ALIMENTATION DES ÉLECTROAIMANTS D’UN ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES

Guide d’utilisation des simulations

Par l’équipe ÉlectroSim

Table des matières

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 faire varier le facteur de puissance de l’AFE et ainsi modifier l’écoulement de puissance entre les deux réseaux. 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 et hystérésis. 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 produire une valeur unitaire lorsque son seuil positif est dépassé par la valeur d’entrée et va produire une valeur nulle lorsque la valeur d’entrée est plus petite que son seuil négatif. En réglant la valeur de seuil, il est possible de contrôler la fréquence de commutation des IGBT car celui-ci va devenir beaucoup plus sensible aux petites variations de signal. 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

Cette simulation (figure XXX) possède deux différences majeures avec la simulation de l’AFE 2 niveaux idéal. La première différence est la substitution de la source CC parfaite par une pont RC pré chargé à une tension quelconque. Contrairement à la source idéale, il est maintenant nécessaire de contrôler la charge du condensateur pour maintenir la tension du bus CC. La deuxième différence est dans la méthode de contrôle de l’AFE. L’implantation de la nouvelle alimentation du CERN nécessite un échange de puissance dans un seul sens. Ainsi, même si le montage permet de fonctionner dans les 4 quadrants, il est seulement utilisé dans un seul quadrant représenté par un facteur de puissance unitaire (Aucune puissance réactive consommé). Ainsi, il suffit de faire glisser le courant en phase avec la tension pour obtenir un facteur de puissance unitaire et ainsi ne plus avoir à réguler l’angle. Grâce à cette modification, la simulation permet de montrer le maintient d’une tension constante sur le bus CC ainsi que l’échange de puissance entre le réseau et le bus CC dans les spécification de l’alimentation du CERN (2.7 MW).

#### Section – Schéma électrique

Cette section (figure XXX) est semblable à la simulation de l’AFE 2 niveaux sur charge idéale. La principale modification est le remplacement de la source CC par le pont RC (Point 1) pré chargé à la tension voulue et l’ajout de perturbation de charge à l’aide d’un banc de 3 résistances avec interrupteur d’activation (Point 2). Le pont RC est pré chargé car l’AFE n’est pas adapté à une charge de condensateurs. Lorsque la tension du bus CC est plus basse que la tension du réseau CA, l’AFE fonctionne en mode redresseur à diode et applique beaucoup plus de contraintes sur les diodes que nécessaire et qu’il serait nécessaire de les sur-dimensionner. C’est pourquoi, le montage du CERN pré-charge les condensateurs à l’aide d’un autre montage et qu’il est possible de pré-charger les condensateurs de nos simulations. L’ajout de perturbation sur la charge va permettre de vérifier l’efficacité de la simulation en boucle fermée (donc en régulation). Ainsi, ces deux modifications vont ajouter 2 nouveaux paramètres dans le module de pré-programmation, soit :

* **Rch** – Résistance de charge – 9.28 Ω
* **Cbus** – Capacité du bus CC – 300 mF

Le reste est inchangé, les mesureurs du courant et de la tension CA triphasés ainsi que ceux du bus CC sont encore présents. Toutefois, le bloc de mesure tension CC est maintenant intégré à la résistance de charge « Rch »

#### Section – Commande

Comme expliqué précédemment, la commande doit effectuer un travail différent de la simulation AFE 2 niveau sur charge idéale. En effet, celle-ci doit maintenant maintenir la tension du bus CC car la source idéale à été changée pour une pont RC. À contrario, il n’est plus nécessaire de réguler l’angle car celui-ci va se réguler automatiquement en modifiant la méthode de contrôle des interrupteurs. La figure XXX présente ces modifications.

Il est maintenant possible d’opérer le montage en boucle ouverte ou fermée à l’aide de l’interrupteur « Contrôle manuel » (Point 1). Lorsque l’interrupteur est connecté à la branche supérieure le courant maximal « Imax », qui permet de contrôler la charge du condensateur, est imposé par le bloc « Slider » nommé « Imax » (Point 2). Ce mode de fonctionnement est l’opération du montage en boucle ouverte. Lorsque l’interrupteur « Contrôle manuel » est connecté à la branche du bas, le montage opère en boucle fermée. Dans ce mode, il est possible de choisir une consigne de tension du bus CC fixe ou une consigne qui oscille entre deux valeurs pour un certain intervalle à l’aide de l’interrupteur « Contrôle manuel1 » (Point 3). Cette consigne est ensuite soustraite à la tension du bus CC (Point 4) pour être régulé à l’aide d’un PI pour finalement produire le courant « Imax » de contrôle de charge du condensateur.

La figure XXX montre la nouvelle méthode de conversion de la consigne vers le contrôle des interrupteurs IGBT. Nous pouvons voir que le bloc de création de signal triphasé a été remplacé la mesure de la tension du réseau ramenée à un gain unitaire et multipliée par le courant « Imax » de consigne. Cette méthode permet de d’obtenir une référence toujours en phase avec la vrai tension du réseau et ainsi de faire glisser le courant vers la tension pour obtenir un déphasage nul. Le reste de la conversion « Consigne-Contrôle » fonctionne de la même façon que pour la simulation de l’AFE 2 niveaux sur charge idéale.

#### Section – Mesure et affichage

Les mêmes mesures que pour le simulateur AFE 2 niveaux sur charge idéale sont disponibles, soit :

* Tensions et Courants CA et CC affichée dans un « Scope »
* Puissance active, réactive et angle entre le courant et la tension affichée dans un « Scope »
* Commutation des 6 interrupteurs IGBT affichée dans un « Scope »
* Affichage instantané du courant dans le bus CC, de la commande Imax, de la tension du bus CC et de la phase à l’aide de bloc « Display »