ALIMENTATION DES ÉLECTROAIMANTS D’UN ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES

Guide d’utilisation des simulations

Par l’équipe ÉlectroSim

Table des matière

2. À propos 2-3

Public cible 2-3

Requis système 2-3

3. Présentation 4

Explication du projet 4

Simulations produites 4

Nom des simulations 4

SPS 4

PSIM 4

Opal-RT 5

4. Fonctionnement pour SPS 6

Explication de base 6

Outil de pré-programmation 6

Présentation de l’interface de base de SPS 6

Simulations 7

Simulation 1 – AFE 2 niveaux sur charge idéale 7

# À propos

## Public cible

Ce document sert de manuel de référence pour tous les utilisateurs des différents simulateurs produits par l’équipe ÉlectroSim dans le cadre du projet intitulé « Simulation d’une alimentation des électroaimants d’un accélérateur departicules ».

## Requis système

* Simulateur Matlab/Simulink/SimPowerSystems (SPS)
  + Version 2011b ou ultérieure;
  + Windows 7 ou ultérieur ou;
  + Mac OSX 10.6 ou ultérieur
* Simulateur PSiM
  + Version 9.1.1 ou ultérieur;
  + Windows 7 ou ultérieur
* Simulateur OPAL-RT
  + Plateforme OPA500;
  + LAB-RT version XXXX ou ultérieur;
  + RT-EVENTS version XXX ou ultérieur;
  + Matlab/Simulink/SimPowerSystems (SPS) version 2011b seulement;
  + Windows 7 ou ultérieur;
  + Une connexion Ethernet de type RJ-45 10/100 mbps

# Présentation

## Explication du projet

L’objectif du projet était de procéder à la conception de différents simulateurs pour représenter l’implantation pratique de la nouvelle alimentation utilisée au « CERN » à Genève en Suisse pour le « Booster » du « Synchrotron à Proton ». Les simulations ont été séparées en 3 grands groupes, soit : les simulations sur « Matlab/Simulink/SimPowerSystems » de la compagnie MathWorks, abrégé SPS pour le reste du document, les simulations sur « PSim » de la compagnie PowerSimTech et les simulations sur le simulateur en temps réel OPA500 de la compagnie Opal-RT. Il était nécessaire de produire les différents sous-systèmes de la nouvelle alimentation du « Booster » ainsi que l’assemblage final sur chacune des plateformes de simulations. Finalement, il était nécessaire d’effectuer une contre-vérification de chaque implantation des sous-systèmes entre chaque plateformes pour s’assurer que les résultats produits sont valables pour chacune des simulations.

## Simulations produites

Pour représenter l’alimentation du « Booster », il a été nécessaire de séparer celui-ci en deux sections. La première section est le convertisseur « Courant alternatif / Courant continu » que l’on nomme « AFE ». La seconde section est le convertisseur « Courant Continu / Courant continu » que l’on nomme « DCP – DCN ». Pour bien vérifier le fonctionnement des deux sous-systèmes, ceux-ci ont été modélisé suivant une méthodologie croissante permettant de partir d’un modèle simple jusqu’au modèle complexe final. Ainsi, dans le cas de « l’AFE », trois simulations ont été produite, soit : le convertisseur « CA/CC » 2 niveaux sur source idéale, le convertisseur « CA/CC » 2 niveau sur charge « RC » et le convertisseur « CA/CC » 3 niveaux sur charge « RC. Pour le « DCP-DCN », encore une fois, trois simulations ont été produites, soit : le hacheur 4 quadrants simple, le hacheur DCP à 3 niveaux et le hacheur DCP-DCN à 3 niveau. Finalement, un assemblage de « L’AFE » 2 niveaux sur charge « RC » et hacheur 4 quadrants simple ainsi qu’un assemble de « l’AFE » 3 niveaux avec le hacheur « DCP-DCN » à 3 niveaux ont été produits. Pour simplifier, 8 simulations ont été produites pour vérifier le fonctionnement de chacune des sections des modèles avec une complexité croissante plus l’assemblage est proche du modèle physique implanté au « CERN ». Pour une explication plus poussée de chacun modèle utilisé, se référer au document XXXX.

## Nom des simulations

Voici le nom de chacune des simulations produite pour chacun des simulateurs.

### SPS

* **AFE :**
  + **XXX.sym**
  + **XXX.sym**
* **DCP/DCN :**
  + **XXX.sym**
* **Assemblage final :** 
  + **XXX.sym**

### PSIM

* **AFE :**
  + **XXX.sym**
  + **XXX.sym**
* **DCP/DCN :**
  + **XXX.sym**
* **Assemblage final :** 
  + **XXX.sym**

### Opal-RT

* **AFE :**
  + **XXX.sym**
  + **XXX.sym**
* **DCP/DCN :**
  + **XXX.sym**
* **Assemblage final :** 
  + **XXX.sym**

# Fonctionnement pour SPS

## Explication de base

Les 8 simulations implantées sur SPS fonctionnent de la même façon. Chacune des simulations est séparée en trois sections : le circuit électrique, la commande et les instruments de mesure et d’affichage. Les sections de mesure et d’affichage sont entourées d’un rectangle rouge, les sections de commande sont entourées d’un rectangle vert et le circuit électrique ne possède pas de bordure de couleur. La figure XXX présente les trois séparations. Il est possible de contrôler les simulations de deux méthodes distinctes. La première façon de contrôler les simulations est de passer directement par l’interface de SPS. Ainsi, il est possible de choisir les résultats à afficher en utilisant les différents systèmes d’affichage pré insérés dans les simulations ou de modifier la simulation pour en afficher d’autre. La deuxième méthode consiste à utiliser l’interface de contrôle présenté à la section XXX de concert avec l’interface SPS pour obtenir un contrôle plus aisé ainsi qu’une corrélation avec les résultats provenant d’autres simulations. Toutefois, la section 4 ne va s’attarder que sur le fonctionnement des simulations au travers de l’interface de SPS.

## Outil de pré-programmation

Pour se servir des simulations SPS, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de l’outil de pré-programmation présenté à la figure XXX. Celui-ci permet de modifier les paramètres de simulation tels que le pas de calcul, les paramètres de régulation de la commande et les paramètres des composantes du circuit électrique. La figure XXX montre les différents paramètres ajustables. La description de chacun des paramètres va être expliqué dans les sections suivantes pour chacune des simulations.

Pour modifier des paramètres, il suffit d’ouvrir le fichier XXX livré avec les simulations à l’aide de Matlab et de modifier les différentes valeurs. Par la suite, il suffit d’enregistrer le fichier et d’appuyer sur le bouton « Triangle » vert (Point 1 de la figure XXXX).

## Présentation de l’interface de base de SPS

La figure XXXX présente l’interface de base de SPS. SPS permet d’effectuer la simulation et celui-ci est composé de 3 sections principales.

La première section est la barre de contrôle qui permet de démarrer ou d’arrêter la simulation ainsi que de changer le temps de simulation. Le point XXX est le bouton de mise en marche, le point XXX est le bouton d’arrêt et le carré XXX est le champ du temps de simulation. Il est possible d’entrer n’importe laquelle valeur numérique ainsi que le mot « inf » pour obtenir une simulation qui n’arrête jamais.

La seconde section consiste en l’affichage de la simulation et est représenté par l’encadré rouge sur la figure XXXX. Dans cette section, il est possible de voir chacune des composantes de la simulation et d’interagir avec ceux-ci.

La troisième section est la librairie des composantes disponibles et est représenté par l’encadré bleu dans la figure XXX. Il est possible de modifier la simulation en utilisant les composantes présentes dans la librairie et en effectuant un glissé-déposé de celles-ci dans la section d’affichage de la simulation.

Ainsi, à l’aide des trois sections, il est possible de contrôler, modifier et interagir avec la simulation et ses résultats. Ces résultats sont présentés de deux façon dans SPS, soit : l’utilisation des différents oscilloscopes intégrés ou l’utilisation de boîte d’affichage instantané. Ces deux dispositifs sont présentés à la figure XXXX.

## Simulations

### Simulation 1 – AFE 2 niveaux sur charge idéale

La figure XXX présente cette simulation dans son ensemble. L’AFE 2 niveaux sur charge idéale est composée des même 3 sections expliquées dans la section « Explication de base». Cette simulation a été effectuée pour montrer, en premier lieu, le fonctionnement du montage AFE à 2 niveaux. Par la suite, cette simulation permet de montrer la possibilité de fonctionnement dans les 4 quadrants de celui-ci. En modifiant la commande envoyé aux interrupteurs IGBT, il est possible de contrôler le sens d’écoulement de la puissance active et réactive ce qui permet le fonctionnement dans les 4 quadrants.

#### Section – Schéma électrique

Cette section contient toute la partie électrique de la simulation. La figure XXX présente cette section de façon plus précise. Côté alimentation électrique, nous pouvons retrouver une source de tension triphasée (Point 1) et une source de tension CC (Point 2). La section électrique est aussi composée de 6 IGBT (Point 3) permettant la commutation du courant pour contrôler la tension du bus CC et de trois inductances d’entrées (Point 4). Finalement, différents mesureurs sont mis en place pour permettre à la commande d’effectuer son contrôle et à la section « affichage » d’afficher différentes mesures permettant de vérifier le bon fonctionnement de la simulation. Le premier mesureur est le mesureur de courant et de tension triphasé (Point 5). Le second est le mesureur de courant du bus CC (Point 6) et le dernier mesureur est le mesureur de tension du bus CC (Point 7).

À l’aide du fichier de pré-programmation, il est possible de changer la pluparts des valeurs électriques de cette section. Voici les principales valeurs modifiables avec la variable la représentant, une courte description et sa valeur usuelle:

* **Lac** – Inductance d’entrée – 814 µH
* **Vac** – Tension crête de la source triphasée – 2000 V
* **Freq** – Fréquence de la tension triphasée – 50 Hz
* **Vdc** – Tension de la source CC – 5000 V
* **Ron** – Résistance en conduction des IGBT – 1 mΩ
* **Rs** – Résistance du « Snubber RC» des IGBT – 100000 Ω
* **Cs** – Capacité du « Snubber RC» des IGBT – Inf (Désactivé)

#### Section – Commande

La commande de l’AFE 2 niveaux sur charge idéale (Entourée d’un rectangle vert, voir figure XXX) permet de contrôler les différents interrupteurs IGBT pour permettre un échange de puissance entre le réseau CA et le réseau CC. Cette commande est séparée en 3 parties.

La première partie (Figure XXX) est la consigne. La consigne est séparée en trois points. Soit la consigne de courant qui doit transiger entre les deux réseaux que l’on nomme « Imax ». La consigne de courant est régulée à l’aide d’un régulateur de type PI en appliquant une méthode de « feedback » avec le courant mesuré dans le bus DC (Point 6 de la figure XXX). La seconde consigne est la consigne d’angle appelée « Phideg ». C’est cette consigne qui va permettre de choisir le sens d’écoulement de la puissance. Elle est régulée de la même manière que la consigne Imax, soit de type PI avec « Feedback » du déphasage entre la tension CA et le courant CA du réseau alternatif. Ce déphasage est mesuré à l’aide d’un bloc de mesurage de puissance (Figure XXX). Finalement la dernière consigne est la consigne de fréquence. Celle-ci se doit d’être la même que la fréquence du réseau CA sinon la commande ne pourra pas fonctionner correctement.

La seconde partie de la commande de l’AFE (Figure XXX) est la transformation des consignes en commande pour les IGBT. La méthode de commande utilisée est une comparaison par glissement. À l’aide des trois consignes précédentes, un signal sinusoïdal triphasé est produit (Point 1 de la figure XXX) et celui-ci est additionné aux mesures de courant triphasée (Point 2 de la figure XXX). Par la suite, un bloc « hystérésis » est utilisé pour chacun des phases. Ce bloc va activer produire une valeur unitaire lorsque son seuil positif est dépassé et va produire une valeur nulle lorsque son seuil négatif va être dépassé. En réglant la valeur de seuil, il est possible de contrôler la fréquence de commutation des IGBT. Finalement la valeur de sortie du bloc « Hystérésis » est le signal de commande de l’IGBT négatif de la phase associé et la valeur inverse est le signal de commande de l’IGBT positif.

La dernière partie est le routage de la commande vers les IGBT (Point 3 de la figure XXX). Il est possible de désactiver l’envoi de la commande vers les IGBT à l’aide de l’interrupteur. Par la suite, les différents signaux sont envoyés aux interrupteurs à l’aide de blocs « Goto ». Les signaux sont reçus par les interrupteurs à l’aide des blocs « From » (Point 8 de la figure XXX).

Voici les différents paramètres pouvant être modifié dans le fichier de pré-programmation :

* **Satv** – Limite supérieur et inférieur du PI pour le courant Imax – 1500 A
* **Pv** – Gain proportionnel du régulateur PI pour le courant Imax – Calcul automatique
* **Iv** – Gain intégral du régulateur PI pour le courant Imax – Calcul automatique
* **P** – Gain proportionnel du régulateur PI pour le déphasage – Calcul automatique
* **I** – Gain intégral du régulateur PI pour le déphasage – Calcul automatique

En plus de ces valeurs, il est possible de modifier les consignes Imax et Phideg en modifiant la valeur à l’aide des blocs « Slider » nommés « Imax » et « Angle Recherché ».

#### Section – Mesure et affichage

Cette section est séparée en 4 principales parties (Figure XXX). La première partie est l’affichage de la commutation des 6 IGBT à l’aide d’un bloc « Scope » (Point 1). La seconde partie est l’affichage des tensions et courants du réseau triphasé ainsi que la tension et le courant du bus CC à l’aide d’un bloc de type « Scope » (Point 2). La troisième partie est la mesure de puissance à l’aide du bloc de puissance crée par nos soins (Figure XXX) et l’affichage instantané et moyenne de la puissance active et réactive échangée entre les deux réseaux ainsi que l’angle entre le courant et la tension du réseau CA. Finalement, la dernière partie est l’affichage instantané à l’aide de bloc « Display » du courant de commande, de la phase entre les signaux de courant et de tension CA, du courant dans la charge et de la tension du réseau CC.

Il est possible de modifier les différentes valeurs à afficher en utilisant les mesures déjà disponibles, des blocs mathématiques tels que le bloc de moyenne, le bloc RMS associé à des blocs « Scope » et « Display ». Les différentes mesures de base disponibles à l’aide de bloc « From » sont :

* **Vabc** – Tension triphasée Ligne-Terre du réseau CA
* **Iabc** – Courant triphasé du réseau CA
* **Ich** – Courant dans le bus CC
* **Vch** – Tension aux bornes du bus CC

### Simulation 2 – AFE 2 niveaux sur charge RC