

## CONVERTISSEUR TRIPHASE - MONOPHASE 15MVA POUR L'ALIMENTATION D'UN RESEAU DE TRACTION FERROVIAIRE 15KV - 16Hz 2/3

M. André; C. Nicolas; S. Soua; R. Weil

### 1 - Introduction

Les convertisseurs statiques de fréquence sont utilisés pour alimenter les réseaux alternatifs monophasés 16Hz2/3 et 25Hz de traction ferroviaire. Les groupes tournants qui ont été utilisés dans le passé pour coupler le réseau triphasé au réseau monophasé, sont progressivement remplacés par des convertisseurs statiques de fréquence (CSF). Les raisons sont nombreuses: améliorer le rendement sur toute la plage de fonctionnement, augmenter la dynamique de réaction, diminuer le coût de maintenance et réduire le volume.

Cet article concerne une réalisation de deux CSF 15 MVA - 15 KV pour les chemins de fer suédois (Banverket, sous-station Olskroken), dont la mise en service est programmée au 3<sup>ème</sup> trimestre 1999.

L'équipe d'électronique de puissance chargée de ce projet, y décrit l'utilisation de la simulation comme outil de conception d'une réalisation industrielle. Des exemples simples montreront combien l'utilisation des outils de simulation peut aider à analyser le fonctionnement du convertisseur et à optimiser son dimensionnement.

### 2 - Description de la chaîne de conversion

*Se reporter au schéma en annexe 4.*

La chaîne de conversion triphasée 50Hz en monophasé 16Hz 2/3 délivre une puissance de 15MVA avec un isolement galvanique entre les deux réseaux.

La conversion de fréquence avec un tel niveau de puissance et de performances impose un étage intermédiaire à courant continu fonctionnant sous une tension compatible avec les possibilités de réalisation des convertisseurs de puissance. Le niveau des tensions d'alimentation et de sortie (respectivement 10,5kV et 16,5kV) imposent à l'entrée et à la sortie, deux transformateurs assurant le découplage des réseaux et permettant d'ajuster la tension continue intermédiaire.

La chaîne de conversion est constituée, dans sa structure de base, des sous-ensembles suivants :

- Un transformateur triphasé d'entrée d'adaptation de la tension 10,5kV 50Hz équipé de deux secondaires étoile et triangle,
- Un redresseur dodécaphasé à thyristors alimenté par les deux secondaires précités. La tension de sortie redressée est de 5 kV.

- Une inductance de lissage du courant alimentée par le sous ensemble de redressement,
- Un banc de condensateurs de filtrage assurant la tenue dynamique de la tension continue et la fourniture de réactif,
- Un ensemble de quatre onduleurs monophasés à GTO de type trois niveaux (NPC) convertissant la tension continue 5kV (2 x 2500V avec un point milieu capacitif) en tension alternative 3kV. Les onduleurs sont commandés en M. L. I. et entrelacés de manière à augmenter la fréquence de l'ondulation résiduelle du courant global de sortie,
- Un transformateur monophasé de découplage et d'adaptation de tension entre les sorties onduleurs et le réseau 16,5kV - 16Hz 2/3.

Cette chaîne est complétée de dispositifs annexes permettant de satisfaire les contraintes imposées sur les niveaux maximums de perturbation réseau 50Hz et 16Hz 2/3. Ces dispositifs sont les suivants :

- Une cellule de filtrage située en amont du transformateur d'entrée. Constituée de filtres accordés, elle réduit le niveau des harmoniques de rangs cinq, sept et onze générés, sur le réseau 50Hz, par le sous ensemble de redressement,
- Une cellule de filtrage située aux bornes du bus continu 5kV et constituée de filtres accordés sur les harmoniques de rangs deux, quatre et huit de la fréquence de sortie 16Hz 2/3,
- Une cellule de filtrage, située entre le transformateur de sortie et le réseau 16Hz 2/3, réduisant l'ondulation de courant due à la commutation des onduleurs (2400Hz).

L'ensemble de conversion est équipé également de sous-ensembles de coupure et protections:

- Un disjoncteur d'entrée,
- Un hacheur dissipateur fonctionnant uniquement en cas de dépassement transitoire de la tension du bus continu,
- Un sous-ensemble de décharge des condensateurs,
- Un circuit de surveillance de défaut terre,
- Un sectionneur motorisé de mise à la terre,
- Un disjoncteur de sortie.

Les pertes d'une installation de ce type sont capitalisées. Il est donc important de rechercher tout moyen économiquement viable permettant l'amélioration du rendement de l'installation particulièrement à faible charge. L'énergie des snubbers des GTO est normalement dissipée dans des résistances. La mise en oeuvre de sous-ensembles de récupération s'est avérée rentable. Deux unités (appelées ERS : energy recovery system), de puissance unitaire 80kVA, reçoivent l'énergie à récupérer sous 200V continu. Cette tension est convertie en alternatif par un onduleur à résonance 1200Hz. Un transformateur élévateur assure ensuite l'isolement galvanique permettant après redressement d'envoyer cette énergie sur le bus continu 2 x 2500V.

### **3 - Description et principe de fonctionnement de l'onduleur trois niveaux à GTO**

*Se reporter au schéma en annexe B*

Chaque onduleur (IB1 à IB4) est constitué de 2 bras à GTO en architecture 3 niveaux de manière à délivrer cinq niveaux de tension avec une commande en M.L.I. adaptée. La tension fondamentale de sortie de chaque onduleur est à la fréquence de 16Hz 2/3.

Les courants étant pulsés, chaque onduleur est équipé sur son entrée de condensateurs de filtrage sur chaque polarité +DC/0V et -DC/0V.

*Les tensions et courant de sortie sont présentées en annexe C.*

#### **3.1 - Description d'un bras**

Chaque bras est équipé de quatre GTO de calibre 4500V-4000A en série :

- pour la polarité positive:
  - VT1 : GTO externe,
  - VT2 : GTO interne.
- pour la polarité négative:
  - VT3 : GTO interne,
  - VT4 : GTO externe.

Le gradient de courant dans les GTO est limité pour chaque phase et chaque polarité par un ensemble de deux inductances.

Les GTO sont équipés de circuits appelés snubber. Le snubber est un circuit d'aide à la commutation dérivant le courant du GTO pendant sa phase de blocage. Il est constitué principalement d'une diode et d'un condensateur.

Le snubber des GTO internes est dissipatif :

A la mise en conduction du GTO, le condensateur est déchargé à travers un ensemble de résistances.

Le snubber des GTO externes est récupératif :

L'énergie stockée dans l'inductance de  $di/dt$  pendant la conduction du GTO est transférée au moment du blocage dans un convertisseur de récupération (ERS : Energy Recovery System) commun à quatre onduleurs. Cette énergie transite via les diodes auxiliaires de chaque bras et un bus surfacique.

La tension inverse de chaque GTO est limitée par une diode montée en antiparallèle à ses bornes.

Deux diodes, dites de zéro, s'appuient sur le point milieu à potentiel nul ( 0V ) du bus d'alimentation continu. Elles assurent le passage du courant lors du blocage du GTO externe.

La sortie alternative de chaque bras est située entre les deux GTO internes.

Un capteur de courant implanté en sortie d'un des bras permet d'informer le circuit de contrôle de la valeur du courant de sortie.

Deux fusibles par bras limitent la valeur crête du courant de court-circuit.

### 3.2 - Principe de fonctionnement d'un bras

Les GTO externes d'une polarité et internes de l'autre polarité sont commandés en opposition de phase.

La mise en conduction d'un GTO externe doit impérativement être précédée de la mise en conduction du GTO interne situé en série sur la même polarité.

Un GTO interne ne peut être bloqué que sous condition du blocage préliminaire du GTO externe situé en série sur la même polarité.

Ces conditions de commande des GTO imposent la séquence de fonctionnement suivante (description simplifiée pour un fonctionnement à  $\cos(\varphi)$  unitaire):

Pendant l'alternance positive de la tension fondamentale à 16Hz 2/3 de sortie onduleur, VT4 est bloqué, VT3 commute à la fréquence de la M.L.I. mais n'est pas parcouru par le courant de sortie. VT2 est en conduction permanente et est parcouru par le courant de sortie, VT1 commute à la fréquence de la M.L.I. et est chargé, par l'évolution du rapport cyclique de conduction, de définir la demi-sinusoïde de la tension.

Le fonctionnement pour la demi-sinusoïde négative est identique en considérant VT1 bloqué, VT2 commutant sans courant de sortie, VT3 en conduction permanente parcouru par le courant, VT4 commutant le courant.

### 4 - Coordination des protections:

La chaîne de conversion doit pouvoir être isolée des réseaux amont et aval avec une ouverture automatique sur défaut en cas de forte surcharge. Les deux disjoncteurs d'entrée et sortie assurent cette fonction de protection avec un temps de réponse de l'ordre de 100ms. Acceptable pour des composants passifs, ce temps ne permet pas d'assurer la protection des composants actifs du système que sont les thyristors du redresseur dodécaphasé, les GTO et diodes des onduleurs.

#### Protection du redresseur dodécaphasé:

La captation du courant dans les phases alternatives d'entrée permet, après acquisition par le circuit de contrôle, de bloquer les impulsions d'amorçage des thyristors en cas de dépassement de la valeur crête admissible de courant. Cette protection, rapide, permet d'assurer la protection des thyristors.

### Protection des onduleurs:

Les onduleurs doivent être protégés en cas de dépassement du courant admissible par les GTO et les diodes et en cas de dépassement de la tension continue d'alimentation.

Les principaux cas de défaut sont les suivants:

- Court-circuit externe sur le réseau 16Hz 2/3,
- Saturation du transformateur de sortie,
- Court-circuit interne de la tension continue 2 x 2500V d'alimentation.

Le dépassement de la tension continue d'alimentation est dans pratiquement tous les cas la conséquence des défauts ci-dessus, les transitoires de courant se traduisant par de fortes fluctuations de la tension d'alimentation continue.

Le court-circuit externe et la saturation du transformateur de sortie ont pour conséquence une évolution transitoire du courant de sortie onduleur de même ordre de grandeur soit  $3A/\mu s$ . Ce  $di/dt$  n'est pas directement compatible avec le temps de réponse de la régulation des onduleurs mais la rapidité de blocage des GTO peut assurer la protection. Un circuit parallèle de protection fonctionnant en tout ou rien et prenant le contrôle à la place du circuit de régulation est donc nécessaire.

L'acquisition du courant est effectuée dans une des deux phases de sortie de chaque onduleur. Tout dépassement du premier seuil de protection de surintensité provoque un blocage quasi instantané ( $180\mu s$  maximum) des GTO avec un redébloqué lorsque le courant redescend à une valeur admissible. Ce système permet d'assurer la continuité du courant de sortie pendant le temps suffisant nécessaire à l'ouverture de la protection du système ayant provoqué l'appel anormal de courant.

Un deuxième seuil de courant provoque, s'il est atteint, le blocage définitif des GTO des quatre onduleurs avec un déclenchement des disjoncteurs amont et aval.

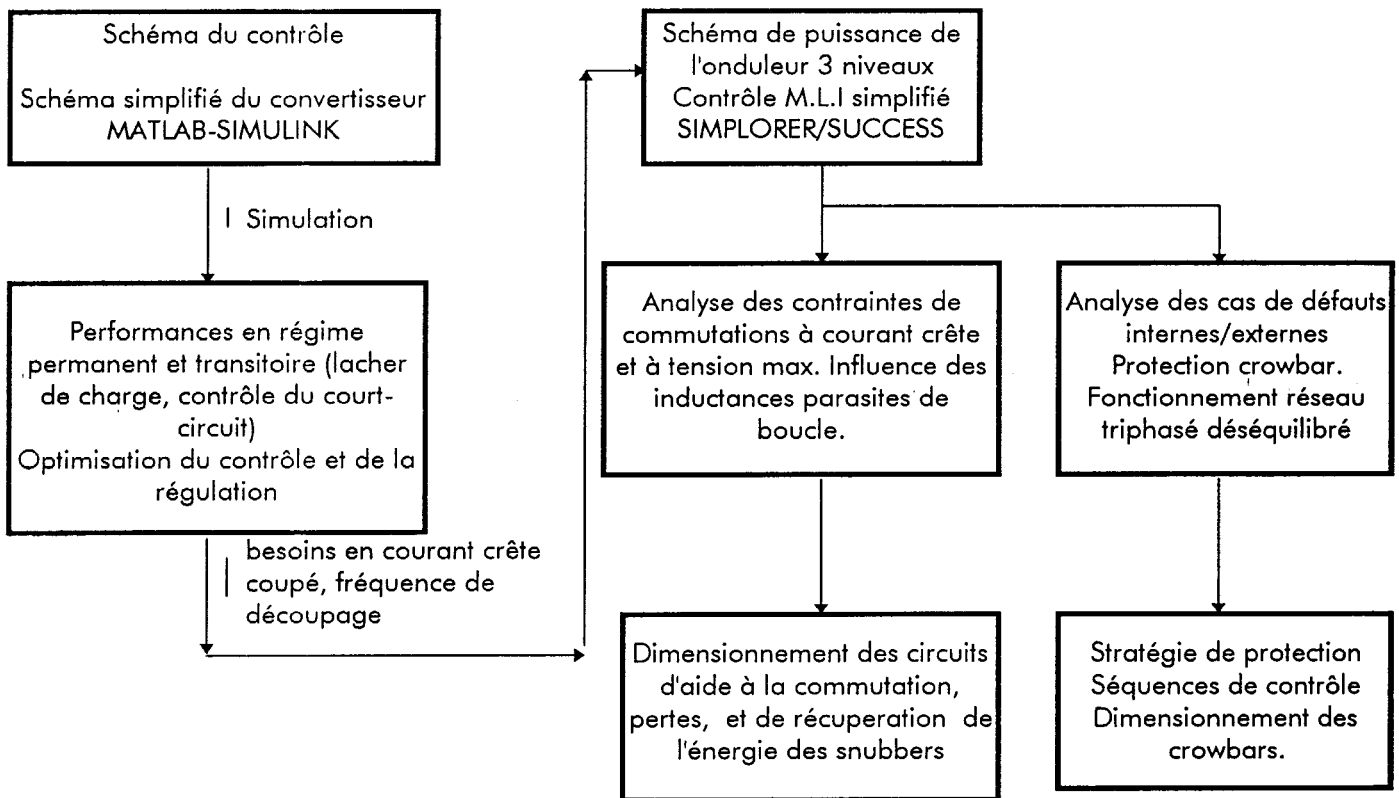
Un court-circuit interne peut être dû à un défaut de composants de puissance, GTO, diode ou à une défaillance des circuits de commande. Ce défaut revient à court-circuiter les condensateurs du bus continu 2 x 2500V. Le courant transitoire résultant peut prendre une valeur destructrice pour les éléments traversés. En fait, les bras à GTO sont équipés chacun de deux inductances, une sur chaque polarité, chargées de limiter le gradient de courant ( $200A/\mu s$ ) dans les GTO à l'instant de leur amorçage. Deux fusibles en série avec chaque inductance limitent la valeur crête du courant à 90kA et ouvrent le circuit en défaut. Ce dispositif limite la chute de tension transitoire du bus continu et donc, par voie de conséquence, le courant issu du passage en conduction des diodes de roue libre des GTO. En effet, ces diodes forment un pont de redressement monophasé de la tension imposée par le réseau de sortie 16Hz 2/3.

Cette protection par fusible est complétée d'un circuit appelé crow-bar constitué d'un thyristor amorcé à l'instant du défaut. Il permet, en court-circuitant la partie de circuit génératrice du défaut de limiter le nombre de semi-conducteurs détruits. Une inductance de faible valeur est installée dans le circuit des semi-conducteurs à protéger de manière à limiter l'évolution du courant les traversant pendant l'action du thyristor du crow-bar.

Le passage sur le deuxième seuil de surintensité ou la commande du crow-bar ont pour conséquence le blocage quasi-instantané du redresseur.

L'évolution rapide du courant demandé sur le bus continu, particulièrement sur défaut, a pour conséquence une fluctuation importante de la tension du bus. Il est nécessaire, dans ces conditions, de se protéger contre les surtensions par une action en deux temps. Dans un premier temps deux hacheurs dissipatifs à GTO contrôlent chaque demi-bus de 2500V, dans un deuxième temps, lorsque les hacheurs n'ont pas réussi à maintenir la tension à une valeur admissible, les GTO des onduleurs sont bloqués.

### 5 - Approche par simulation



#### 5.1 - Contrôle du court-circuit caténaire

Dans un réseau de traction ferroviaire, les courts-circuits sur caténaire sont très fréquents. Sans contrôle, le courant présumé de court circuit au droit de la sous-station peut atteindre 6 fois le courant nominal. Ce niveau de courant n'est pas admissible par les GTO, d'où la nécessité de le limiter par action du contrôle. En effet il est nécessaire de continuer à fournir un courant de court-circuit afin de garantir la sélectivité des protection (faire actionner les protection aval sur la caténaire).

Le contrôle du courant de court-circuit a été simulé et mis au point à l'aide de Matlab-Simulink. Il consiste à baisser la tension, par action sur la M.L.I, de sorte à limiter le courant débité dans le court-circuit ( voir courbes en annexe D ). Il en résulte un courant crête à couper par les GTO de l'ordre de 2900 A. Le seuil maximal de protection a été alors fixé à 3200 A.

## 5.2 - Simulation de l'onduleur 3N

Se reporter aux annexes E et F.

L'approche idéale pour une simulation donnant un résultat représentatif de la réalité est de considérer tous les éléments du circuit, GTO, diode, thyristor, condensateur, résistance, inductance, fusible avec leurs caractéristiques exactes. Il faut y ajouter les inductance, condensateur et résistance parasites du circuit liés pratiquement à la géométrie de l'ensemble physique et à la disposition des composants.

En pratique, les modèles de nombreux composants sont disponibles uniquement en version simplifiée donnant une vision macroscopique du fonctionnement et les éléments parasites du circuit ne sont réellement connus qu'après disponibilité d'une première réalisation. Les résultats obtenus ne sont donc pas totalement représentatifs du fonctionnement réel.

Il faut donc se servir de l'expérience acquise dans le domaine électrotechnique pour appréhender ce qui doit être impérativement pris en compte dans la simulation. Il faut savoir négliger ce qui n'aura aucune répercussion sur le fonctionnement et évaluer la validité des résultats malgré l'utilisation de composants simplifiés.

La simulation de l'onduleur est effectuée avec des modèles de caractéristiques suivantes:

- Les GTO, thyristors, diodes présentent des commutations instantanées et sont définis par une résistance à l'état passant et une résistance à l'état bloqué,
- Les diodes sont parfaites et définies de la même manière,
- Les condensateurs, inductances, résistances et fusibles sont parfaits.

Les résultats en annexe F, obtenus avec l'outil SIMPLORER, montrent l'évolution des tensions et courants dans les composants.

Pour le GTO par exemple, la figure 5 montre une montée de tension linéaire. Un zoom effectué à l'instant précis du blocage fait apparaître une surtension très élevée et très brève due au transfert instantané du courant GTO vers la diode de snubber. Cette diode est en série avec une inductance parasite  $L_p$ , le  $di/dt$  infini se traduit par une surtension non contrôlée. Ce résultat doit donc être interprété sachant que le composant réel ne commute pas instantanément. Le résultat de simulation ne montre pas la tension VDSP caractéristique du fonctionnement du circuit snubber, la cause en est encore l'utilisation d'une version simplifiée de GTO.

Cet exemple n'est pas limitatif, il y a lieu d'être prudent et de considérer un pourcentage moyen de fiabilité des résultats d'environ 90%.

La démarche de réalisation de tels circuits doit être itérative avec de fréquents échanges entre les concepteurs électrotechniques et les concepteurs chargés de l'implantation de l'ensemble. Il est nécessaire ensuite après réalisation d'une maquette, de consolider les résultats par une vérification en configuration réelle. Les performances obtenus sur la maquette à échelle un, avec les tensions et courants de définition sont satisfaisantes, le GTO externe a, par exemple, coupé 3800A sans dépasser le gabarit imposé par le fabricant du semi-conducteur.

### **5.3 - Simulation de la protection Crow-bar**

*Se reporter à l'annexe G.*

Lorsqu'un défaut interne aux onduleurs apparaît (GTO amorcé de manière intempestive ou GTO et/ou diode court-circuité), un court-circuit du bus continu est inévitable. Ce court-circuit met en péril l'ensemble des semi-conducteurs de l'onduleur dans lequel le défaut apparaît. L'utilisation d'un circuit dit de "Crow-bar" permet de dévier l'onde de courant de court-circuit assurant ainsi la fusion fusible sans casse supplémentaire.

Une simulation de ce type de défaut est effectuée afin de déterminer les contraintes appliquées au circuit de Crow-bar, le moyen de détection du défaut à utiliser ainsi que le temps de réactions nécessaire pour le contrôle commande.

Les caractéristiques du fusible permettent de créer un modèle qui consiste principalement à prendre en compte les temps de préarc et d'arc et de simuler la tension d'arc apparaissant aux bornes du fusible.

Les résultats obtenus permettent de choisir le thyristor capable de véhiculer l'onde de courant de défaut ( environ 90kA crête ) et de définir son environnement ( self de limitation du di/dt et circuit RC de protection ).

## **6. Conclusion**

L'utilisation de la simulation dans la conception d'un convertisseur de forte puissance présente des intérêts nombreux, parmi lesquels nous pouvons citer les suivants:

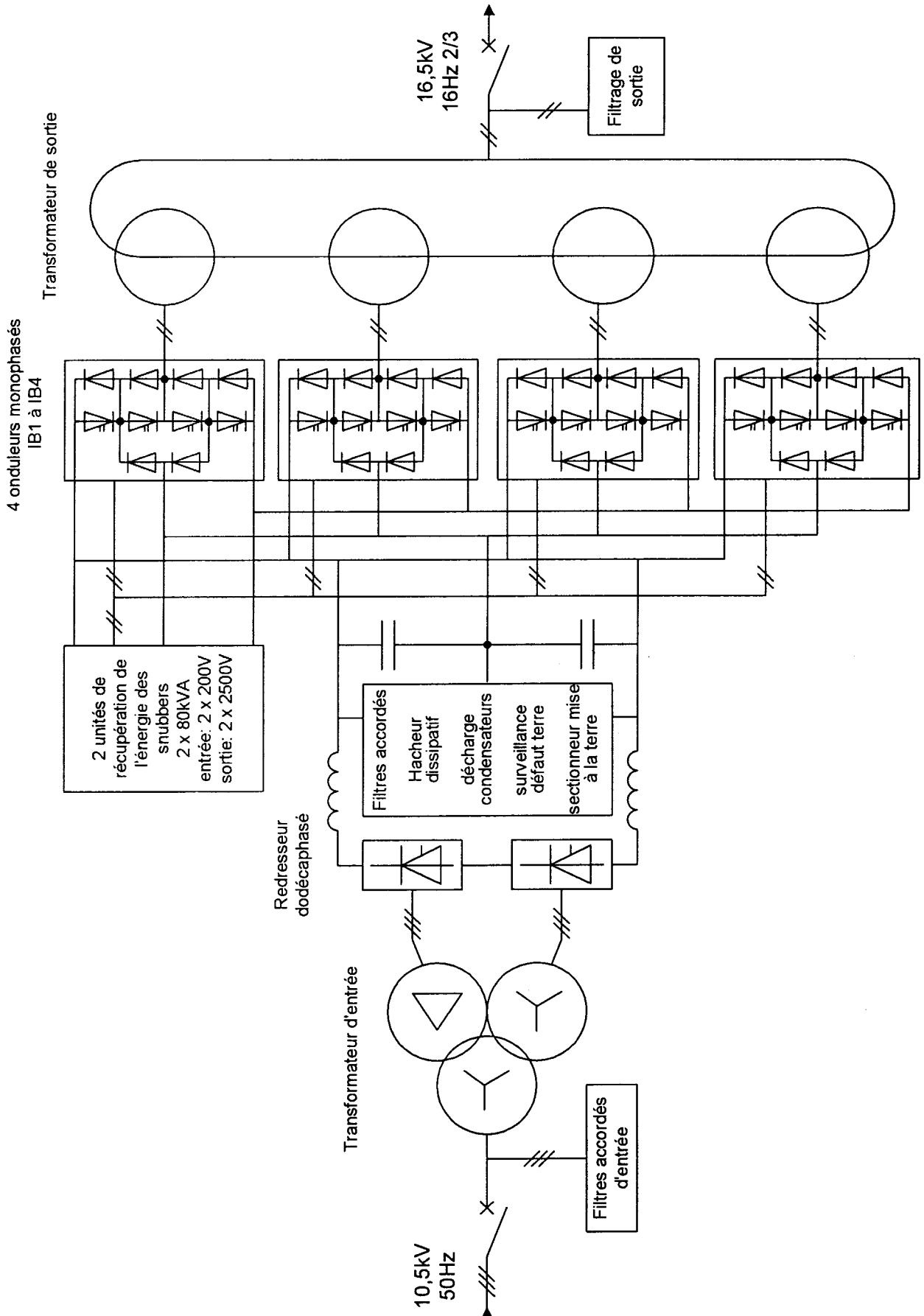
. L'aide à la mise au point du circuit onduleur avec récupération de l'énergie des snubbers. Les variations des paramètres et l'effet des inductances parasites de raccordement ont pu être pris en compte.

. L'étude, de manière aisée, d'un amorçage crow-bar sans essais destructifs. En effet ceux-ci ne peuvent pas être réalisés en laboratoire en raison de leur coût dissuasif et des contraintes de sécurité.

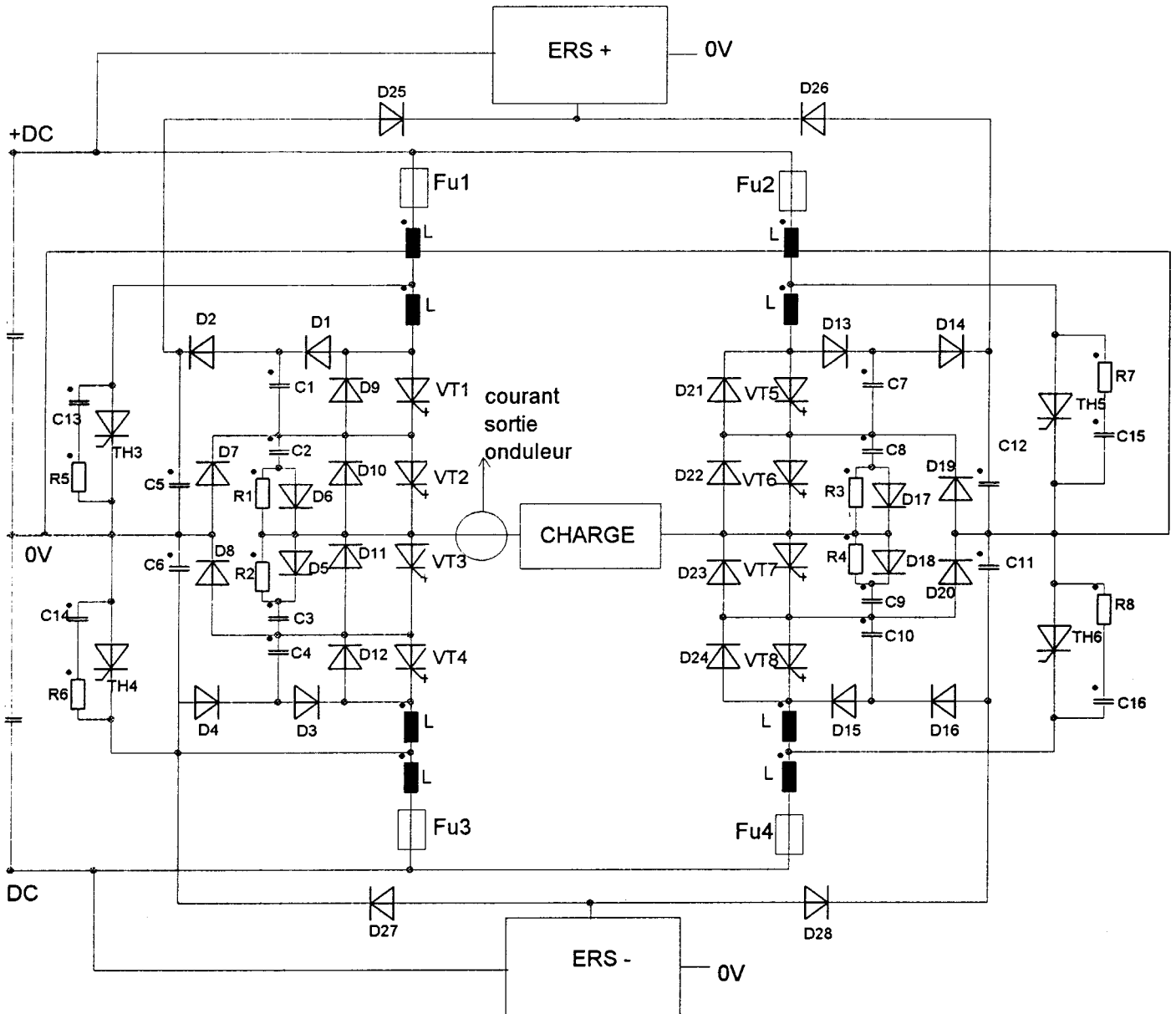
Les outils de simulation, malgré les limites présentées, offrent aux concepteurs la possibilité de concevoir, dès le début d'un projet, des circuits de contrôle et puissance de plus en plus complexes. Ils permettent l'évaluation des conditions de fonctionnement aux limites, souvent impossibles à réaliser sans risque pour le matériel en configuration réelle.

C'est donc un outil indispensable qui doit se développer et permettre, avec la montée en puissance des ordinateurs, une simulation de plus en plus fidèle et rapide.

**Annexe A**  
**Convertisseur tri/mono 50Hz - 16Hz2/3 - 15MVA**



Annexe B



**Annexe C**

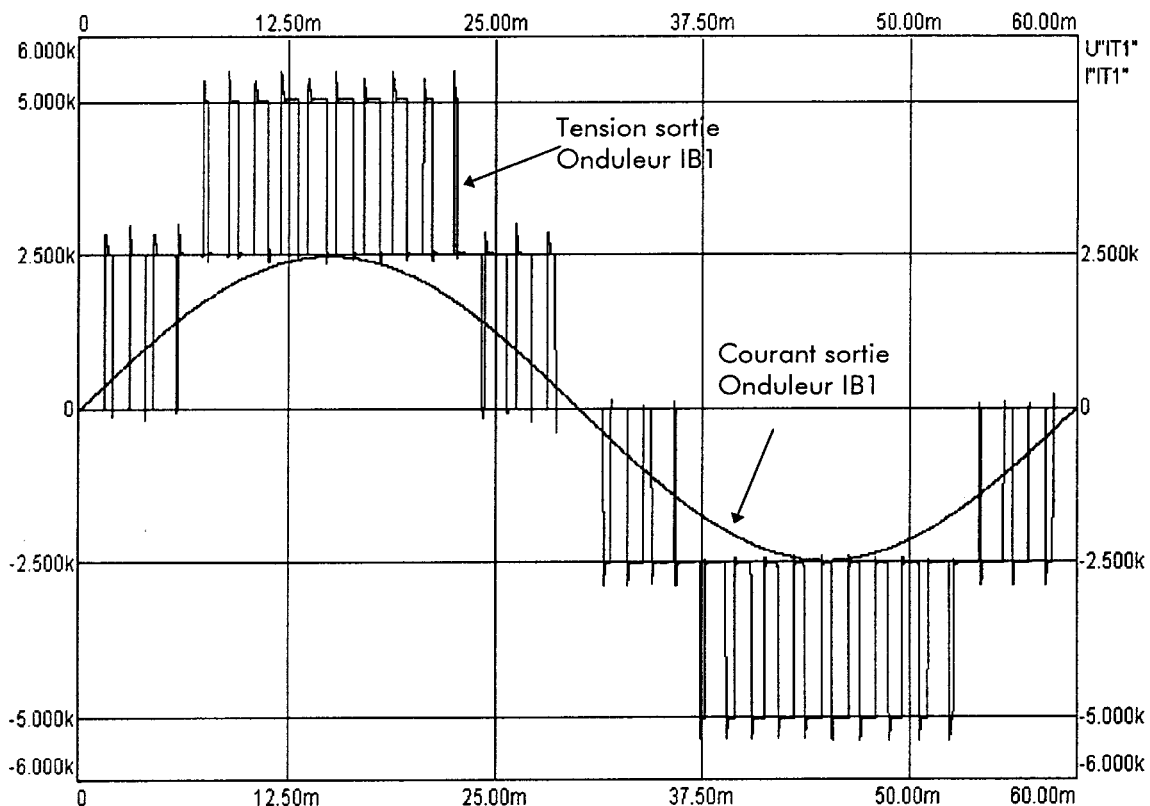
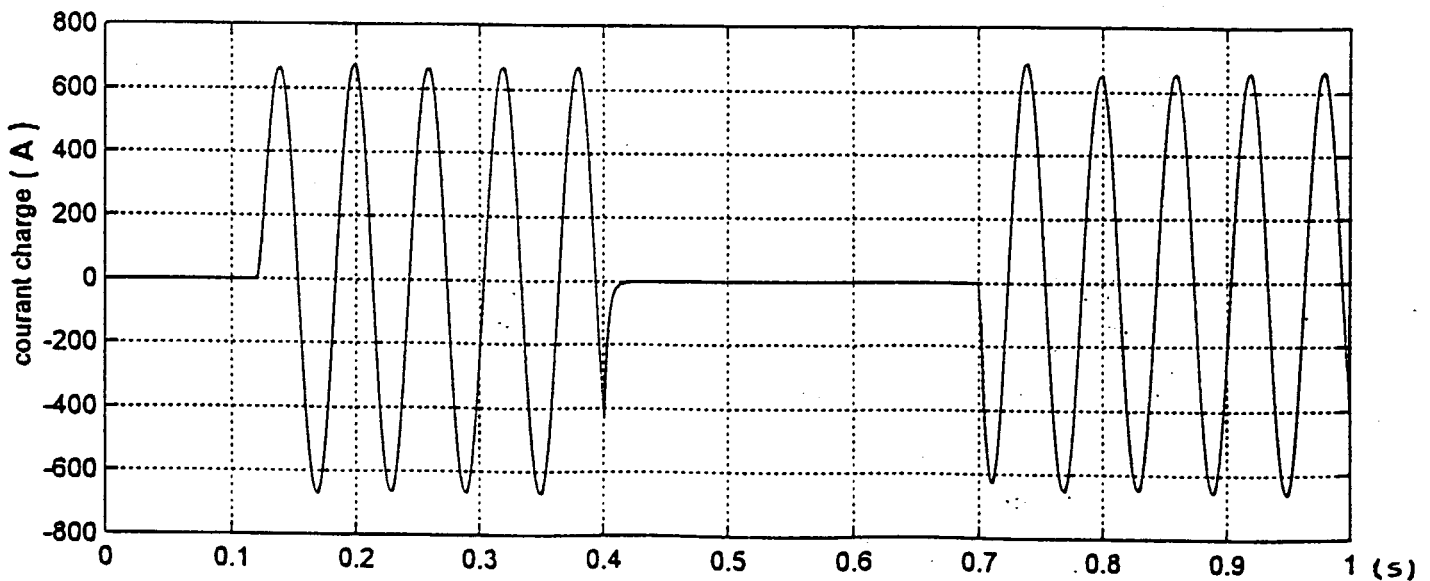
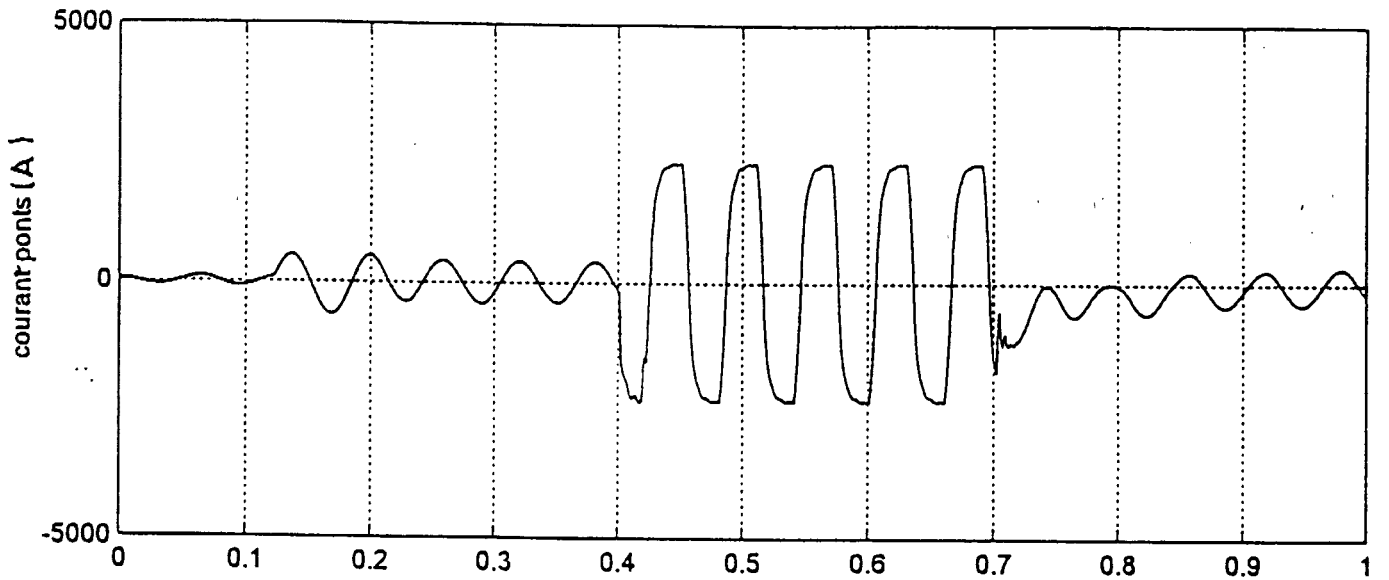
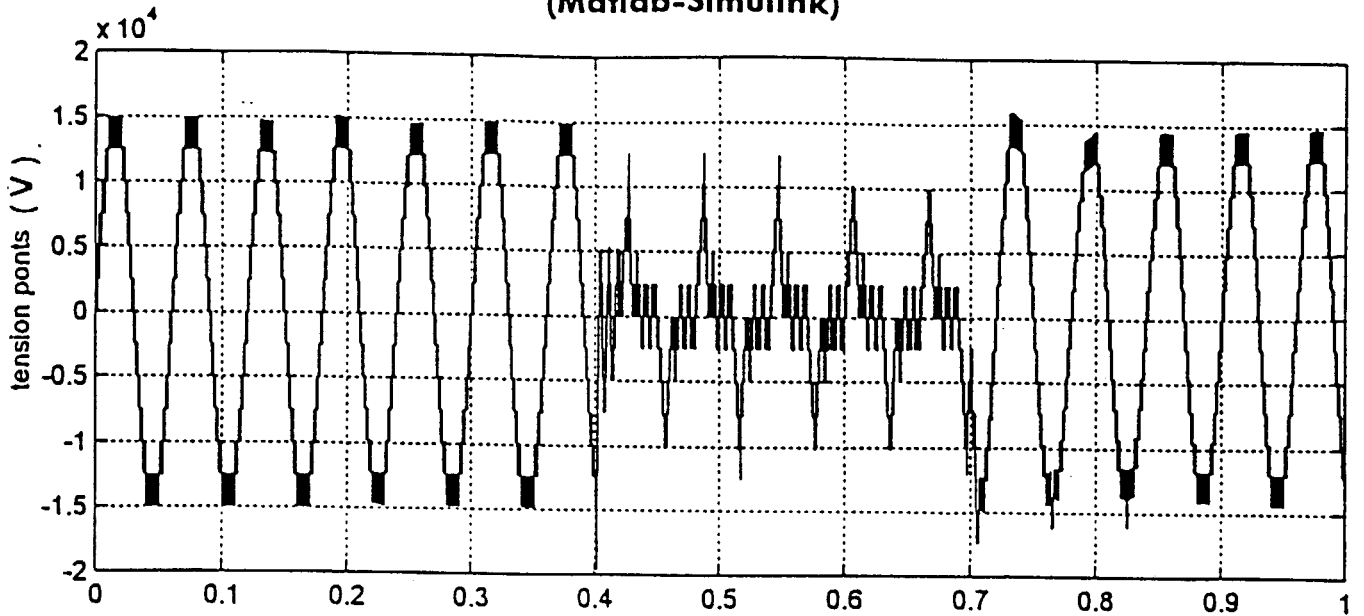
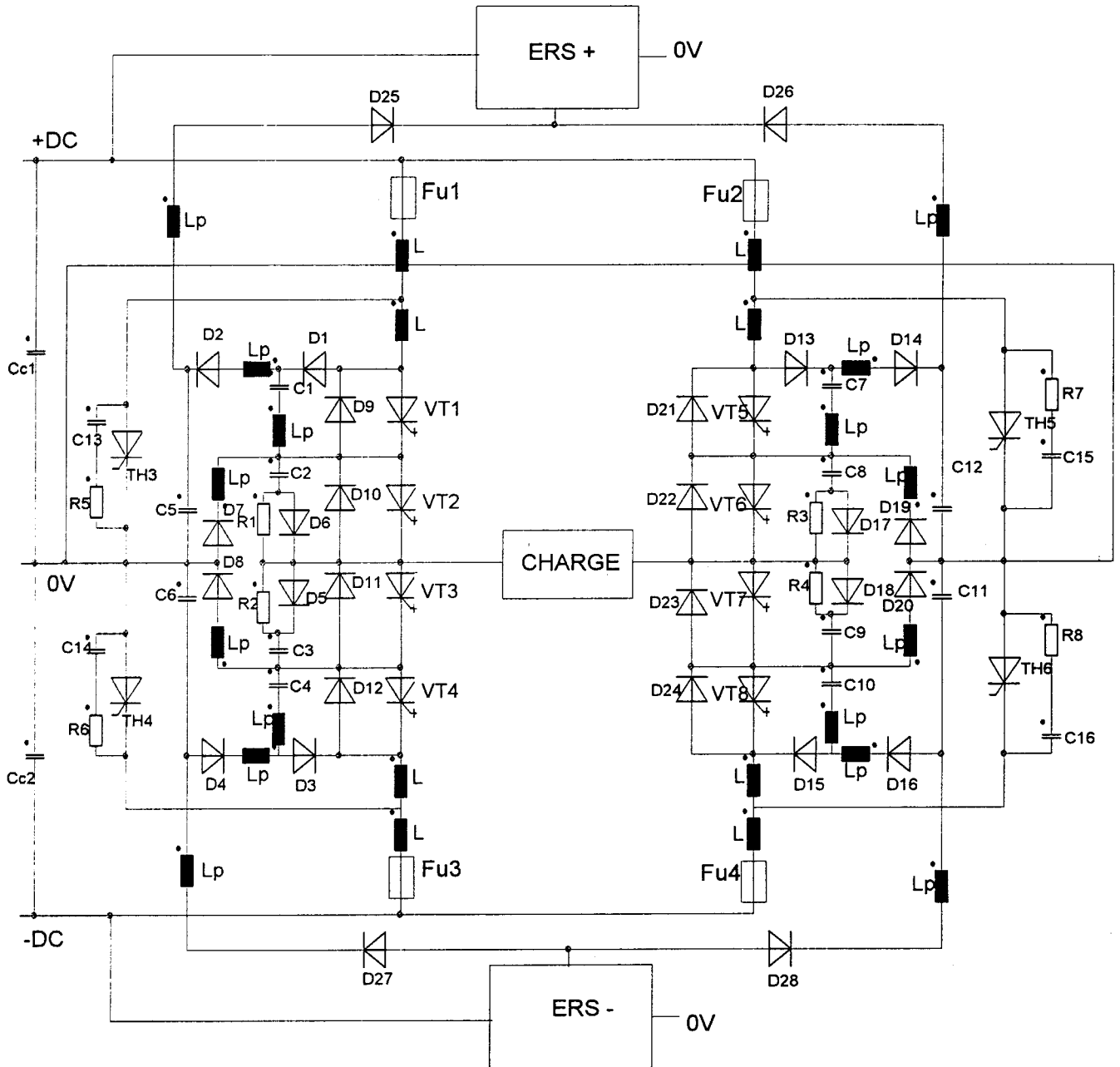


Fig 4 : Tension et courant en sortie onduleur IB1

### Contrôle du courant de court-circuit caténaire (Matlab-Simulink)



Annexe E



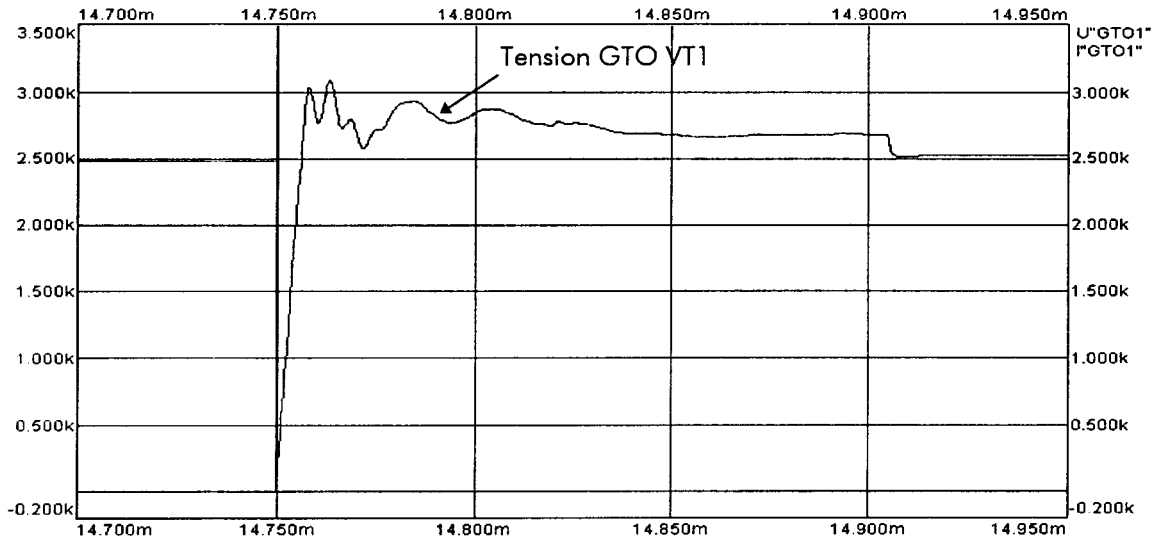


Fig 5 : Tension GTO VT1 lors de son blocage

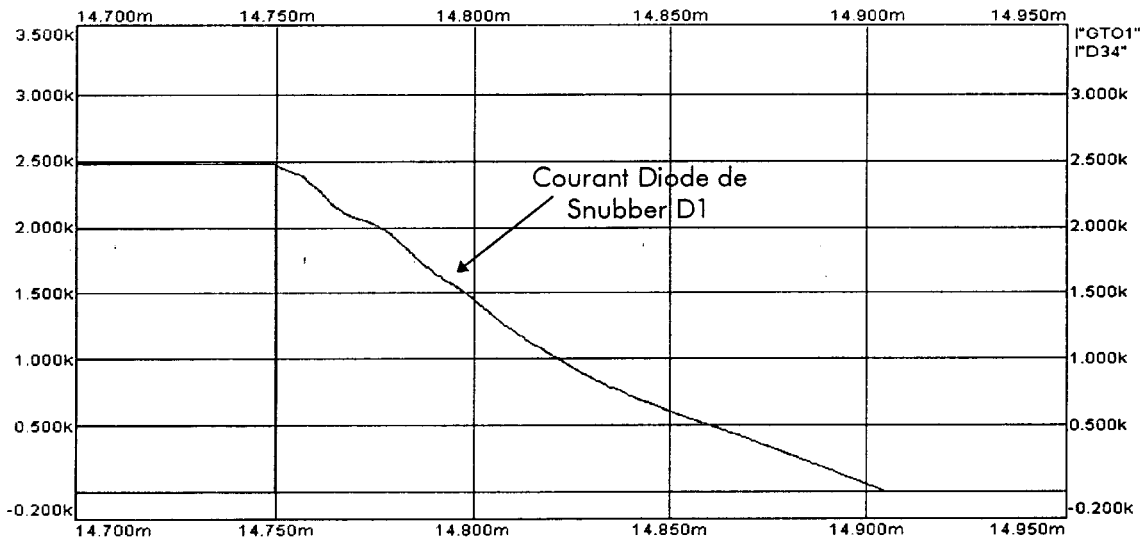


Fig 6 : Courant Diode de Snubber D1 au blocage

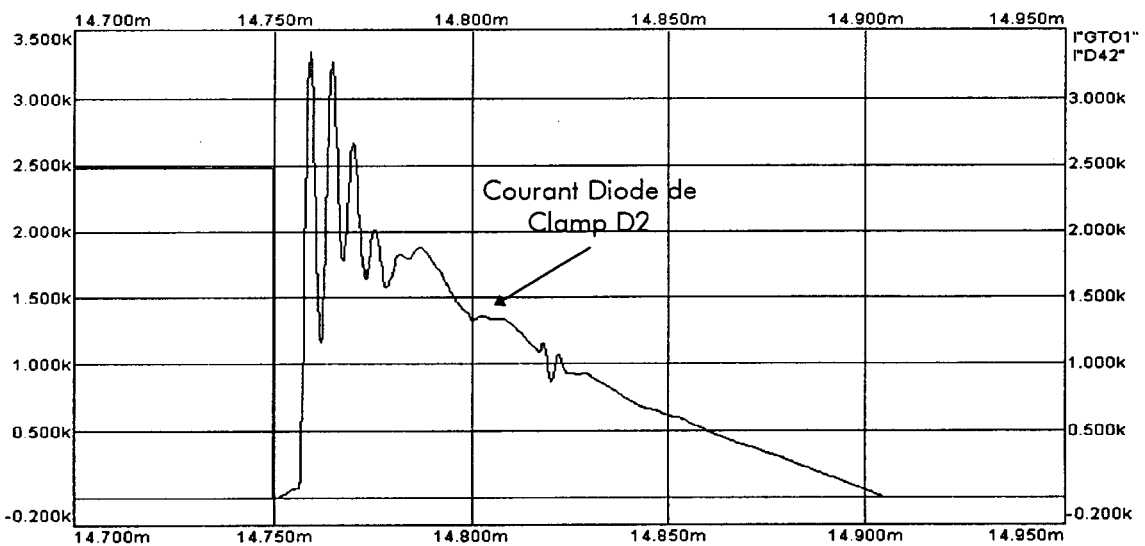


Fig 7 : Courant Diode de Clamp D2 au blocage VT1

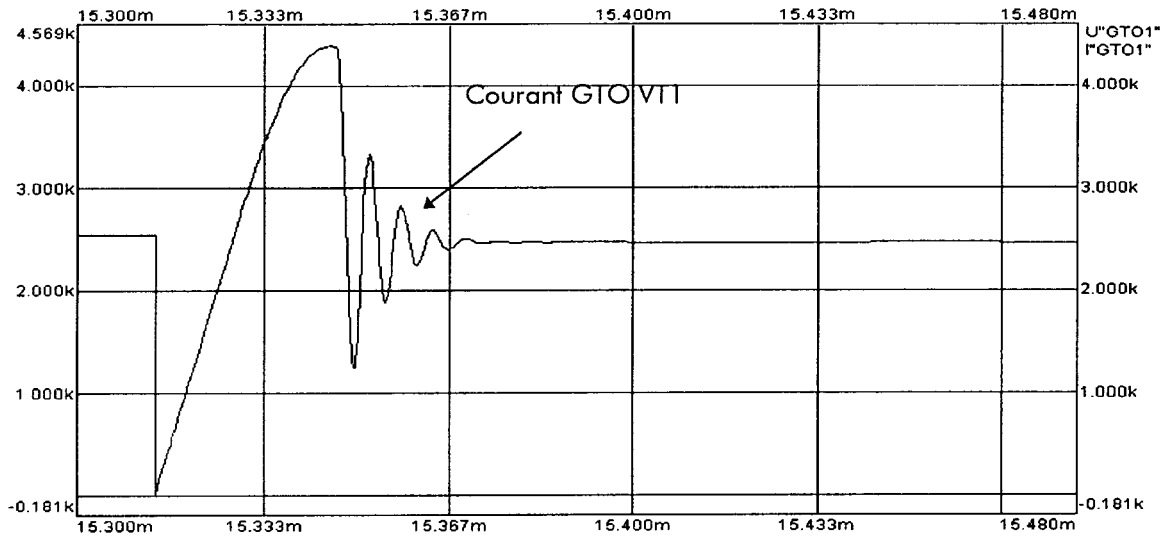


Fig 8 : Courant GTO VT1 lors de son amorçage

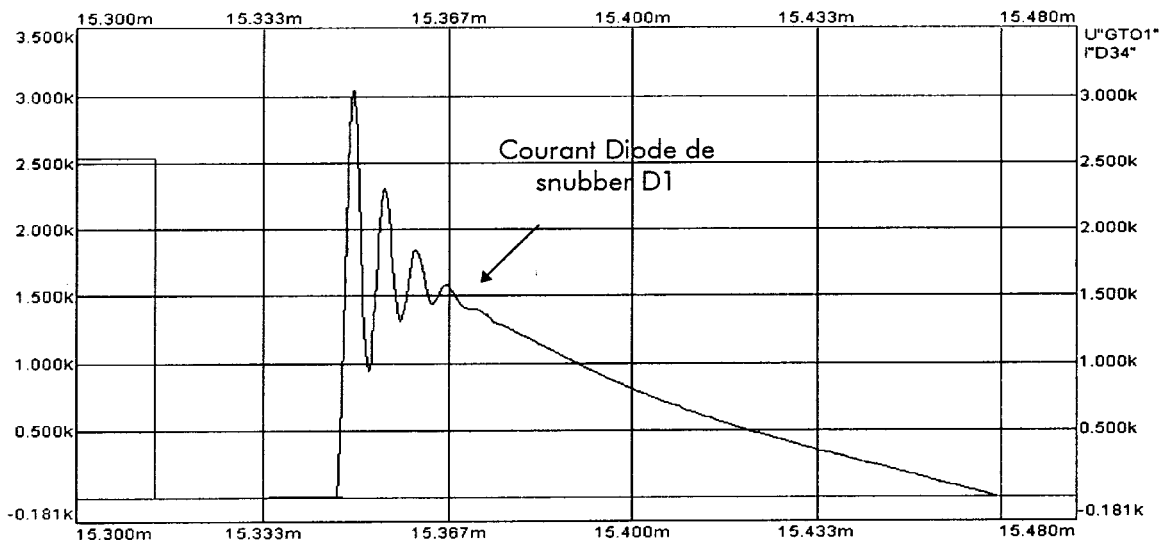


Fig 9 : Courant Diode de snubber D1 à l'amorçage VT1

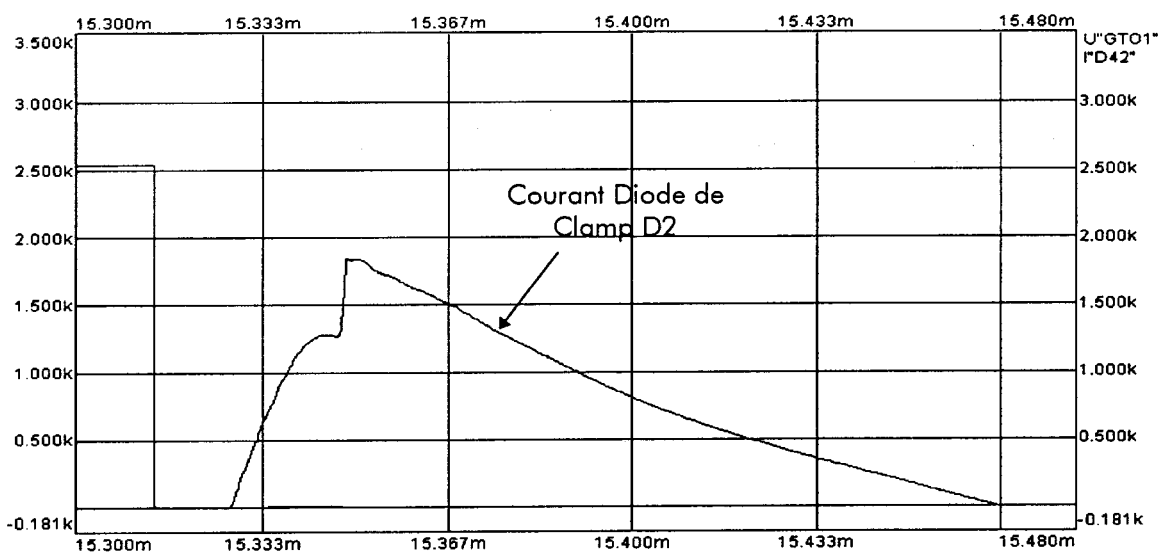


Fig 10 : Courant diode de Clamp D2 à l'amorçage VT1

**Annexe G**

*Illustration de la fonction crow-bar*

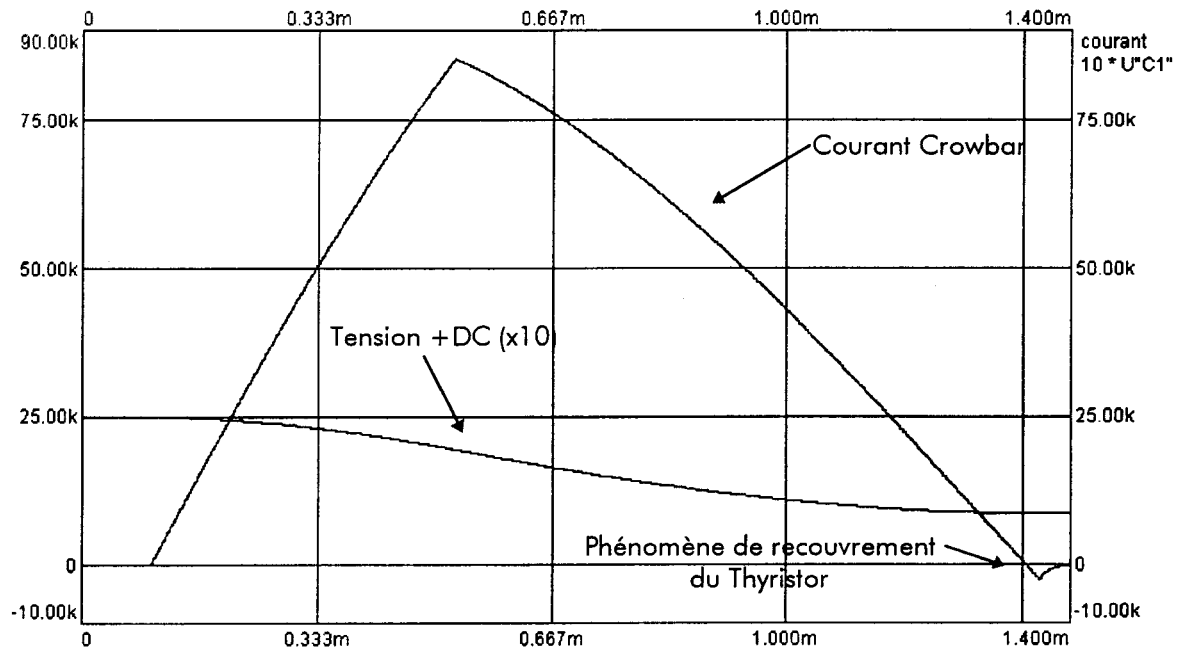
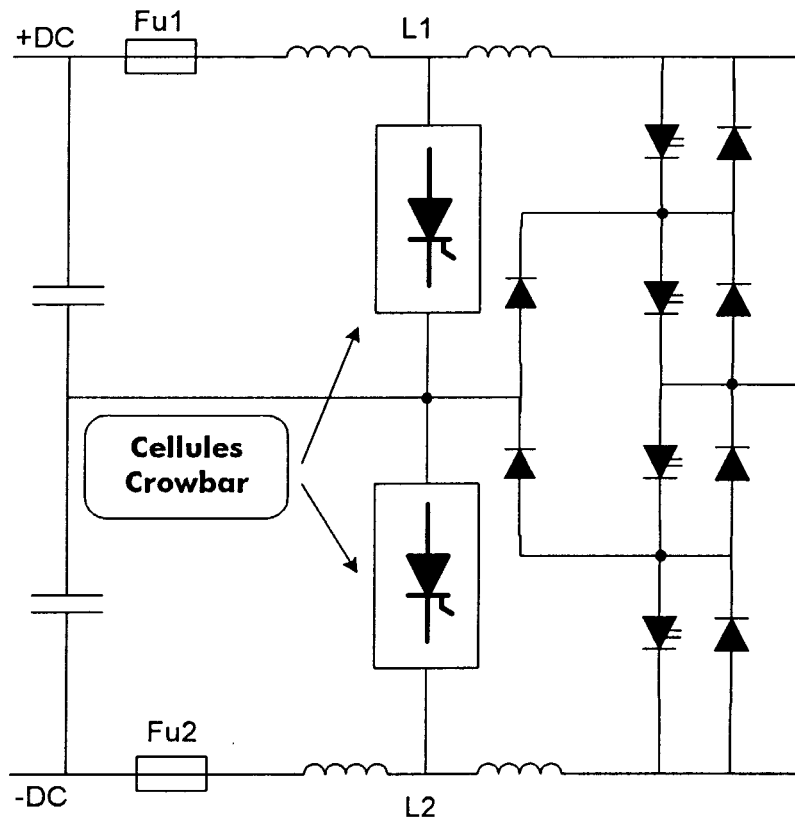


Fig 4 : Amorçage Crowbar - Evolution de la demi-tension bus continu