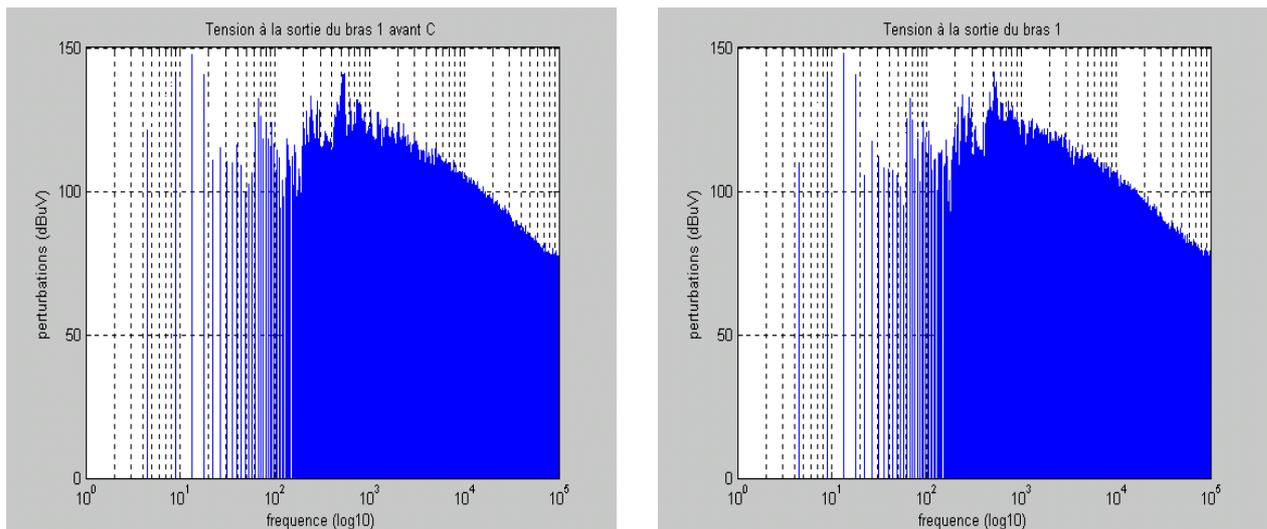
**Figure III-12:** Tension phase 1 avant (à gauche) et après (à droite) l'ajout des capacités parasites des transistors.

#### III-4-2-1-b- Etude spectrale des signaux



**Figure III-13:** Spectres de fréquences des courants de phase sans (à gauche) et avec (à droite) les capacités parasites de l'onduleur.

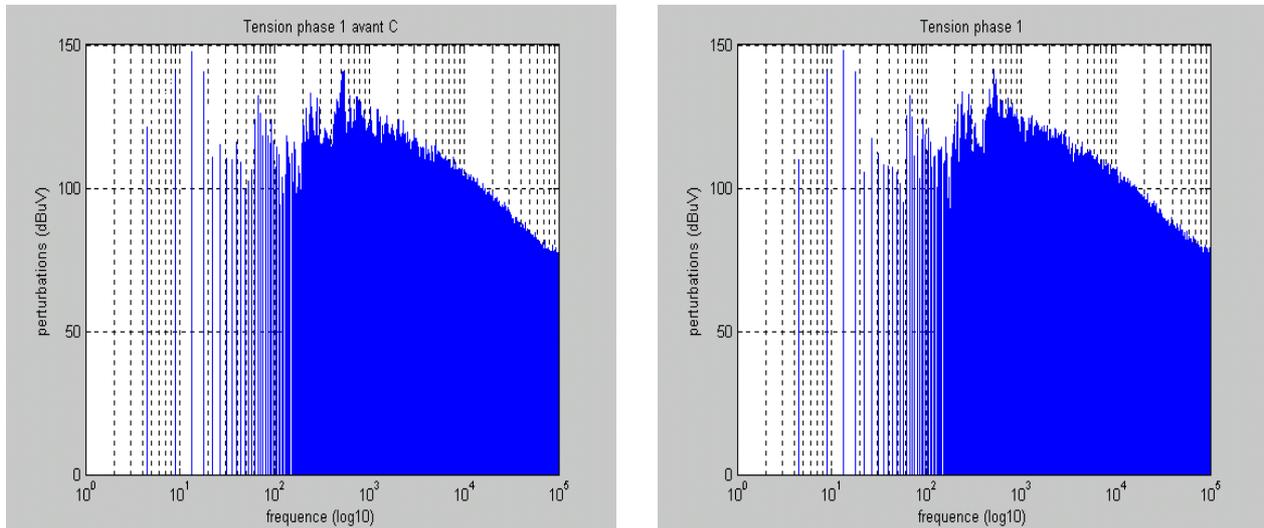
- En comparant les deux signaux de la figure III-13, nous constatons que l'ajout des capacités parasites a entraîné la diminution des amplitudes des raies. Ces capacités ont permis d'atténuer les fronts de montée de courant, elles jouent donc le rôle de filtre.



**Figure III-14:** Spectres de fréquences des tensions à la sortie du bras 1 sans (à gauche) et avec (à droite) les capacités parasites de l'onduleur.

● Diminution non importante des amplitudes des raies après l'ajout des capacités parasites de l'onduleur.

Comme pour le cas précédent, les capacités parasites de l'onduleur ont joué le rôle d'un filtre.



**Figure III-15:** Spectres de fréquences des tensions aux bornes de la phase 1 sans (à gauche) et avec (à droite) les capacités parasites de l'onduleur.

● Diminution des amplitudes des raies du spectre après la prise en considération des capacités parasites de l'onduleur.

La remarque faite aux capacités parasites pour les deux cas précédents reste valable pour ce cas.

## II-5-Conclusion

L'introduction de l'onduleur avec une commande MLI nous a permis d'obtenir une allure sinusoïdale des tensions et des courants de sortie. Cela confirme l'utilité de la MLI à améliorer le spectre d'harmoniques du courant et de la tension de sortie et par conséquent, leurs formes. Les ondulations de ces différentes grandeurs sont dues à la commutation des interrupteurs.

Les capacités parasites ont contribué à la diminution des amplitudes des raies pour chaque cas des spectres de fréquences, elles jouent le rôle de filtre, leur présence permet donc d'atténuer la raideur des fronts de montée de courant ce qui prouve leur efficacité.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons l'alimentation d'une machine asynchrone sans défauts.

# **Chapitre IV**

## **Alimentation d'une machine asynchrone saine**

## **Introduction**

Depuis plusieurs années, plusieurs machines électriques existent sur le plan industriel. Leur domaine d'application a connu d'importantes mutations qui sont dues au développement de nouvelles structures de conversions électromécaniques associant machines et convertisseurs statiques et à l'apparition de nouveaux matériaux magnétiques.

Les machines électriques à courant continu ont été les premières à être utilisées dans le domaine des entraînements à vitesse variable.

En effet la machine à courant continu à excitation séparée offre comme principal avantage d'être facile à commander. Le flux et le couple sont découplés et contrôlés indépendamment et grâce à cette propriété, de hautes performances dynamiques peuvent être atteintes [13].

Cependant ce type de machines présente des inconvénients dus à la présence du collecteur et des balais les rendant ainsi les plus polluantes parmi les autres machines. Elles présentent des sources importantes de parasites dont deux facteurs influent sur leur qualité et leur quantité : la commutation et l'usage des balais.

Le coût de revient est un autre inconvénient que présente la machine à courant continu, il la rend de moins en moins désirable dans l'industrie.

Ces limitations de la machine à courant continu ont rendu la machine asynchrone plus attractive pour l'industrie suite aux remarquables progrès dans le domaine de l'électronique de puissance.

Le but du présent chapitre est de modéliser la chaîne formée par l'association de l'onduleur, le câble d'alimentation et la machine asynchrone. Ces deux derniers représentent l'un des principaux trajets pour les courants parasites.

Le chapitre III a été consacré à l'étude CEM de l'onduleur, dans le présent nous nous attacherons à la modélisation du câble d'alimentation puis de la machine asynchrone à cage.

### **IV-1- Modélisation du câble d'alimentation**

L'étude des couplages dans les réseaux de câblage des systèmes est l'une des préoccupations principale de la compatibilité électromagnétique. Toutefois la modélisation des lignes électriques est un problème traité depuis de nombreuses années [12].

Dans le cas de l'étude de la chaîne de variation de vitesse, le câble d'alimentation influe sur différents phénomènes de perturbation [12].

-il intervient en mode différentiel par des effets propagatifs, et réalise un filtrage et déforme le signal initial. Il provoque des surtensions en bout de ligne ce qui impose en pratique de prendre des précautions pour protéger les bobinages de la machine.

-le câblage influence fortement les perturbations rayonnées.

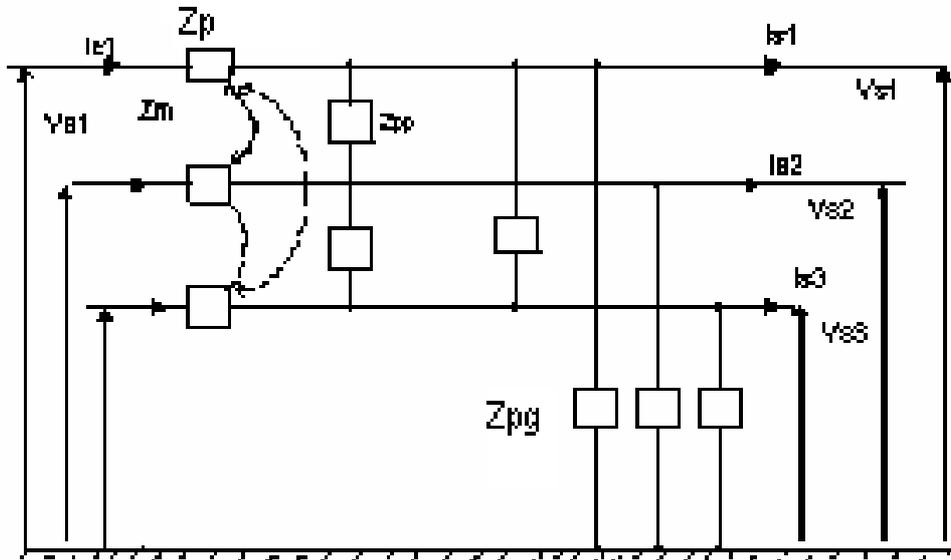
Le modèle à constantes réparties et le modèle à constantes localisées sont deux solutions parmi les plus connues des solutions envisageables pour modéliser un câble d'alimentation.

#### **IV-1-1- Modèle à constantes réparties**

Le principe de cette méthode est de considérer des tronçons élémentaires, d'où le nom de modélisation par tronçon de matrice.

Ce modèle possède l'avantage de prendre en compte facilement les couplages inductifs et capacitifs entre les différents conducteurs en se présentant sous la forme d'un schéma électrique équivalent [11].

Avec la connaissance des éléments RLCG (résistance, inductance, capacité et conductance) d'un tronçon de faible longueur, on constitue une cellule. La figure IV-1 en présente un exemple dans le cas d'un câble à quatre conducteurs dont l'un est choisi comme conducteur de référence.



**FigureIV-1 : Cellule triphasée élémentaire.**

Avec :

- Zp= résistance R en série avec une inductance L.
- Zpp= capacité Cpp en parallèle avec une conductance Gpp.
- Zpg= capacité Cpg en parallèle avec une conductance Gpg.
- Ve= tension d'entrée.
- Vs= tension de sortie.
- Ie= courant d'entrée.
- Is= courant de sortie.

La matrice de transfert d'une portion de câble est définie par la relation (IV-1) [13].

$$M_T = \begin{bmatrix} Id & Z \\ Y & Y.Z + Id \end{bmatrix} \quad (IV-1)$$

Avec :

$$Y = \begin{bmatrix} -(2Y_{pp}+Y_{pg}) & Y_{pp} & Y_{pp} \\ Y_{pp} & -(2Y_{pp}+Y_{pg}) & Y_{pp} \\ Y_{pp} & Y_{pp} & -(2Y_{pp}+Y_{pg}) \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} -(L_p+R) & -M_p & -M_p \\ -M_p & -(L_p+R) & -M_p \\ -M_p & -M_p & -(L_p+R) \end{bmatrix}$$

$I_d$  = matrice identité 3x3.

$Y_{pp} = G_{pp} + C_{pp} p$ .

$Y_{pg} = G_{pg} + C_{pg} p$ .

La matrice de transfert totale du câble est donnée par l'équation (IV-2).

$$T = (M_T)^N \quad (IV-2).$$

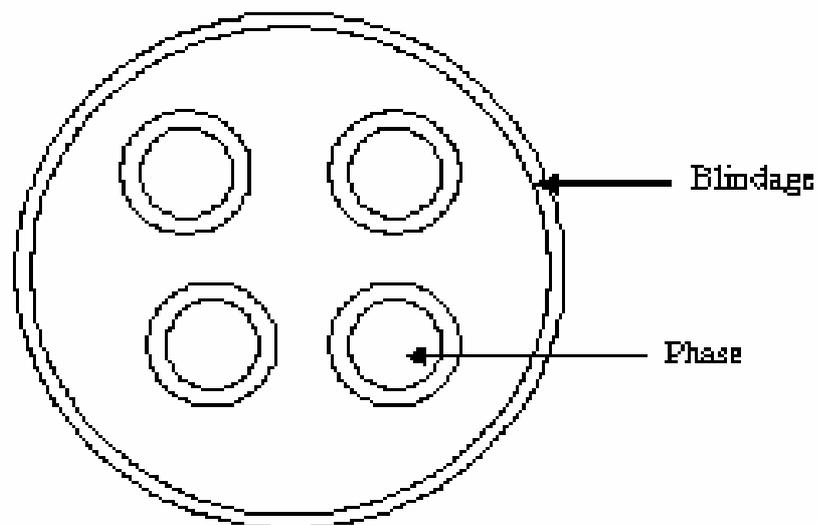
avec :

$N$  = nombre de tronçons constituant le câble.

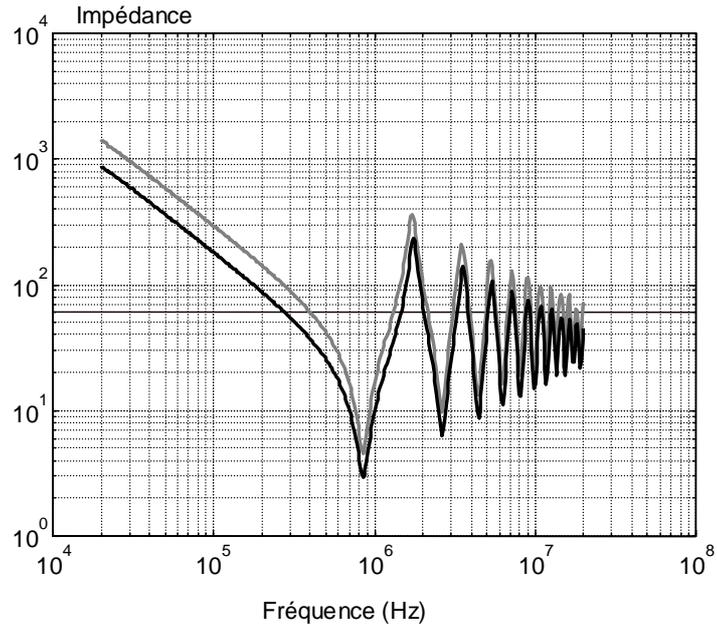
#### IV-1-2- Modèle à constantes localisées

Ce modèle, qui malgré ses quelques inconvénients, présente un avantage très intéressant pour nous. Contrairement au modèle à constantes réparties, le modèle à constantes localisées est compatible avec les outils de simulation circuit tel que le logiciel Pspice que nous avons utilisé lors de nos travaux de simulation.

En utilisant cette méthode pour modéliser un câble à quatre conducteurs (figure IV-2) et dans le but est de mesurer l'impédance pour une longueur  $l = 50m$ , on abouti au résultat de la figure suivante ( figure IV-3) : [12]

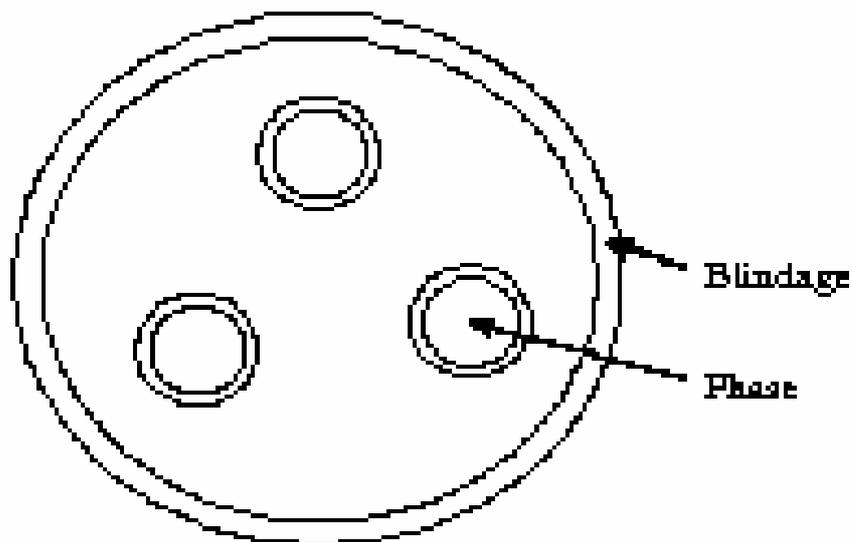


**Figure IV-2 :** Vue en coupe du câble à quatre conducteurs.



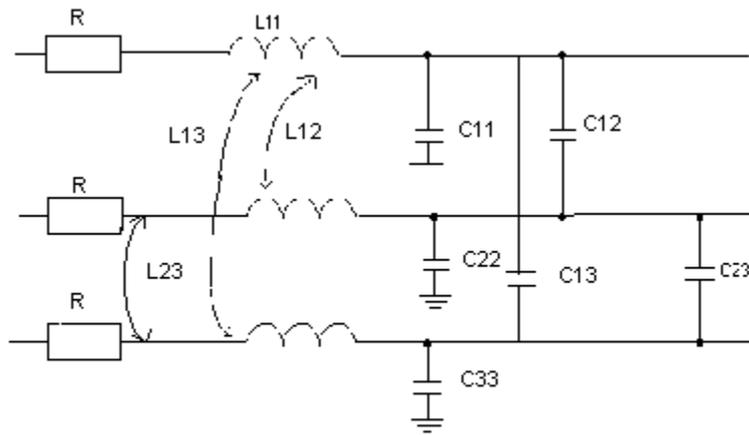
**Figure IV-3 :** Impédance entre phase et blindage (noir)  
et entre deux phases (gris) du câble de 50m

Pour mieux représenter les paramètres linéiques d'un câble d'alimentation, et dans le but d'obtenir un modèle moins encombrant, on considère un câble à trois conducteurs dont la vue en coupe est représentée par la figure IV-4.



**FigureIV-4 :** Vue en coupe d'un câble à trois conducteurs.

Le modèle équivalent de ce câble est donné par la figure IV-5. La référence de masse étant constituée par le blindage du câble.



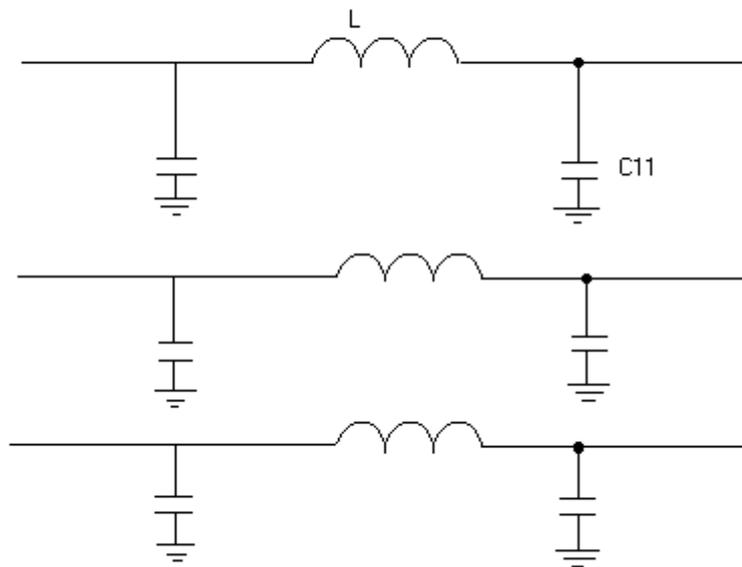
**FigureIV-5** : Modèle équivalent d'un câble à trois conducteurs.

Les paramètres linéiques d'un câble à quatre conducteurs, identifiés par Vermaelen Christophe [12], sont donnés par le tableau IV-1.

|     |         |     |           |
|-----|---------|-----|-----------|
| L11 | 234nH/m | C11 | 187pF/m   |
| L12 | 47 nH/m | C12 | 30.5 pF/m |
| L13 | 30 nH/m | C13 | 3.5 pF/m  |

**TableauIV-1** : Paramètres linéiques du câble.

Dans notre cas, le problème de proximité des conducteurs est négligeable, les couplages électrostatiques et magnétiques entre phases ne seront pas mis en compte, le schéma de la figure IV-5 sera simplifié et représenté par le schéma de la figure IV-6. La référence de masse étant le châssis relié à la terre.



**FigureIV-6 :** Modèle équivalent d'un câble à trois conducteurs sans couplages électrostatiques et magnétiques.

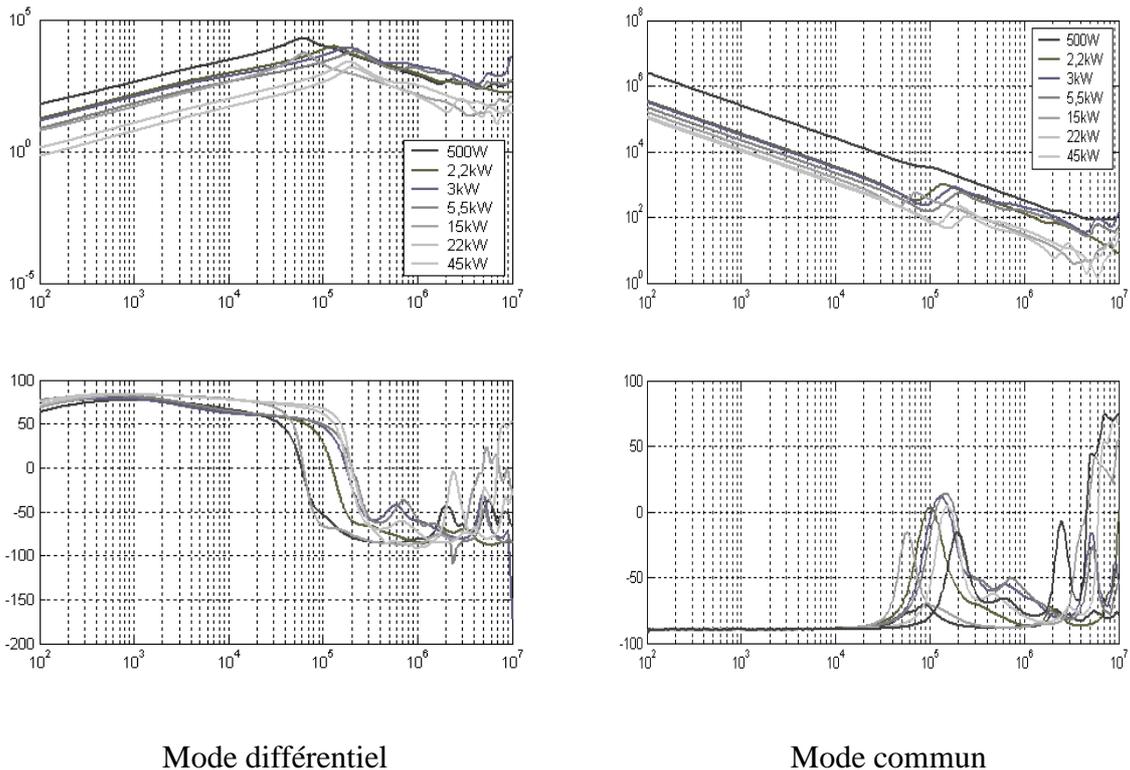
## IV-2- Modélisation de la machine asynchrone

Les machines asynchrones sont très sollicitées depuis la découverte des convertisseurs statiques. Un résultat très encourageant pour les utilisateurs si le problème des différents couplages à l'intérieur de la machine n'existait pas. Ces couplages sont nombreux et de nature variée, chose qui rend la modélisation de la machine très difficile.

Dans le cas des machines asynchrones, les perturbations de mode commun sont dominantes, elles se manifestent surtout par des couplages capacitifs.

### IV-2-1- Etude de l'évolution de l'impédance d'une phase en fonction de la fréquence

L'évolution de l'impédance de mode différentiel et de mode commun des phases de moteurs de puissances différentes est donnée par la figureIV-7.



**Figure IV-7-** Impédance de mode différentiel et de mode commun pour des moteurs de puissances différentes

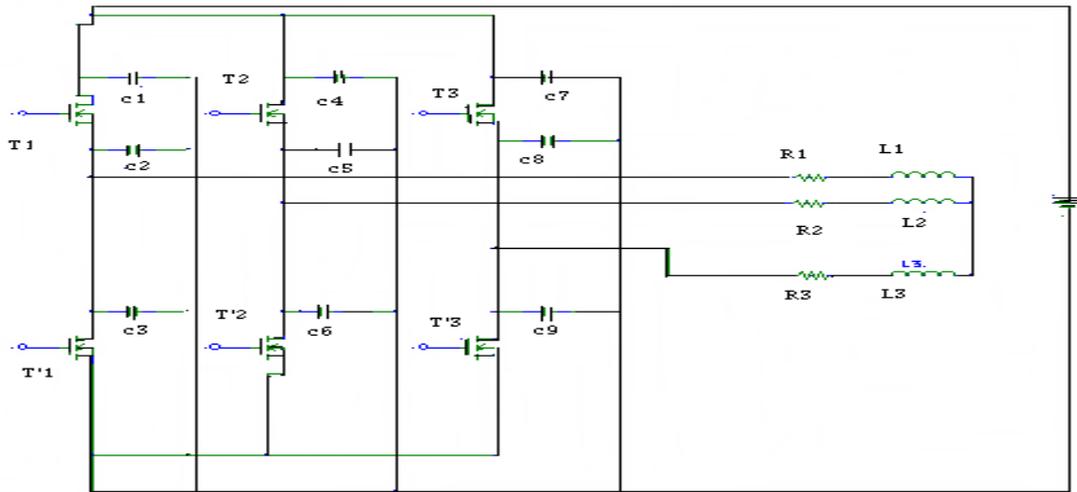
On remarque que l'évolution globale de l'impédance est homogène quelle que soit la puissance du moteur considéré, et que la limite fréquentielle entre le comportement inductif et capacitif d'une phase se situe toujours autour de la centaine du Kiloherz qui représente la résonance.

### IV-3 : Etude spectrale

Dans le but de faire une étude spectrale, quatre cas de montages ont été considérés :

- Onduleur avec capacités parasites et machine asynchrone représentée par une résistance en série avec une inductance.
- Onduleur avec capacités parasites, câble d'alimentation avec inductance et capacités parasites, et la machine asynchrone sans résistances de fuites ni capacités parasites.
- Onduleur avec capacités parasites, câble d'alimentation avec inductance et capacités parasites, et la machine asynchrone avec ses capacités parasites.
- Onduleur avec ses capacités parasites, câble d'alimentation avec inductance et capacités parasites, et la machine asynchrone avec résistances de fuites et capacités parasites.

#### IV-3-1 : Spectres de fréquences après l'ajout des capacités parasites de l'onduleur



**FigureIV-8 :** Association onduleur avec capacités parasites- machine asynchrone.

Dans le cas présent et les trois autres qui suivent, les transistors utilisés sont des transistors MOSFET. La valeur de leurs capacités parasites est la même que celle calculée au chapitre précédent.

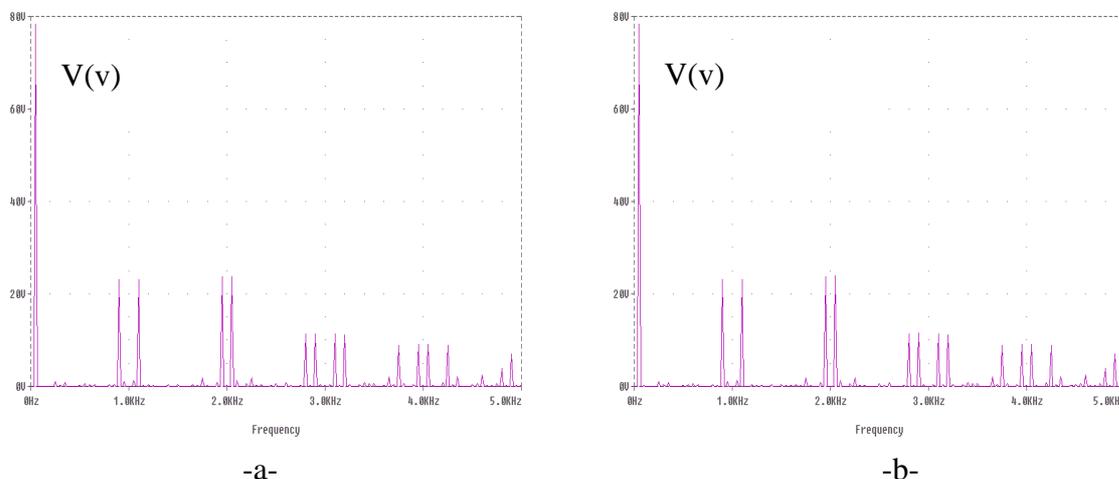
Pour mieux observer les premiers harmoniques de la tension et du courant, nous avons utilisé le logiciel Pspice dans le but de faire une analyse de Fourier. Cette dernière est représentée par les figures IV-9, IV-11 et IV-13, elles représentent respectivement les spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, les spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, et les spectres de fréquences du courant de charge.

On vérifie bien que les premiers harmoniques de tension et de courant sont regroupés autour de la fréquence de la porteuse.

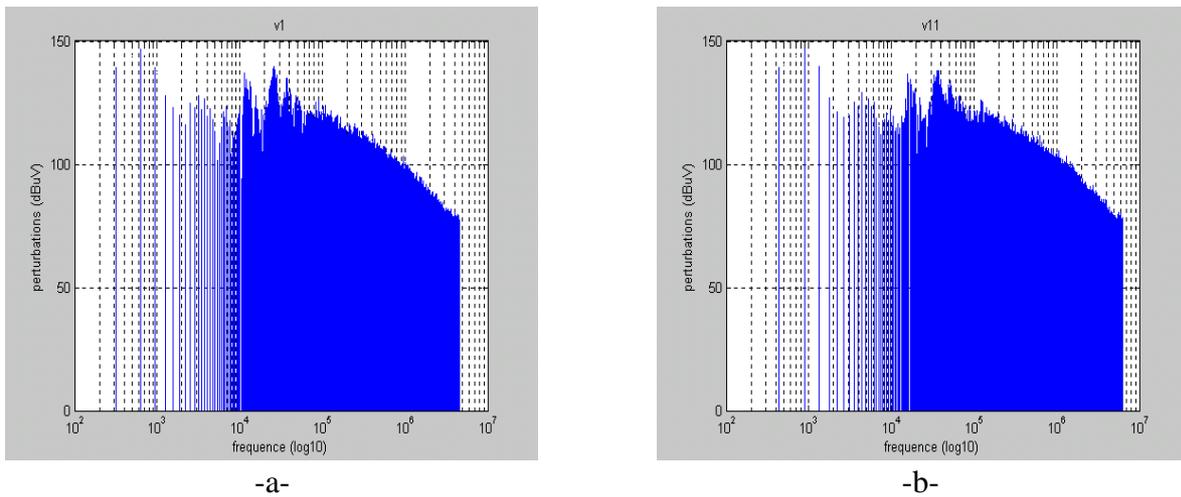
La mesure des raies pour les trois cas de figures citées ci-dessus nous permis de constater qu'après l'application des capacités parasites de l'onduleur, l'amplitude du fondamental a diminué par contre les harmoniques de haut rang sont légèrement supérieurs.

Matlab nous permis de simuler les spectres de fréquences représentés par des figures IV-10, IV-12 et IV-14.

En analysant les spectres des deux cas, avant et après la prise en considération des capacités parasites, ces dernières ont prouvés leur efficacité, grâce à elles, les spectres d'harmoniques sont repoussés vers les fréquences les plus hautes, d'où le rôle d'un filtre.



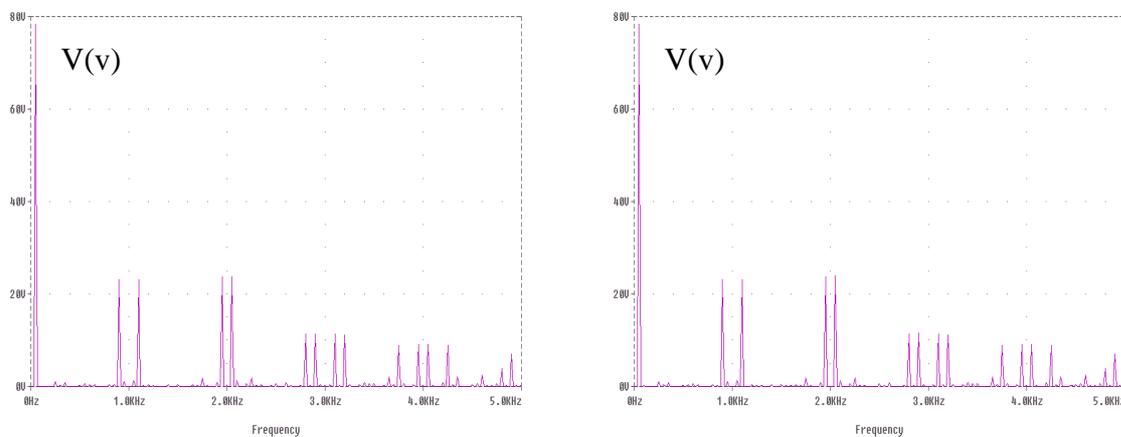
**FigureIV-9 :** Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Pspice, sans (a) et avec (b) les capacités parasites de l'onduleur de tension.



-a-

-b-

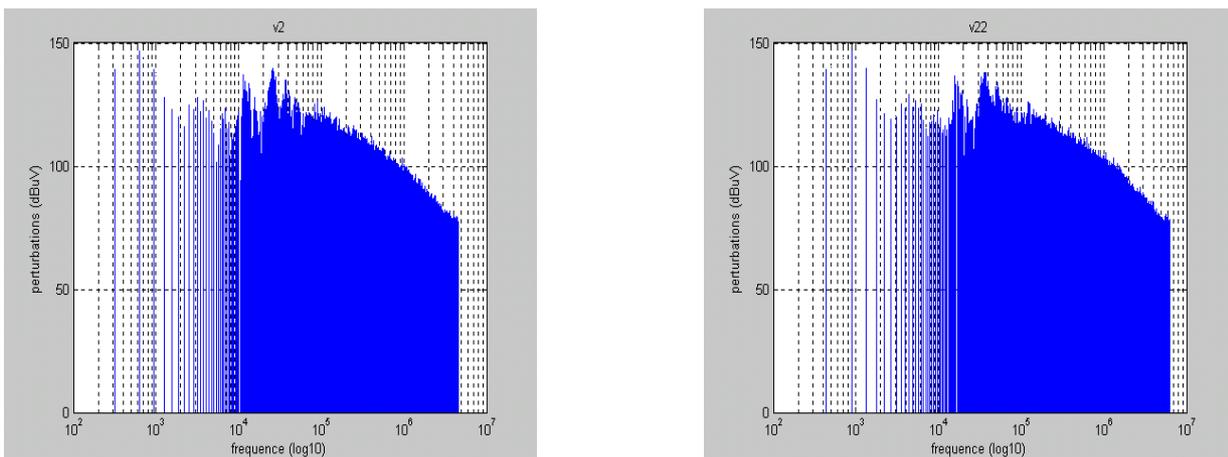
**FigureIV-10 :** Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Matlab, sans (a) et avec (b) les capacités parasites de l'onduleur de tension.



-a-

-b-

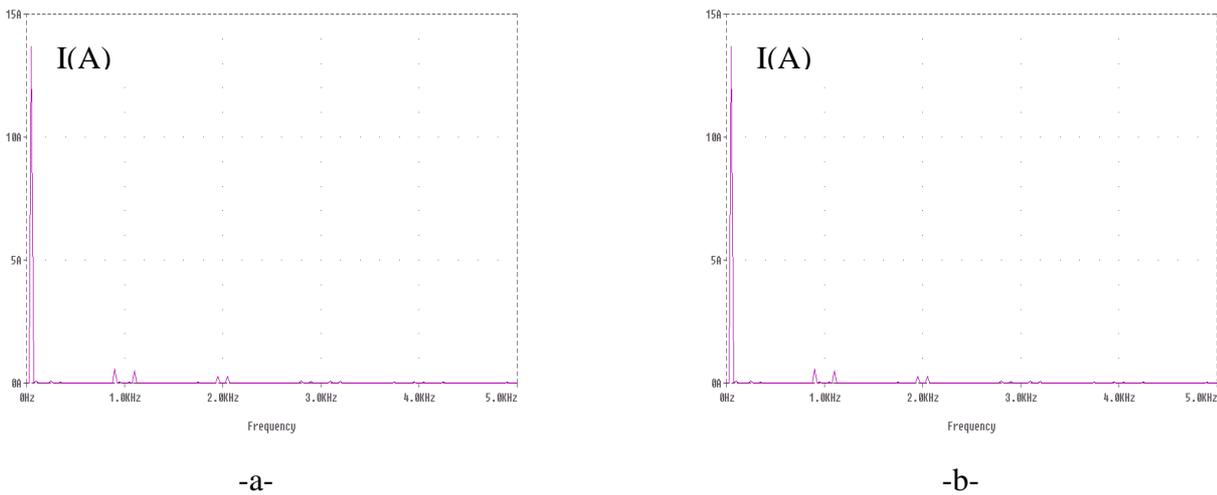
**FigureIV-11 :** Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, simulés sous Pspice, sans (a) et avec (b) les capacités parasites de l'onduleur de tension.



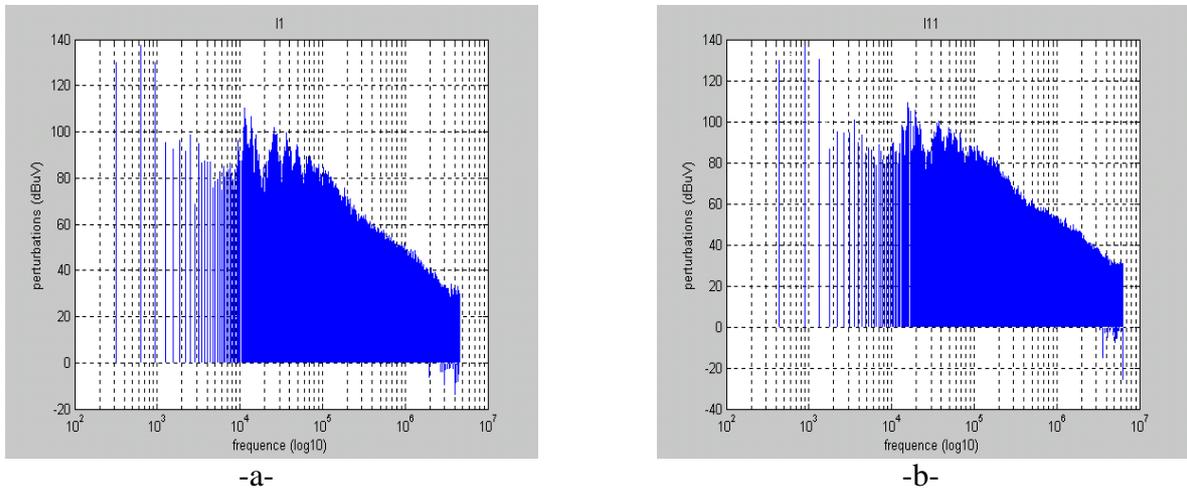
-a-

-b-

**FigureIV-12 :** Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, simulés sous Matlab, sans (a) et avec (b) les capacités parasites de l'onduleur de tension.



**FigureIV-13 :** Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Pspice, sans (a) et avec (b) les capacités parasites de l'onduleur de tension.

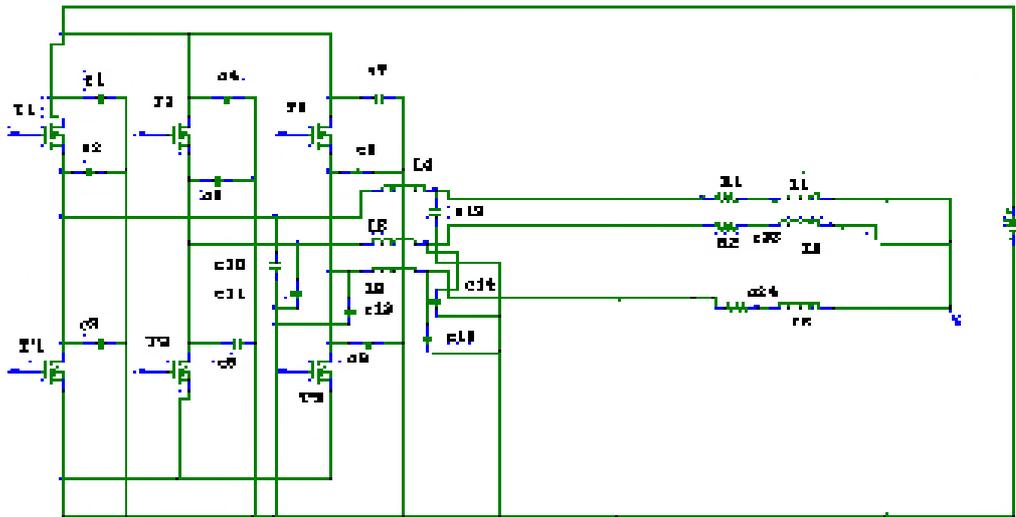


**FigureIV-14 :** Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Matlab, sans (a) et avec (b) les capacités parasites de l'onduleur de tension.

**IV-3-2 : Spectres de fréquences après l'ajout des capacités parasites de l'onduleur et de l'impédance du câble avec ses capacités parasites**

Pour se rendre compte du comportement électromagnétique de l'association onduleur-machine asynchrone, il est nécessaire d'analyser les deux spectres de fréquences, avant et après la prise en considération de l'inductance et des capacités parasites du câble. Ce dernier est de longueur  $l= 1.5m$ . Pour cela, nous avons jugé utile de comparer les spectres représentant les tensions à la sortie du bras de l'onduleur, les ddp aux bornes de la charge et les courants de charge de la machine asynchrone.

Cette comparaison consiste en une comparaison pour chaque cas des spectres de fréquences avant et après l'ajout de l'inductance et les capacités parasites du câble de valeurs  $L= 0.007H$  et  $C=228nF$ , comme le montre la figure ci-dessous (figureIV-14) :



**FigureIV-15:** Représentation de l'impédance du câble avec ses capacités parasites.

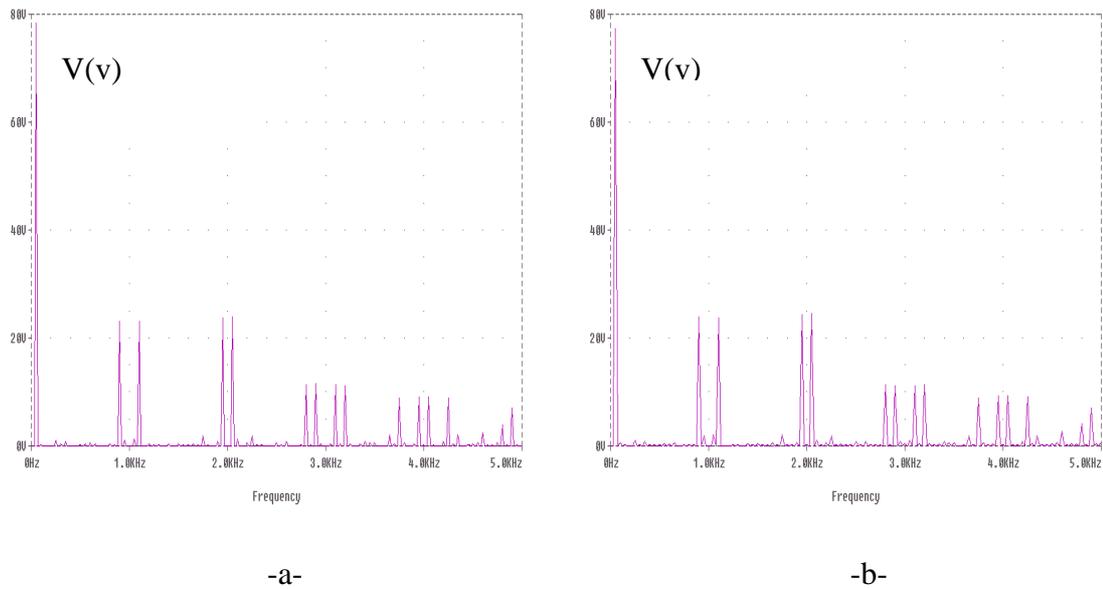
Après la représentation de l'impédance du câble et de ses capacités parasites (figureIV-14), la simulation sous Matlab des perturbations électromagnétiques a abouti aux résultats donnés par les figuresIV-16, IV-18 et IV-20 représentant respectivement les spectres correspondants à : la tension à la sortie de l'onduleur (bras1), la tension aux bornes de la charge (phase1) et le courant de charge.

En faisant la comparaison entre les spectres des deux cas, avant et après l'ajout de l'impédance et des capacités parasites du câble, on remarque que leur ajout a contribué à :

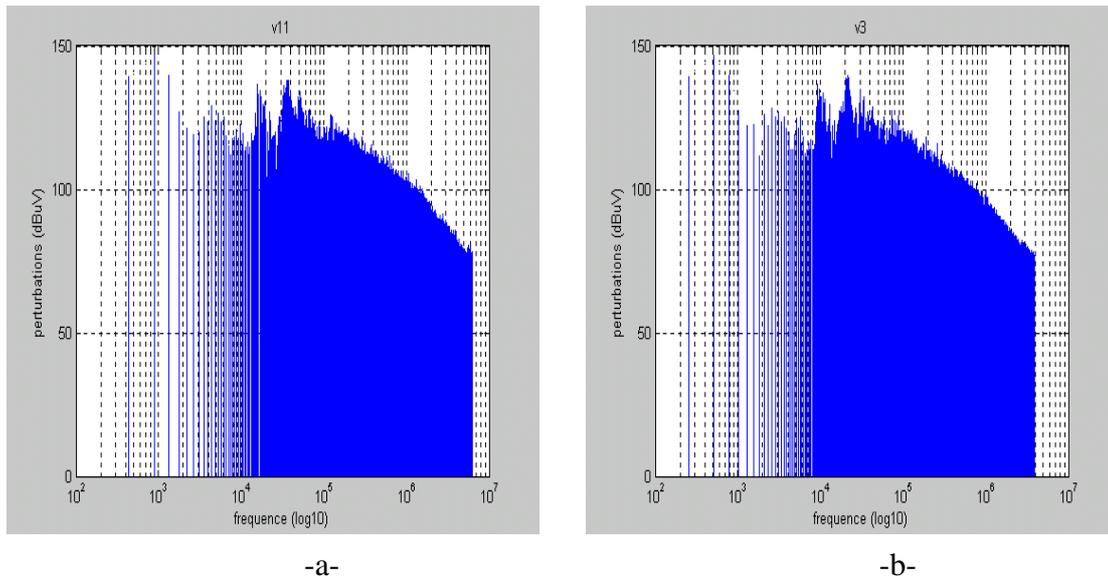
- un recul des raies vers les fréquences les plus basses et une réduction de la plage des spectres.
- une atténuation des raies des spectres.

Les figuresIV-16, IV-18 et IV-20 simulées sous Pspice nous laissent voir, comme pour le premier cas, le regroupement des premiers harmoniques autour de la fréquence de la porteuse et les amplitudes très faibles des harmoniques de courants correspondants.

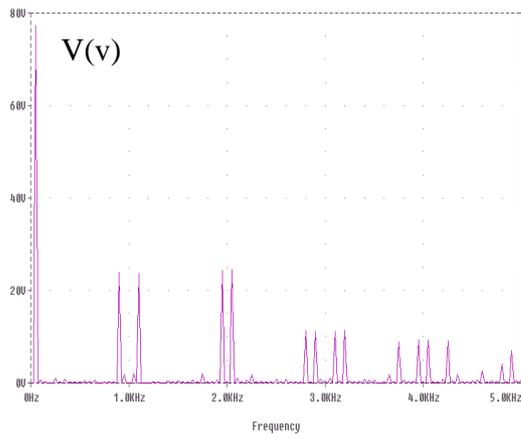
On remarque qu'excepté le cas de la tension à la sortie de l'onduleur où l'amplitude du fondamental a diminué, ce dernier et les harmoniques de haut rang sont légèrement supérieurs dans le cas de l'application de l'impédance et des capacités parasites du câble.



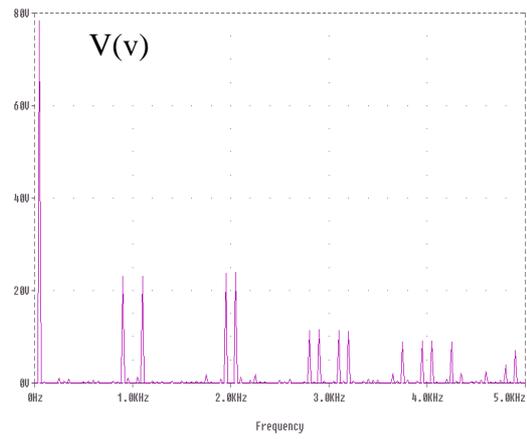
**FigureIV-16 :** Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) l'ajout de l'impédance et des capacités parasites du câble d'alimentation.



**FigureIV-17 :** Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) l'ajout de l'impédance et des capacités parasites du câble d'alimentation.

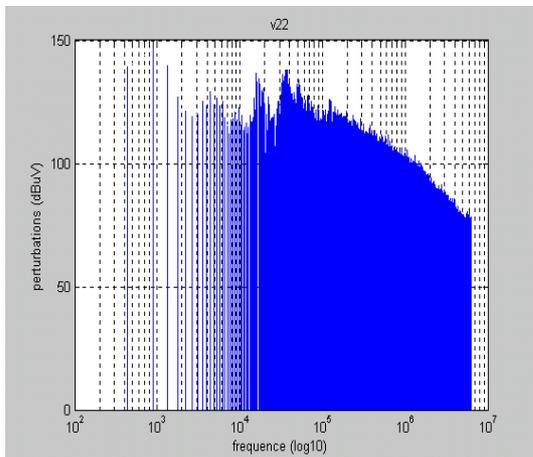


-a-

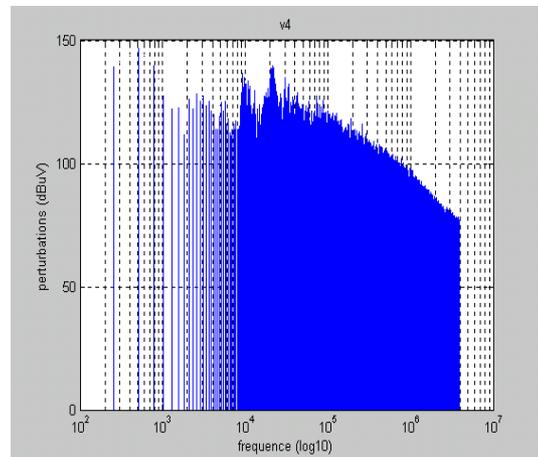


-b-

**FigureIV-18:** Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) l'ajout de l'impédance et des capacités parasites du câble d'alimentation.

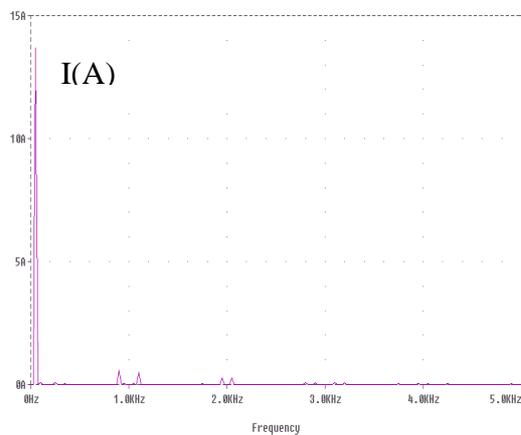


-a-

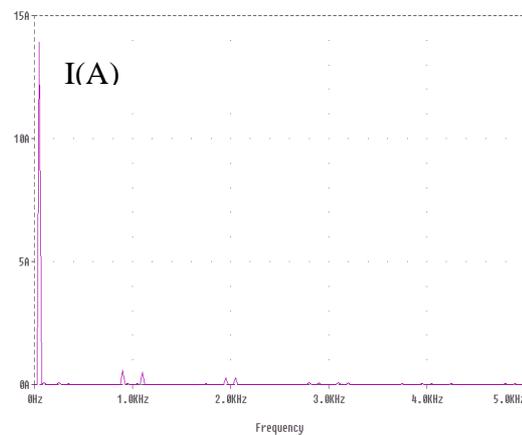


-b-

**FigureIV-19 :** Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) l'ajout de l'impédance et des capacités parasites du câble d'alimentation.

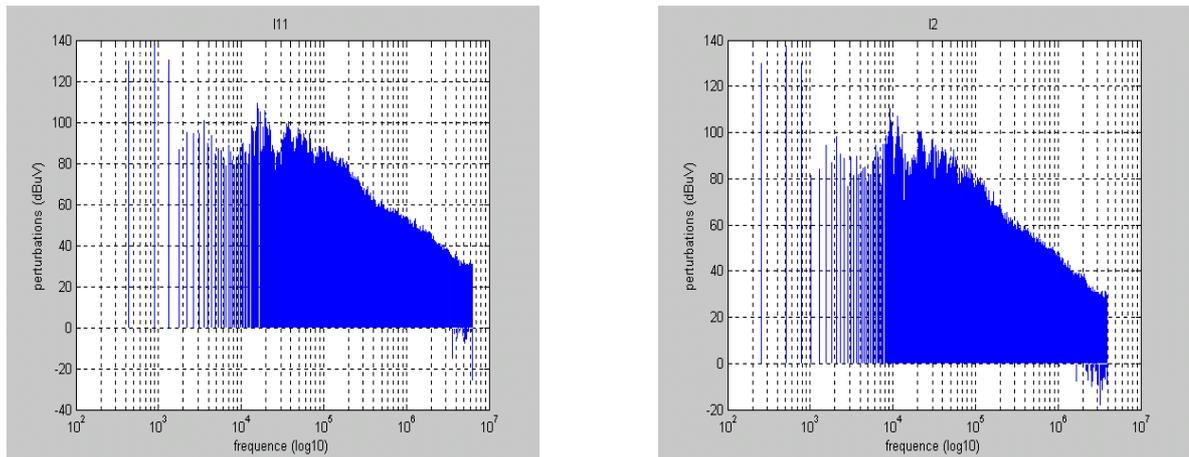


-a-



-b-

**FigureIV-20 :** Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) l'ajout de l'impédance et des capacités parasites du câble d'alimentation.

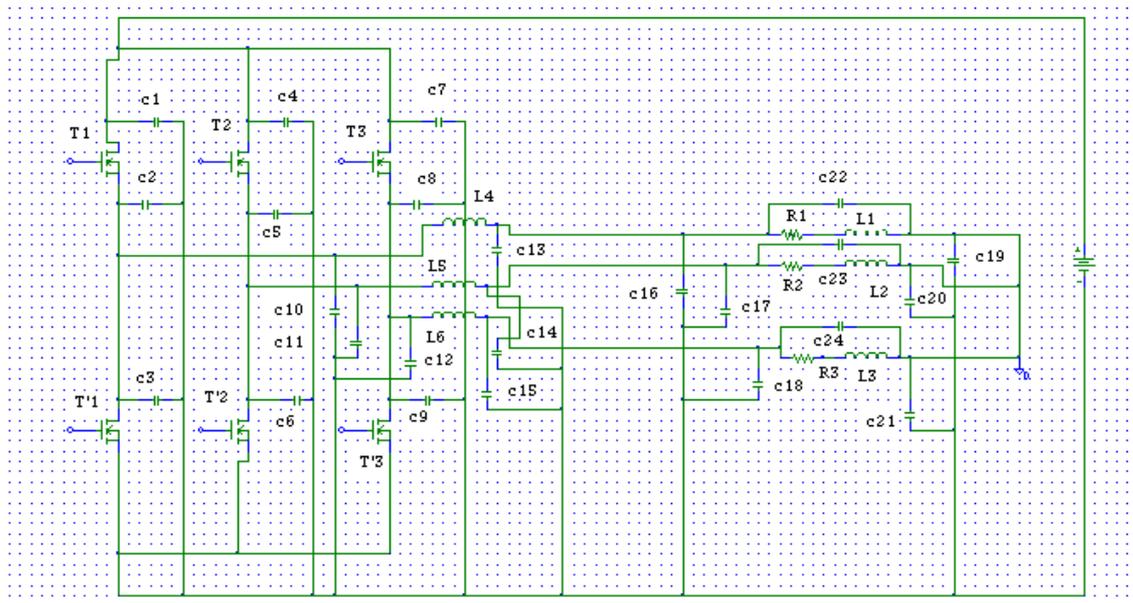


-a-

-b-

**FigureIV-21 :** Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) l'ajout de l'impédance et des capacités parasites du câble d'alimentation.

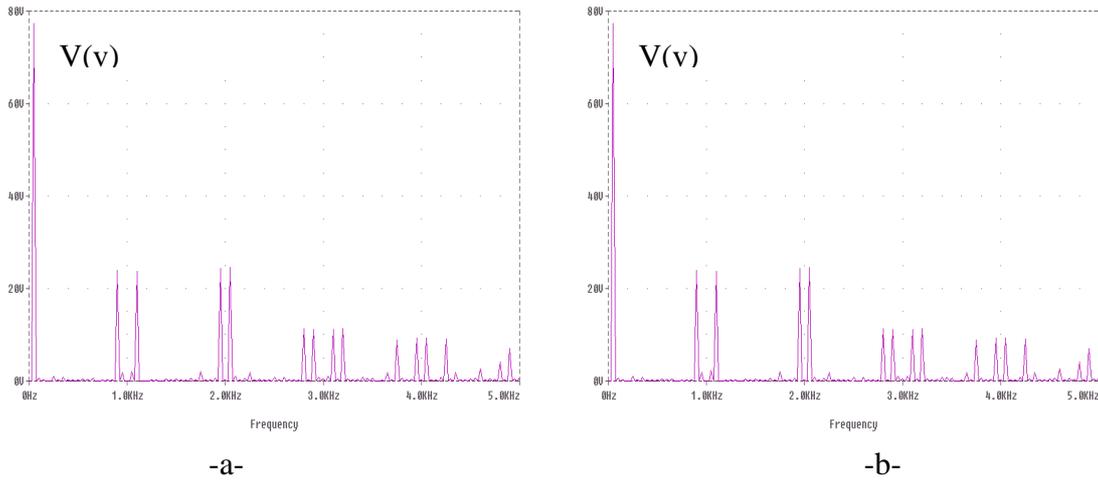
**IV-3-3 : Spectres de fréquences après l'ajout des capacités parasites de l'onduleur, de l'impédance du câble avec ses capacités parasites ainsi les capacités parasites de la machine asynchrone**



**FigureIV-22 :** Représentation de l'association onduleur-câble-MAS après l'ajout des capacités parasites de la machine.

Le déplacement des spectres de fréquences vers les plus hautes fréquences, après l'ajout de toutes les capacités parasites de la machine (figureIV-22), est très nette pour tous les spectres de fréquences représentés par les figuresIV-24, IV-26 et IV-28 correspondants : à la tension à la sortie de l'onduleur, la tension aux bornes de la phase1 de la machine et le courant de charge.

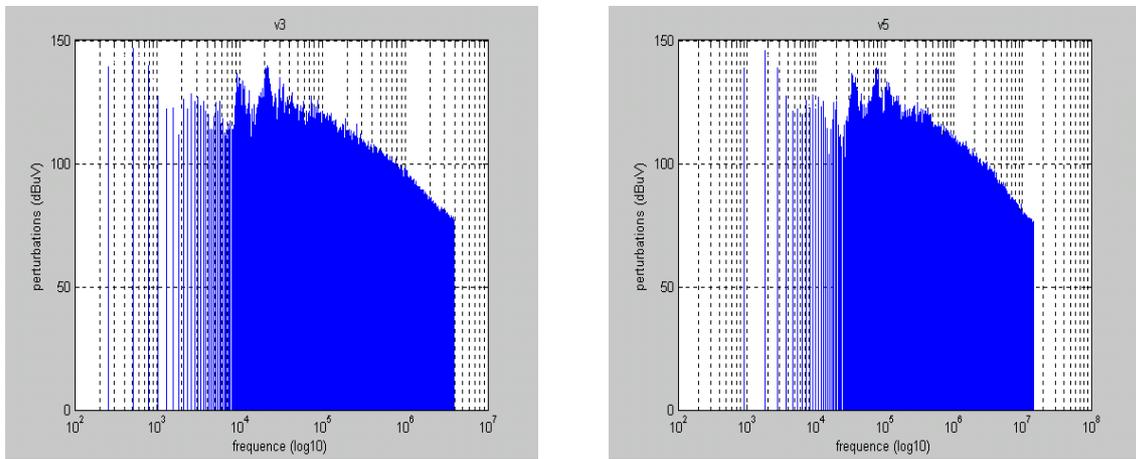
Les remarques faites pour les figures IV-9, IV-11 et IV-13, restent valables le cas des figures IV-23, IV-25 et IV-27.



-a-

-b-

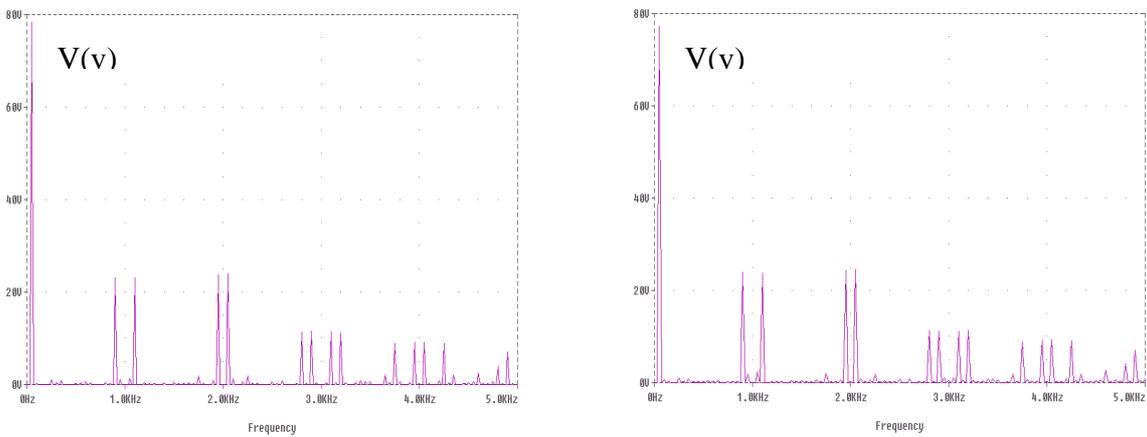
**FigureIV-23** : Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) l'ajout des capacités capacités parasites de la machine asynchrone.



-a-

-b-

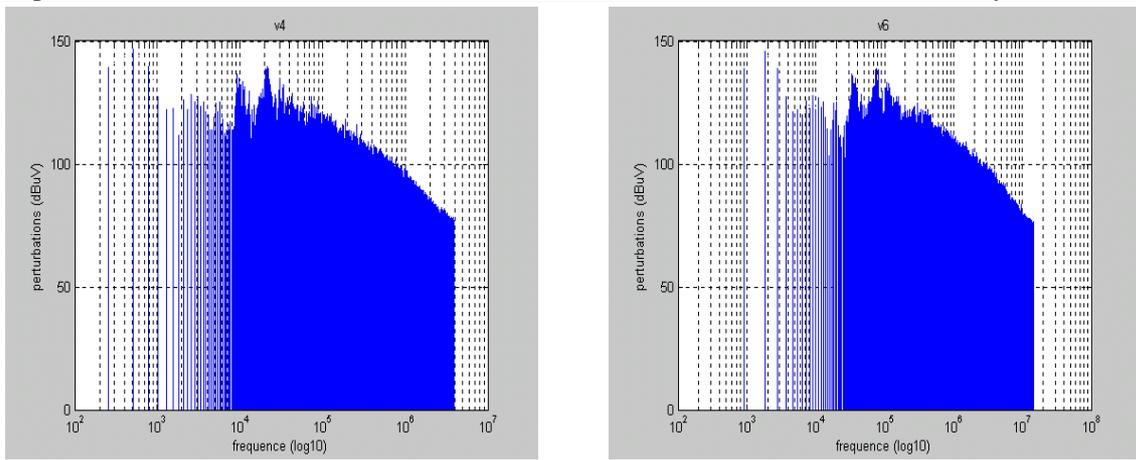
**FigureIV-24** : Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) l'ajout et des capacités parasites de la machine.



-a-

-b-

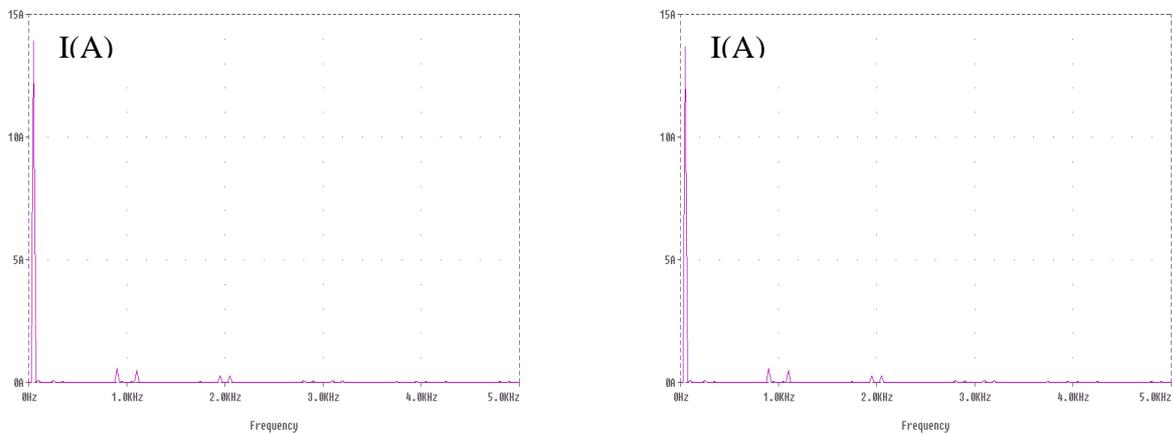
**FigureIV-25** : Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) l'ajout des capacités parasites de la machine asynchrone.



-a-

-b-

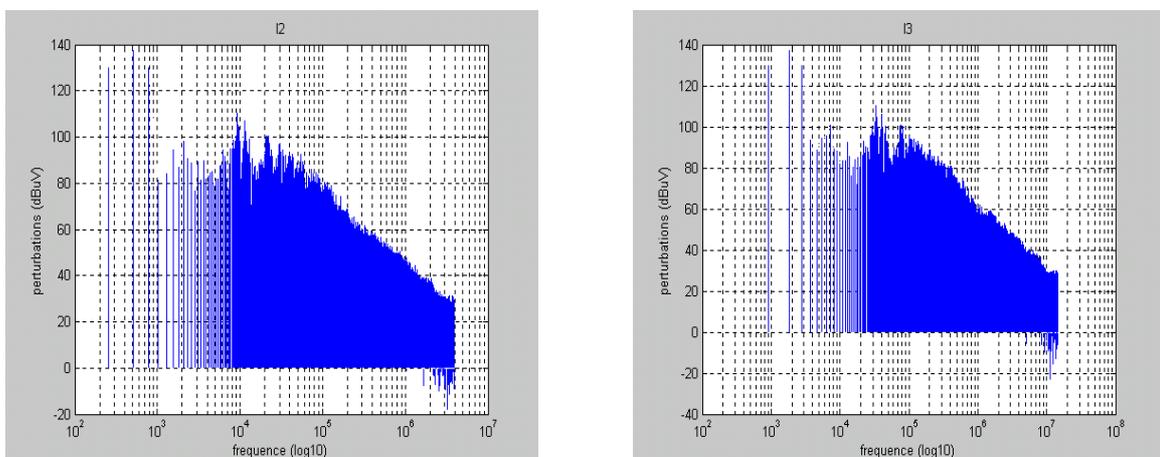
**FigureIV-26** : Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) l'ajout de des capacités parasites de la machine.



-a-

-b-

**FigureIV-27** : Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) l'ajout des capacités parasites de la machine asynchrone.

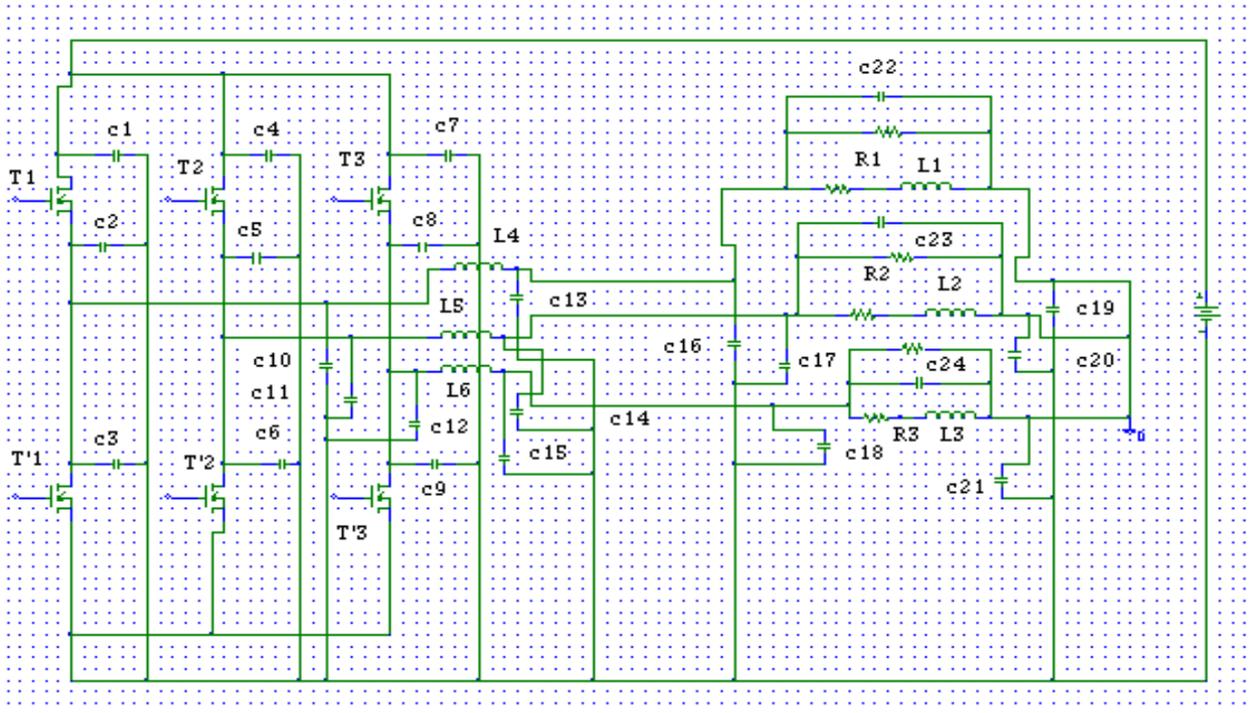


-a-

-b-

**FigureIV-28** : Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) l'ajout de des capacités parasites de la machine.

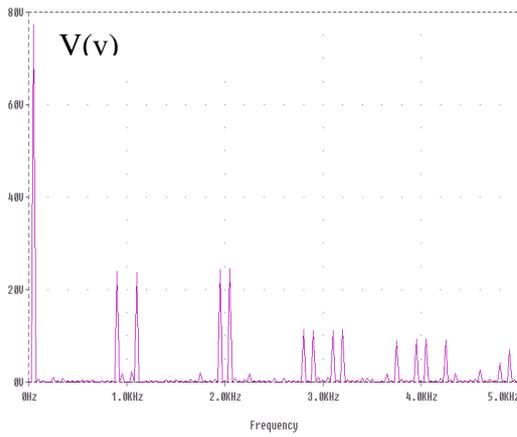
**IV-3-4 : Spectres de fréquences après l'ajout des capacités parasites de l'onduleur, de l'impédance du câble avec ses capacités parasites, ainsi que les capacités parasites et les résistances de fuites de la machine asynchrone**



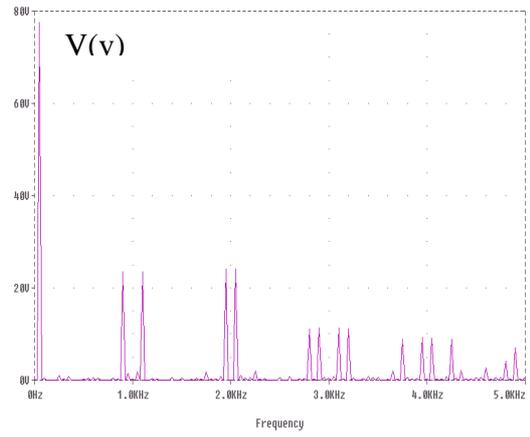
**FigureIV-29 :** Représentation des résistances de fuites de la machine asynchrone.

La résistance de fuites de la machine asynchrone est à prendre en considération, sa valeur est de quelques  $k\Omega$  ( $2k\Omega$  dans notre cas). Elle participe au filtrage des harmoniques, ceci est justifié par les figures suivantes (figureIV-30, IV-32 et IV-34) où on remarque un déplacement important des spectres d'harmoniques vers des fréquences plus hautes après l'application des résistances de fuites de la machine asynchrone.

Contrairement aux trois cas précédents de figures simulées sous Pspice, les figures IV-30, IV-32 et la figure IV-34 montrent que l'application des résistances de fuites de la machine a engendré l'augmentation de l'amplitude du fondamental et la diminution des harmoniques de haut rang. Quant aux remarques faites sur le regroupement des harmoniques et la faiblesse des amplitudes de courant, elles restent les même pour tous les cas étudiés.

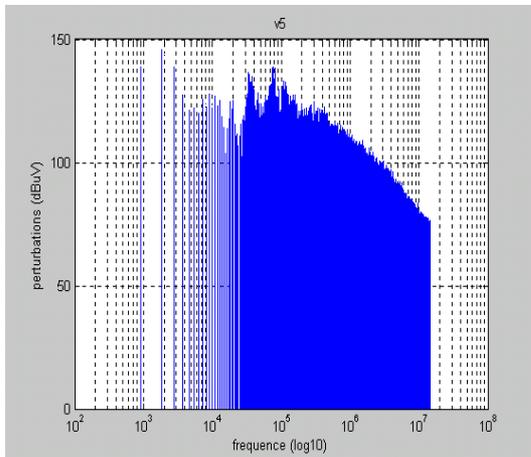


-a-

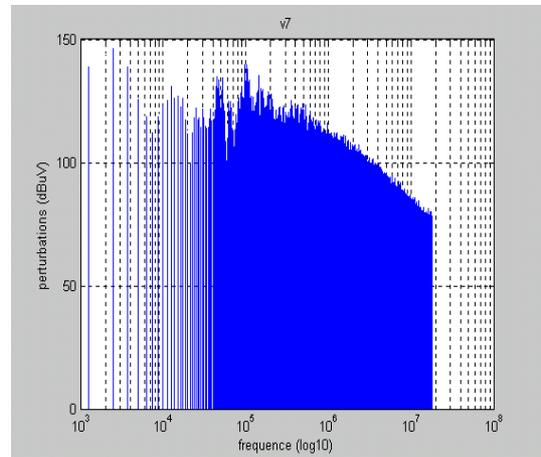


-b-

**FigureIV-30** : Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) l'ajout des résistances de fuites de la machine asynchrone.

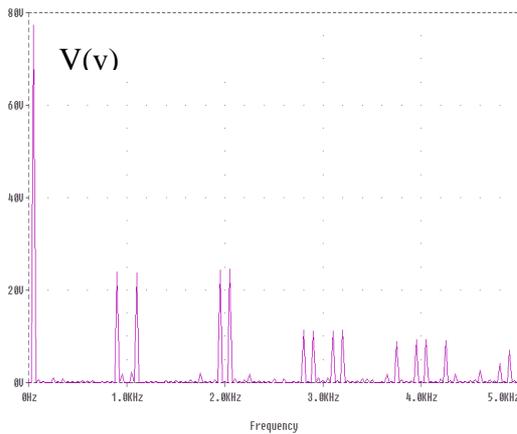


-a-

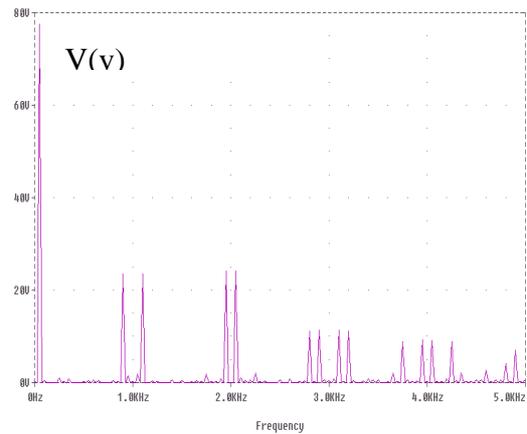


-b-

**FigureIV-31** : Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) l'ajout et des résistances de fuites de la machine.

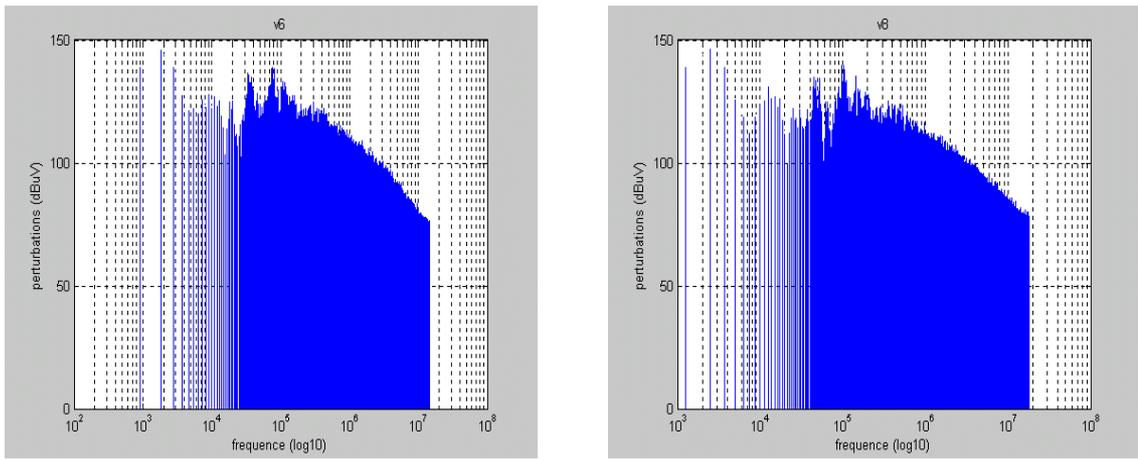


-a-

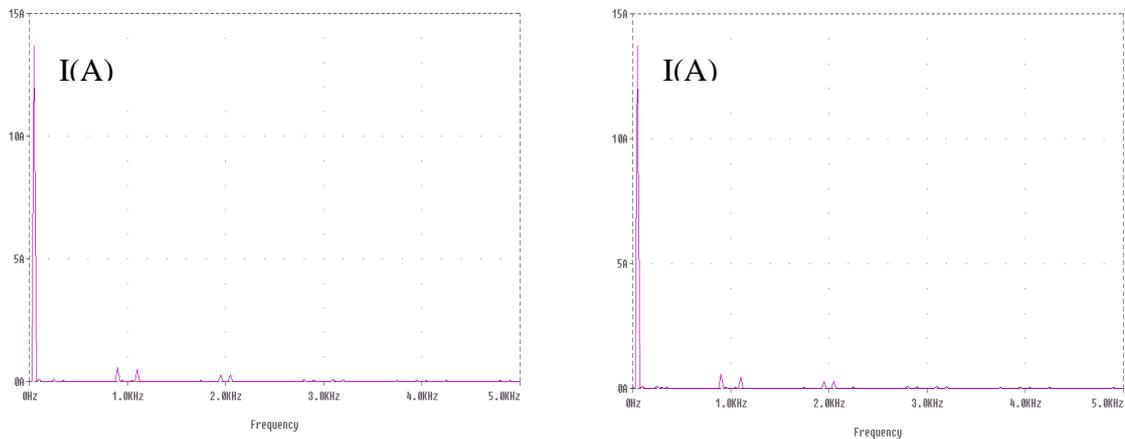


-b-

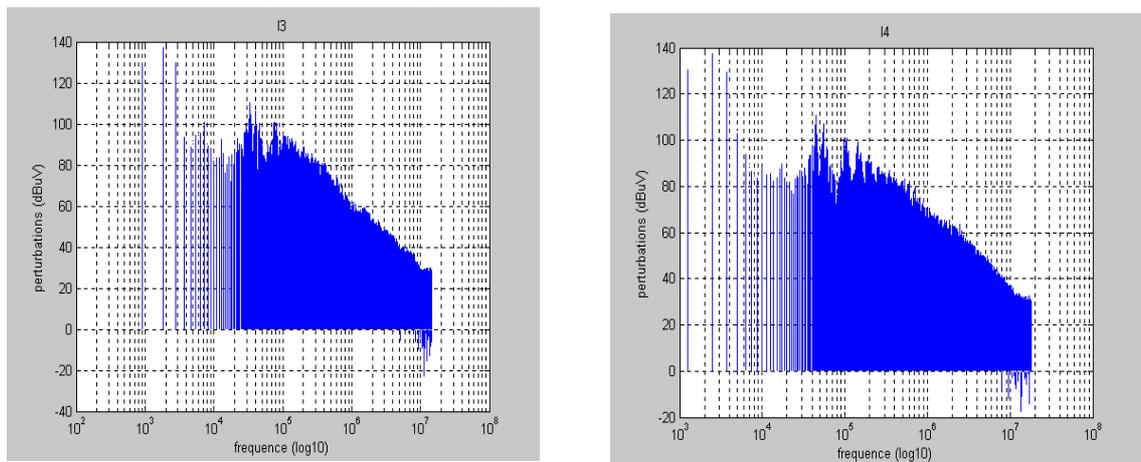
**FigureIV-32** : Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) l'ajout des résistances de fuites de la machine asynchrone.



-a- -b-  
**FigureIV-33 :** Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) l'ajout de résistances de fuites de la machine.



**FigureIV-34 :** Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Pspice, avant (à gauche) et après (à droite) l'ajout des résistances de fuites de la machine asynchrone.



-a- -b-  
**FigureIV-35 :** Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) l'ajout des résistances de fuites la machine.

Les tableaux IV-2 et IV-3 donnent un aperçu sur l'amplitude des harmoniques de courant et de tension avec et sans capacité parasite. On remarque qu'excepté le cas de l'application des résistances de fuites de la machine, l'amplitude du fondamental a diminué, par contre les harmoniques de haut rang sont légèrement supérieurs dans le cas de l'application des différentes capacités parasites.

| Harmonique de rang k | Amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur sans capacités parasites | Amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur avec capacités parasites de l'onduleur et son taux d'augmentation et de diminution | Amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur avec inductance et capacités parasites du câble d'alimentation et son taux d'augmentation et de diminution | Amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur avec capacités parasites de la machine asynchrone et son taux d'augmentation et de diminution | Amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur avec capacités parasites et résistances de fuites de la machine asynchrone et son taux d'augmentation et de diminution |
|----------------------|--|--|--|---|--|
| N°                   | V(v)   | V(v)   | V(v)   | V(v)  | V(v)   |
| 1                    | 78.366   | 78.338 (-0.03% )   | 77.271 (-1.36%)  | 77.232 (-0.05%)   | 77.556 (+0.41%)  |
| 18                   | 23.107   | 23.131 (+0.1%)   | 23.844 (+3.08%)  | 23.874 (+0.12%)   | 23.534 (-1.42%)  |
| 22                   | 23.118   | 23.072 (+0.19%)  | 23.745 (+2.91%)  | 23.780 (+0.14%)   | 23.460 (-1.34%)  |
| 39                   | 23.715   | 23.674 (+0.17%)  | 24.314 (+2.7%)   | 24.365 (+0.2%)  | 24.080 (-1.16%)  |
| 41                   | 23.752   | 23.796 (+0.18%)  | 24.455 (+2.76%)  | 24.471 (+0.06%)   | 24.161 (-1.26%)  |
| 56                   | 11.279   | 11.244 (-0.31%)  | 11.248 (+0.03%)  | 11.249 (+0.01%)   | 11.174 (-0.66%)  |
| 48                   | 11.377   | 11.462 (+0.74%)  | 11.078 (-3.35%)  | 11.061 (-0.15%)   | 11.297 (+2.13%)  |
| 62                   | 11.405   | 11.415 (+0.08%)  | 11.147 (-2.34%)  | 11.127 (-0.17%)   | 11.364 (+2.12%)  |
| 64                   | 11.139   | 11.168 (+0.26%)  | 11.293 (+1.11%)  | 11.288 (-0.04%)   | 11.143 (-1.28%)  |
| 75                   | 8.8343   | 8.7993 (-0.39%)  | 8.7993 (+1.48%)  | 8.9358 (+0.06%)   | 8.9470 (+0.12%)  |
| 79                   | 9.0730   | 9.1332 (+0.66%)  | 9.3047 (+1.87%)  | 9.3157 (+0.11%)   | 9.1935 (-1.31%)  |
| 81                   | 9.0295   | 8.9777 (-0.57%)  | 9.2778 (+3.34%)  | 9.2859 (+0.08%)   | 9.1221 (-1.76%)  |
| 85                   | 8.7771   | 8.7669 (-0.11%)  | 8.9575 (+2.17%)  | 8.9907 (+0.37%)   | 8.8567 (-1.49%)  |
| 98                   | 3.9456   | 3.9822 (+0.32%)  | 4.0902 (+2.71%)  | 4.1117 (+0.52%)   | 4.0404 (-1.73%)  |
| 102                  | 6.8975   | 6.9112 (+0.19%)  | 7.0547 (+2.07%)  | 7.0739 (+0.27%)   | 7.0588 (-0.21%)  |

**Tableau IV-2 :** Comparaison des amplitudes des harmoniques de tension (cas de la tension à la sortie de l'onduleur) avec et sans capacités parasites.

| Harmonique<br>de rang k | Amplitude du<br>courant $I_{ch}$ et de la<br>tension $V_{ch}$ aux<br>bornes de la<br>charge sans<br>capacités<br>parasites |             | Amplitude du<br>courant $I_{ch}$ et de la<br>tension $V_{ch}$ aux<br>bornes de la<br>charge avec<br>capacités<br>parasites de<br>l'onduleur |             | Amplitude du<br>courant $I_{ch}$ et de la<br>tension $V_{ch}$ aux<br>bornes de la<br>charge avec<br>inductance et<br>capacités<br>parasites du câble<br>d'alimentation |             | Amplitude du<br>courant $I_{ch}$ et de la<br>tension $V_{ch}$ aux<br>bornes de la<br>charge avec<br>capacités<br>parasites de la<br>machine<br>asynchrone |             |
|-------------------------|--|-------------|---|-------------|--|-------------|---|-------------|
|                         | N°   | $I_{ch}(A)$ | $V_{ch}(v)$   | $I_{ch}(A)$ | $V_{ch}(v)$  | $I_{ch}(A)$ | $V_{ch}(v)$   | $I_{ch}(A)$ |
| 1                       | 13.69  | 77.1        | 13.689  | 77.089      | 13.691   | 77.095      | 13.678  | 77.022      |
| 18                      | 0.597051   | 23.851      | 0.597163  | 23.857      | 0.597068   | 23.858      | 0.597708  | 23.873      |
| 22                      | 0.487871   | 23.751      | 0.48789   | 23.754      | 0.487989   | 23.753      | 0.488617  | 23.78       |
| 39                      | -  | 24.316      | -   | 24.317      | -  | 24.269      | -   | 24.337      |
| 41                      | -  | 24.459      | -   | 24.459      | -  | 24.41       | -   | 24.51       |
| 56                      | -  | 11.249      | -   | 11.241      | -  | 11.25       | -   | 11.25       |
| 58                      | -  | 11.048      | -   | 11.06       | -  | 11.062      | -   | 11.061      |
| 62                      | -  | 11.145      | -   | 11.143      | -  | 11.138      | -   | 11.126      |
| 64                      | -  | 11.287      | -   | 11.289      | -  | 11.289      | -   | 11.301      |
| 75                      | -  | 8.933       | -   | 8.9299      | -  | 8.9354      | -   | 8.9263      |
| 79                      | -  | 9.3034      | -   | 9.3062      | -  | 9.2935      | -   | 9.3312      |
| 81                      | -  | 9.2868      | -   | 9.29        | -  | 9.273       | -   | 9.2907      |
| 85                      | -  | 8.966       | -   | 8.9676      | -  | 8.9714      | -   | 8.9956      |
| 98                      | -  | 7.0565      | -   | 7.0545      | -  | 7.0674      | -   | 7.074       |
| 102                     | -  | 7.0312      | -   | 7.0295      | -  | 7.0223      | -   | 7.0438      |

**Tableau IV-3** : Comparaison des amplitudes des harmoniques de courant et tension (cas de la tension aux bornes de la charge) avec et sans capacités parasites.

Le tableau IV-3 nous permet de calculer le taux d'augmentation et de diminution de l'amplitude pour chaque cas d'harmonique.

| Harmonique de rang $k$ | Taux d'augmentation et de diminution de l'amplitude du courant $I_{ch}$ et de la tension $V_{ch}$ aux bornes de la charge avec capacités parasites de l'onduleur |              | Taux d'augmentation et de diminution de l'amplitude du courant $I_{ch}$ et de la tension $V_{ch}$ aux bornes de la charge avec inductance et capacités parasites du câble d'alimentation |              | Taux d'augmentation et de diminution de l'amplitude du courant $I_{ch}$ et de la tension $V_{ch}$ aux bornes de la charge avec capacités parasites de la machine asynchrone |              |
|------------------------|--|--------------|--|--------------|---|--------------|
|                        | $I_{ch}$ (A)   | $V_{ch}$ (v) | $I_{ch}$ (A)   | $V_{ch}$ (v) | $I_{ch}$ (A)  | $V_{ch}$ (v) |
| 1                      | -0.01  | -0.01        | +0.01  | +0.01        | -0.09   | -0.09        |
| 18                     | +0.01  | +0.02        | -0.01  | +0.004       | +0.10   | +0.06        |
| 22                     | +0.003   | +0.01        | +0.02  | -0.004       | +0.12   | +0.11        |
| 39                     | -  | +0.004       | -  | -0.19        | -   | +0.28        |
| 41                     | -  | -            | -  | -0.2         | -   | +0.4         |
| 56                     | -  | -0.07        | -  | +0.08        | -   | -            |
| 58                     | -  | +0.1         | -  | +0.01        | -   | -0.01        |
| 62                     | -  | -0.01        | -  | -0.04        | -   | -0.1         |
| 64                     | -  | +0.01        | -  | -            | -   | +0.1         |
| 75                     | -  | -0.03        | -  | +0.06        | -   | -0.1         |
| 79                     | -  | +0.03        | -  | -0.13        | -   | +0.4         |
| 81                     | -  | +0.03        | -  | -0.18        | -   | +0.19        |
| 85                     | -  | +0.01        | -  | +0.04        | -   | +0.26        |
| 98                     | -  | -0.02        | -  | +0.18        | -   | +0.09        |
| 102                    | -  | -0.02        | -  | -0.1         | -   | +0.3         |

**Tableau IV-3** :Taux d'augmentation et de diminution des amplitudes des harmoniques de courant et tension après l'ajout des capacités parasites.

## IV-4 : Conclusion

Nous avons consacré ce quatrième chapitre à la modélisation de l'association onduleur de tension-câble d'alimentation-machine asynchrone.

Pour l'onduleur et le câble, seuls les couplages capacitifs entre les transistors et le châssis (relié à la terre ) ainsi qu'entre le câble et le châssis sont prioritairement représentés. Il ne peut être le cas pour la machine asynchrone où les pertes induites dans le stator et les couplages capacitifs parasites inter-spires sont aussi considérables.

Dans notre étude, nous avons opté pour l'approche temporelle pour la simulation de toute perturbation. Notre première contrainte était d'utiliser un modèle circuit dessiné à être simulé par un logiciel de type Pspice.

La prise en compte de toute capacité parasite ainsi que la résistance de fuites de la machine asynchrone, nous a conduit à des résultats satisfaisants se résumant en un filtrage induit par le système.

# **Chapitre V**

## **Alimentation d'une machine asynchrone avec défaut**

## Introduction :

De nombreuses défaillances peuvent apparaître sur les machines asynchrones. Elles peuvent être électriques, mécaniques ou magnétiques.

Leurs causes très variées, sont classées en trois groupes [14].

-les initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, usures des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, problèmes d'isolement électrique, surtension transitoire....

-les contributeurs aux défauts : surcharge fréquente, température ambiante élevée, ventilation défaillante, humidité, fortes vibrations, vieillissement....

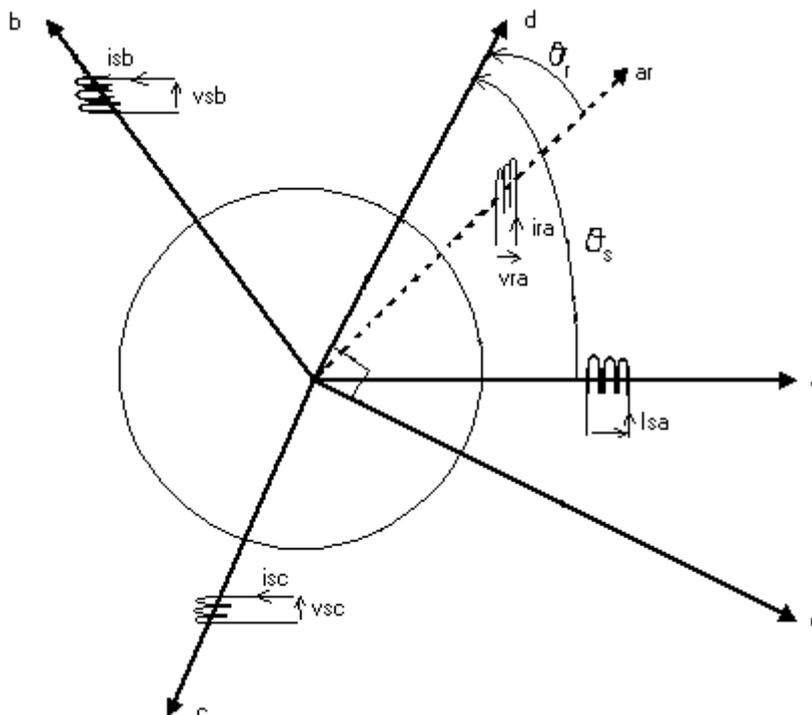
-les défauts sous jacents et erreurs humaines : défaut de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, absence de maintenance....

Ces différentes causes peuvent provoquer une dégradation des performances ou des arrêts intempestifs du système.

## V-1- Modèle de la machine asynchrone :

Une machine asynchrone est constituée essentiellement de deux armatures coaxiales à champ tournant : un stator dont les encoches logent trois enroulements, et un rotor assimilable à trois enroulements identiques parfaitement symétriques et en court-circuit.

Les enroulements d'une machine asynchrone peuvent être représentés par le schéma de la figure suivante (figureV1).



**FigureV-1 :** Représentation des enroulements de la machine dans le repère triphasé  $a, b, c$ .

En respectant quelques hypothèses (machine non saturée, répartition du flux sur la périphérie d'entrefer), nous pouvons écrire les relations liant les flux et les courants des différentes phases comme suit :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \\ M_{rs} \cos \theta & M_{rs} \cos(\theta - 2\pi/3) & M_{rs} \cos(\theta - 4\pi/3) \\ M_{rs} \cos(\theta - 4\pi/3) & M_{rs} \cos \theta & M_{rs} \cos(\theta - 2\pi/3) \\ M_{rs} \cos(\theta - 2\pi/3) & M_{rs} \cos(\theta - 4\pi/3) & M_{rs} \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

avec :

- a, b, c représentent respectivement les indices des phases a, b et c,
- s et r représentent les indices du stator et du rotor,
- $\theta$  : angle formé par deux axes d'une phase statorique et d'une phase rotorique homologues.

### V-2-Transformation de Park :

Dans le cas de la transformation de Park, les enroulements disposés selon les axes a, b, c comme le montre la figure précédente (figureV-1), seront disposées selon deux axes perpendiculaires d et q.

La matrice de transformation [T] est définie comme suit :

$$[T] = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Ainsi on pourra écrire pour les courants (is,r), les tensions (vs,r) et les flux  $\varphi_{s,r}$  :

$$\begin{aligned} [i_{s,r} dqo] &= [T][i_{s,r} abc] \\ [v_{s,r} dqo] &= [T][v_{s,r} abc] \\ [\varphi_{s,r} dqo] &= [T][\varphi_{s,r} abc] \end{aligned}$$

Les indices s, r, d, q, o, a, b, c désignent respectivement : stator, rotor, direct quadrature, homopolaire, phase a, phase b et phase c.

### V-3-Introduction du défaut statorique :

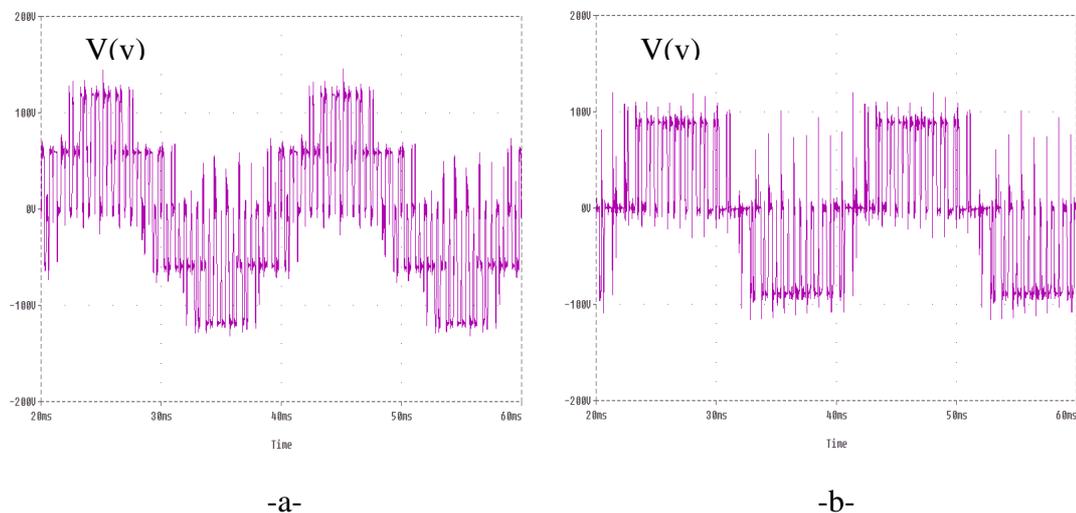
Quelque soit sa localisation : au niveau du rotor, au niveau du stator ou des enroulements à billes, le défaut conduit souvent à une perturbation du fonctionnement de la machine asynchrone, il provoque des dysfonctionnements et des pannes de cette dernière.

Des travaux de recherches réalisés dans ce sens ont montrés que plus de 35% des défauts que rencontre une machine asynchrone, sont des défauts statoriques, alors que 10% seulement représentent les défauts rotoriques.

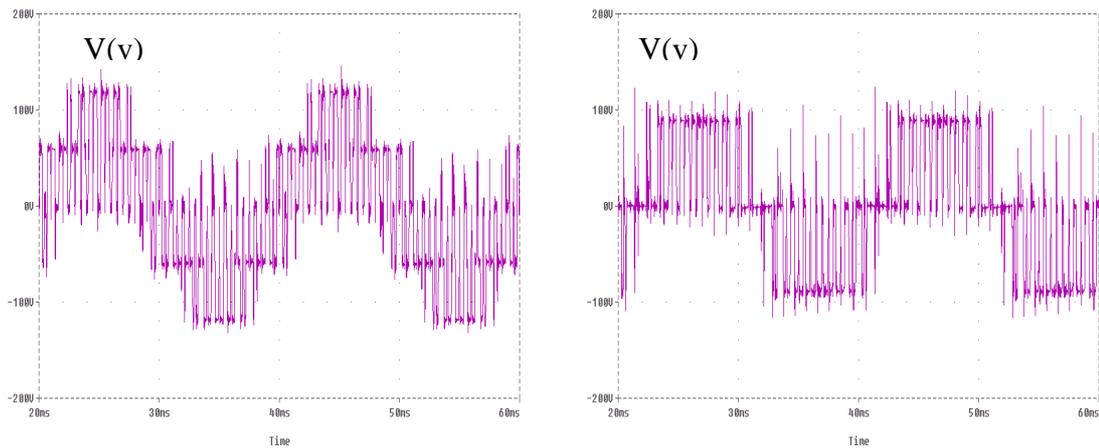
Les perturbations de la machine asynchrone étudiée dans notre cas, suite à une rupture au niveau d'une phase statorique (phase2), a conduit aux résultats des travaux de simulations qui suivent.

#### V-3-1-Simulation temporelle :

Que ce soit pour les tensions ou les courants, la différence est claire pour les deux cas de figures, avant et après le défaut. Cette différence est décrite par les figures V-2, V-3 et V-4 où on voit clairement la diminution des amplitudes des tensions et des courants. La forme des tensions ne semble plus avoir une forme sinusoïdale comme pour le premier cas (avant l'apparition du défaut), une chose remarquable pour toutes les figures.



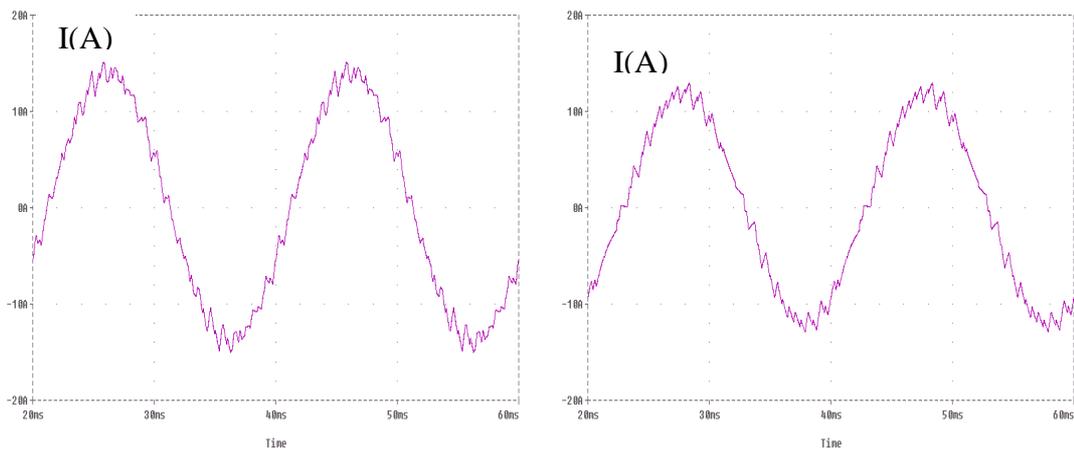
**Figure V-2 :** Tension à la sortie de l'onduleur avant (a) et après (b) l'introduction du défaut.



-a-

-b-

**FigureV-3** : Tension aux bornes de la charge avant (a) et après (b) l'introduction du défaut.



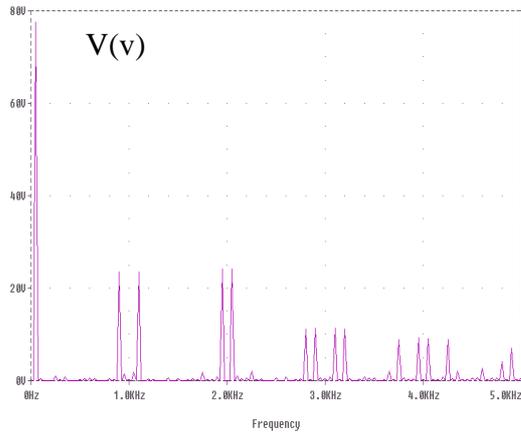
-a-

-b-

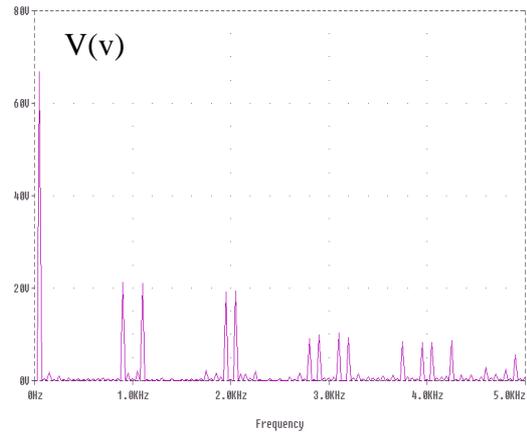
**FigureV-4** : Courant de charge avant (a) et après (b) l'introduction du défaut.

### V-3-2- Etude spectrale :

Les figures ci-après montrent que l'introduction du défaut au niveau du stator de la machine influe sur les perturbations électromagnétiques introduites par le système.

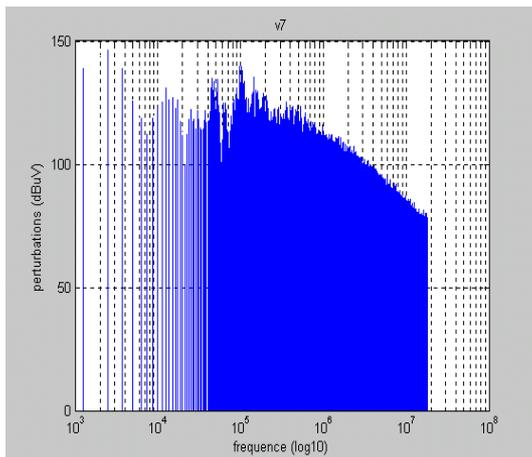


-a-

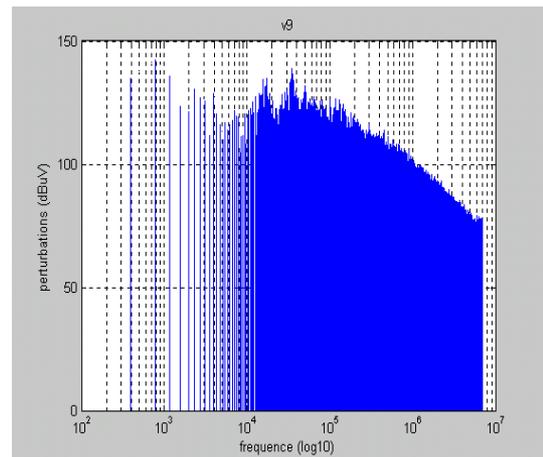


-b-

**FigureV-5 :** Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) le défaut statorique de la machine asynchrone.

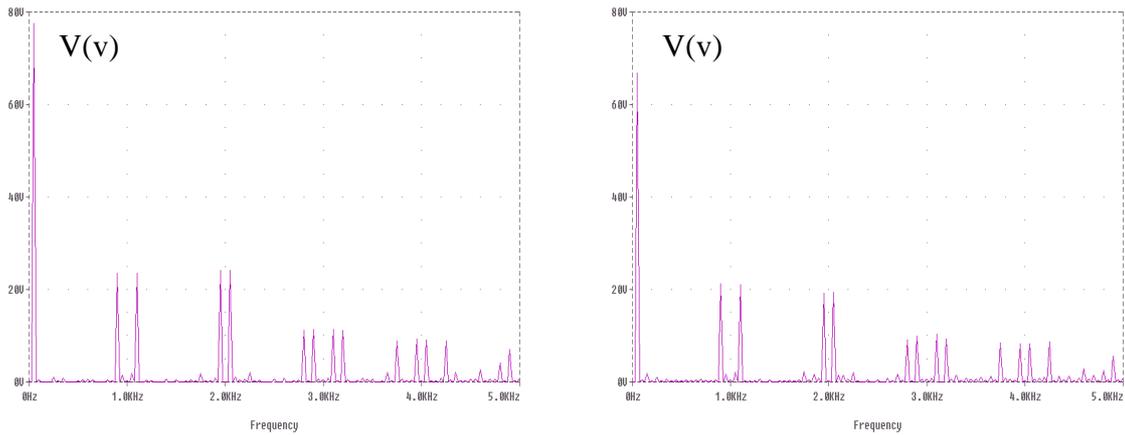


-a-



-b-

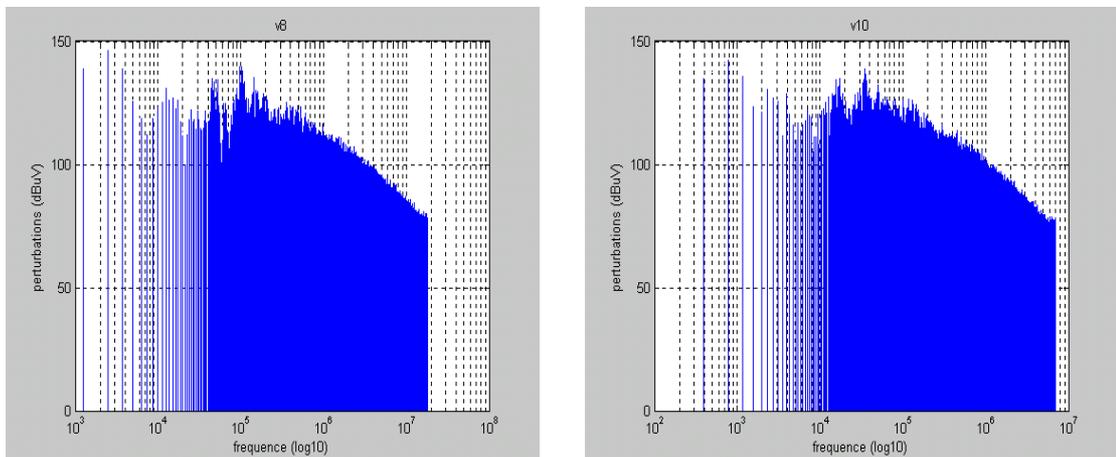
**FigureV-6 :** Spectres de fréquences de la tension à la sortie de l'onduleur, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) le défaut statorique de la machine.



-a-

-b-

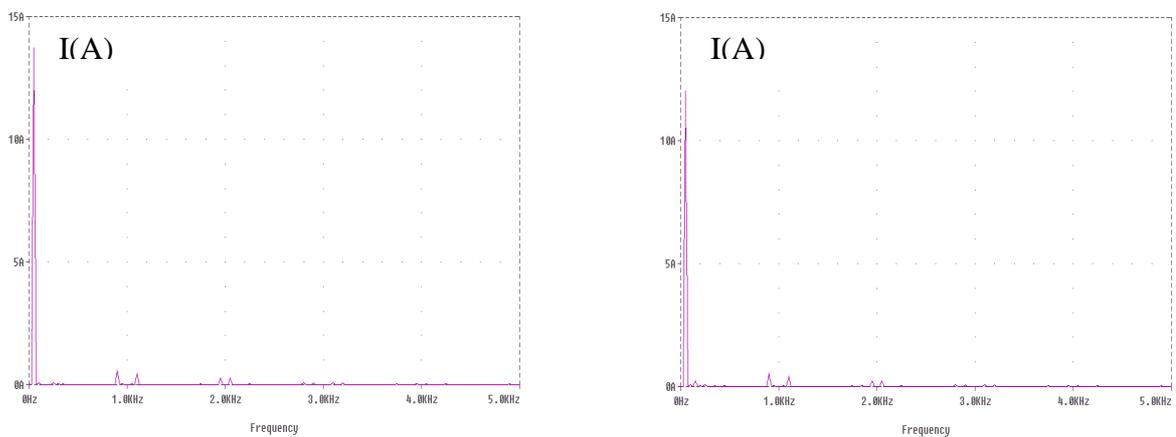
**FigureV-7 :** Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge , simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) le défaut statorique de la machine asynchrone.



-a-

-b-

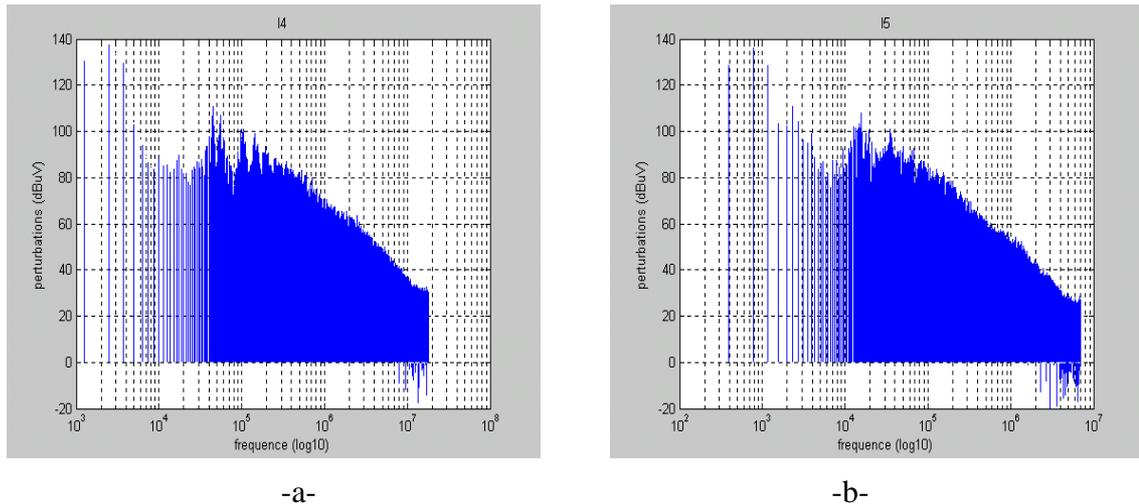
**FigureV-8 :** Spectres de fréquences de la tension aux bornes de la charge, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) le défaut statorique de la machine.



-a-

-b-

**FigureV-9 :** Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Pspice, avant (a) et après (b) le défaut statorique de la machine asynchrone.



**FigureV-10** : Spectres de fréquences du courant de charge, simulés sous Matlab, avant (a) et après (b) le défaut statorique de la machine.

En examinant les figures V-6 (spectres de tensions à la sortie de l'onduleur avant et après l'introduction du défaut), V-8 (spectres de tensions aux bornes de la charge avant et après l'introduction du défaut) et enfin V-10 (spectres des courants de charge avant et après le défaut), on remarque que le défaut a contribué à la pollution de la machine, les spectres ont reculés vers des fréquences plus basses et se sont concentrés sur une plage de fréquences plus étroite.

Les perturbations conduites sont liées aux gradients de tension. Grâce aux figuresV-5, V-7 et V-9 on remarque la diminution des amplitudes de tous les harmoniques de tension et de courant, ceci est justifié par le tableauV-1 suivant.

| N°  | Amplitude de la tension $V_s$ à la sortie de l'onduleur, de la tension $V_{ch}$ aux bornes de la charge et du courant $I_{ch}$ , avant le défaut. |              |              | Amplitude de la tension $V_s$ à la sortie de l'onduleur, de la tension $V_{ch}$ aux bornes de la charge et du courant $I_{ch}$ , après défaut. |              |              |
|-----|---|--------------|--------------|--|--------------|--------------|
|     | $V_s$ (v)   | $V_{ch}$ (v) | $I_{ch}$ (A) | $V_s$ (v)  | $V_{ch}$ (v) | $I_{ch}$ (A) |
| 1   | 77.556  | 77.556       | 13.727       | 66.806   | 66.806       | 12.0230      |
| 18  | 23.534  | 23.533       | 0.5890       | 21.168   | 21.167       | 0.53008      |
| 22  | 23.460  | 23.434       | 0.4808       | 21.102   | 21.101       | 0.43362      |
| 39  | 24.080  | 24.079       | -            | 19.247   | 19.246       | -            |
| 41  | 24.161  | 24.121       | -            | 19.368   | 19.367       | -            |
| 56  | 11.174  | 11.174       | -            | 9.1507   | 9.1507       | -            |
| 58  | 11.297  | 11.279       | -            | 9.8340   | 9.8340       | -            |
| 62  | 11.364  | 11.342       | -            | 10.2110  | 10.211       | -            |
| 64  | 11.143  | 11.128       | -            | 9.3132   | 9.3234       | -            |
| 75  | 8.9470  | 8.9467       | -            | 8.3868   | 8.3868       | -            |
| 79  | 9.1935  | 9.1984       | -            | 8.1730   | 8.1728       | -            |
| 81  | 9.1221  | 9.1145       | -            | 8.2217   | 8.2217       | -            |
| 85  | 8.8567  | 8.8561       | -            | 8.5826   | 8.5828       | -            |
| 98  | 4.0404  | 7.0626       | -            | 2.5230   | 2.5230       | -            |
| 102 | 7.0588  | 7.1123       | -            | 5.6684   | 5.6590       | -            |

**Tableau V-1** : Comparaison des amplitudes des harmoniques de tension et de courant avec et sans défaut.

Le taux de diminution des amplitudes des harmoniques de tension et de courant est donné en % par le tableau V-2.

| Harmonique de rang k | Amplitude de la tension $V_s$ à la sortie de l'onduleur, de la tension $V_{cb}$ aux bornes de la charge et du courant $I_{cb}$ , avant le défaut |           |              | Taux de diminution de l'amplitude de la tension $V_s$ à la sortie de l'onduleur, de la tension $V_{cb}$ aux bornes de la charge et du courant $I_{cb}$ , après le défaut |           |              |
|----------------------|--|-----------|--------------|--|-----------|--------------|
|                      | $N^\circ$  | $V_s$ (v) | $V_{cb}$ (v) | $I_{cb}$ (A)   | $V_s$ (%) | $V_{cb}$ (%) |
| 1                    | 77.556   | 77.556    | 13.727       | -13.86   | -13.86    | -12.41       |
| 18                   | 23.534   | 23.533    | 0.5890       | -10.05   | -10.05    | -10.00       |
| 22                   | 23.460   | 23.434    | 0.4808       | -10.05   | -9.95     | -9.81        |
| 39                   | 24.080   | 24.079    | -            | -20.07   | -20.07    | -            |
| 41                   | 24.161   | 24.121    | -            | -19.83   | -19.70    | -            |
| 56                   | 11.174   | 11.174    | -            | -18.10   | -18.10    | -            |
| 58                   | 11.297   | 11.279    | -            | -12.95   | -12.81    | -            |
| 62                   | 11.364   | 11.342    | -            | -10.14   | -9.97     | -            |
| 64                   | 11.143   | 11.128    | -            | -16.42   | -16.21    | -            |
| 75                   | 8.9470   | 8.9467    | -            | -6.26  | -6.25     | -            |
| 79                   | 9.1935   | 9.1984    | -            | -11.10   | -11.14    | -            |
| 81                   | 9.1221   | 9.1145    | -            | -9.87  | -9.79     | -            |
| 85                   | 8.8567   | 8.8561    | -            | -3.09  | -3.08     | -            |
| 98                   | 4.0404   | 7.0626    | -            | -37.55   | -64.27    | -            |
| 102                  | 7.0588   | 7.1123    | -            | -19.69   | -20.43    | -            |

**Tableau V-1** : Taux de diminution des amplitudes des harmoniques de tension et de courant

#### V-4- Conclusion :

L'alimentation de la machine asynchrone par l'intermédiaire d'un convertisseur induit des harmoniques multiples de la fréquence de commutation. Le mode défaillant rend la situation plus difficile. Cela est indiqué par les formes d'ondes des signaux ainsi que leur contenu fréquentiel vu au cours de ce chapitre lors d'une étude faite sur l'introduction d'une rupture d'une phase au niveau du stator du moteur.

## Conclusion générale

L'introduction de l'électronique dans les applications et appareillages électroniques oblige de prendre en considération la Compatibilité Electromagnétique (CEM), cette dernière représente l'une des contraintes majeures de la conception des variateurs de vitesse, il est alors impératif de prendre en compte l'environnement de ce dernier, ce qui implique la modélisation des éléments situés en amont et en aval du convertisseur (câble, moteur...). Ainsi l'estimation par la simulation des perturbations électromagnétiques générées par ce convertisseur permettra un gain considérable sur le plan économique, recherche et développement.

Tout appareil ou système fonctionnant dans un environnement électromagnétique, risque d'être dérangé par les perturbations électromagnétiques. Elles peuvent être en mode conduit ou rayonné.

La chaîne formée par l'association onduleur de tension- câble d'alimentation- machine asynchrone est exposée au problème des perturbations conduites. Ces dernières participent à la déformation des spectres de tension et de courant. Ainsi, l'introduction des capacités parasites de tout élément joue le rôle d'un filtre.

Dans ce mémoire, une partie de notre activité consistait à effectuer l'étude d'un redresseur puis d'un filtre avant d'étudier un onduleur triphasé de tension à transistors de puissance (MOS), avec une modulation sinus-triangle. Cette dernière a confirmé son utilité en améliorant le spectre d'harmoniques du courant et de la tension de sortie et par conséquent leurs formes, nous avons vu que les capacités parasites de l'onduleur introduites ont permis quant à elles de diminuer les amplitudes des raies pour chaque cas de spectres d'harmoniques étudiés.

Notre travail a porté aussi sur la modélisation CEM de la machine asynchrone et par là l'identification des couplages dominants, cette étude consistait à modéliser la chaîne formée par l'association de l'onduleur, le câble d'alimentation et la machine asynchrone.

Grâce à l'analyse spectrale, nous avons pu remarquer que la prise en compte de toutes les capacités parasites ainsi que les résistances de fuites de la machine asynchrone a conduit à des résultats satisfaisants se résumant en un filtrage induit par le système.

La dernière partie de notre travail est consacrée à l'introduction d'un défaut au niveau d'une phase de la machine. Nous avons remarqué que malgré la diminution des amplitudes de tous les harmoniques de la tension et du courant suite à la diminution des amplitudes de ces derniers (tension et courant), la rupture au niveau d'une phase statorique (phase2) a contribué à la pollution de la machine, les spectres d'harmoniques ont reculé vers des fréquences plus basses et se sont concentrées sur une plage de fréquences plus étroites.

## Références bibliographiques

- [1] R.Tahmi 'Compatibilité électromagnétique' ,cours non édité, 1<sup>er</sup> année Post-graduation, ENP
- [2] IEEE Rocomended Practice for MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY, 2 novembre 95
- [3]Mohamed Aroudj 'Contribution à l'étude des perturbations conduites dans un hacheur à commutation forcée haute fréquence' ENP, PFE, 2000.
- [4]Institut Schneider Fgrmatign/MDG 9AD 152/05-99, 'Les perturbation électromagnétiques basse et haute fréquence'.
- [5] IEEE Rocomended Practice for MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY, 1984
- [7]Richard Perdriau, 'Méthodologie de prédiction des niveaux d'émission conduite dans les circuits intégrés, à l'aide de VHDL-AMS', Thèse de doctorat, Mars 2004.
- [8]Omar Touhami, 'Contribution à l'identification paramétrique des machines électriques' Thèse de doctorat, ENP, 1994.
- [9]S.R.Bows, PH.D, C. Eng., M.I. MECH.E, F.I.E.E. and A.Midoun, B.SC, 'New PWM switching strategy for microprocessor controlled inverter drives', July 1986.
- [10] .R.Bows, PH.D, C. Eng., M.I. MECH.E, F.I.E.E. and A.Midoun, B.SC, 'Suboptimal swithing strategies for microprocessor controled PWM inverter drives', May 1985.
- [11]Bertrand Revol, 'Modélisation et optimisation des performances CEM d'une association variateur de vitesse-machine asynchrone', Thèse de doctorat, UJF Grenoble, Novembre 2003.
- [12]Vermaelen Christophe, 'Contribution à la modélisation et à la réduction des perturbations conduites dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable' Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2003.
- [13]N.Boudjerda, H.Chekireb, 'Comparaison des techniques MLI à échantillonnage régulier adaptées à l'onduleur de tension en pont alimentant un moteur asynchrone', Novembre 1994.
- [14] Roland Casimir, 'Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes', Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, Décembre 2003.

**ملخص:** يعتبر التوافق المغناطيسي عاملا هاما في دراسة محولات الطاقة الكهربائية, في هذه المذكرة نحن مهتمون بدراسة التشوهات بعد تقديمنا لبعض مفاهيم التوافق المغناطيسي و تكيف المحول. في مذكرتنا هذه اعطينا اهتماما لدراسة التشوهات الكهرومغناطيسية الموصلة الناتجة عن محول كهربائي ساكن. نرى إذا أنه من الضروري الأخذ بعين الاعتبار المحيط الذي يوجد فيه المحول مما يؤدي إلى تكيف العناصر الموصلة بهذا الأخير.

و أخيرا قمنا بإحداث خلل في أحد أطوار المحرك اللامتزامن. نتائج المحاكاة للسلسلة المكونة من المجموعة المناوب-سلك التغذية و آلة لامتزانة بدون خلل. قد فورنت بنتائج محاكاة للمجموعة المتكونة من مناوب-سلك تغذية و آلة لامتزانة مع خلل في الساكن. لقد لاحظنا ان هذا الأخير يؤدي إلى تلوث الآلة.

#### **كلمات مفتاحية:**

التوافق المغناطيسي, التكيف, التشوهات الكهرومغناطيسية, المحرك اللامتزامن, محول ساكن, خلل.

#### **Abstract:**

The electromagnetic compatibility is one of the major constraints of electric and/or electronic converters

In this memory, we have interested to a study of conducted disturbances generated by a static converter.

After the study of Electromagnetic Compatibility and the modeling of a three-phase PWM inverter, we have interested in this memory to the study of conducted disturbances generated by a static converter. It is then imperative to take into account the environment of the converter which implies the modeling of cables and motor.

The result of the simulation formed by the association of three-phase PWM inverter-power supply cable and asynchronous machine without default were compared to the simulation's result of the association three-phase PWM inverter- power supply cable and asynchronous machine with stator default . We have noticed that the latest had contributed in the machine's pollution.

#### **Key- words:**

Electromagnetic Compatibility, Modeling, Electromagnetic pollution, Asynchronous machine, Static converters, default.

#### **Résumé:**

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'une des contraintes majeures des structures électriques et/ou électroniques.

Après une présentation de la compatibilité électromagnétique, et le dimensionnement d'un onduleur triphasé, nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à l'étude des perturbations électromagnétiques conduites générées par un convertisseur statique.

Il est alors nécessaire de prendre en considération l'environnement du convertisseur, ce qui implique le dimensionnement des éléments situés en amont de ce dernier (câbles, machine asynchrone).

Les résultats de la simulation de la chaîne formée par l'association de l'onduleur, câble d'alimentation et de la machine asynchrone sans défaut, ont été comparés aux résultats de simulation de l'association onduleur-câble d'alimentation-machine asynchrone avec défaut statorique. Nous avons constaté que ce dernier a contribué à la pollution de la machine.

#### **Mot clés :**

Compatibilité électromagnétique, Dimensionnement, Perturbations électromagnétiques, Machine asynchrone, Convertisseur statique, défaut.

## Références bibliographiques

[1] R.Tahmi, cours non édités, ENP

[2] IEEE Rocomended Practice for MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY, 2 novembre 95

[3] Arroudj Mohamed 'Contribution à l'étude des perturbations conduites dans un hacheur à commutation forcée haute fréquence', Thèse de magister ENP2000.

[4]Institut Schneider Fgrmatign/MDG 9AD 152/05-99, 'Les perturbation électromagnétiques basse et haute fréquence'.

[5] IEEE Rocomended Practice for MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY, 1984

[7]Richard Perdriau, 'Méthodologie de prédiction des niveaux d'émission conduite dans les circuits intégrés, à l'aide de VHDL-AMS', Thèse de doctorat, Mars 2004.

[8] Omar Touhami 'Contribution à l'identification paramétriques des machines électriques', Thèse de doctorat, ENP1994.

[9]S.R.Bows, PH.D, C. Eng., M.I. MECH.E, F.I.E.E. and A.Midoun, B.SC, 'New PWM switching strategy for microprocessor controlled inverter drives', July 1986.

[10] .R.Bows, PH.D, C. Eng., M.I. MECH.E, F.I.E.E. and A.Midoun, B.SC, 'Suboptimal swithing strategies for microprocessor controled PWM inverter drives', May 1985.

[11]Bertrand Revol, 'Modélisation et optimisation des performances CEM d'une association variateur de vitesse-machine asynchrone', Thèse de doctorat, UJF Grenoble, Novembre 203.

[12]Vermaelen ©hristophe, 'Contribution à la modélisation et à la réduction des perturbations conduites dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable' Thèse de doctorat, ENS Cachen, 2003.

[13]N.Boudjerda, H.Chekireb, 'Comparaison des techniques MLI à échantillonnage régulier adaptées à l'onduleur de tension en pont alimentant un moteur asynchrone', Novembre 1994.

