

PROPOSITION DE PROJET GEL-3005 DESIGN IV H-14

Pour: Daniel Thibodeau , Gabriel Boivin Desjardins, Francis Valois (Étudiants IGEE)

Par M.Philippe Viarouge LEEPCI Département GEL&GIF Université Laval Québec

Clients : P.Viarouge, H.Le-Huy (LEEPCI) J.Bélanger (OPAL-RT Montréal, Québec)

SIMULATION D'UNE ALIMENTATION DES ÉLECTROAIMANTS D'UN ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES

Contexte de l'application

Complexe d'accélérateurs du CERN: Le complexe d'accélérateurs du CERN est une chaîne de machines qui accélèrent les particules chargées électriquement à des énergies croissantes. Chaque machine augmente l'énergie d'un faisceau de particules avant de l'injecter dans la machine suivante. Dans le grand collisionneur de hadrons (LHC) qui est le dernier maillon de la chaîne d'accélération, les faisceaux de particules sont accélérés jusqu'à une énergie de 4 TeV par faisceau. Les autres accélérateurs de la chaîne sont aussi utilisés pour des expériences réalisées à des énergies plus basses. La source de protons est une simple bouteille d'hydrogène gazeux. Un champ électrique permet d'arracher à des atomes d'hydrogène leurs électrons et d'obtenir des protons. Un premier accélérateur linéaire (Linac) accélère les protons. Le faisceau est ensuite injecté dans le Synchrotron injecteur du PS (PS Booster - PSB), qui accélère les protons jusqu'à 1,4 GeV, puis dans le Synchrotron à protons (PS), qui porte le faisceau jusqu'à 25 GeV. Les protons sont ensuite envoyés au Supersynchrotron à protons (SPS), où ils sont à nouveau accélérés. Enfin, les protons sont envoyés dans les deux tubes de faisceau du LHC. Le faisceau circule dans le sens des aiguilles d'une montre dans le premier tube, et dans le sens inverse dans le deuxième. Les deux faisceaux entrent en collision à l'intérieur de quatre détecteurs (ALICE, ATLAS, CMS et LHCb). Au point de collision, l'énergie totale est de 8 TeV et elle permet d'observer les particules générées.

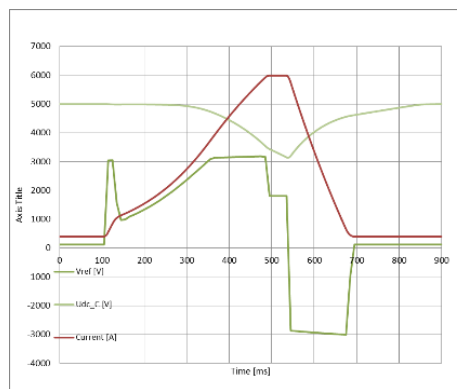
Synchrotron injecteur Booster: Le Booster est constitué de quatre anneaux synchrotron superposés qui reçoivent des faisceaux de protons de l'accélérateur linéaire (Linac) pour les accélérer avant de les injecter dans le Synchrotron à protons (PS). Le Booster permet au PS d'accepter cent fois plus de protons, ce qui améliore considérablement les possibilités d'utilisation du faisceau pour les expériences. La force de Lorentz qui s'exerce sur une particule chargée comporte deux composantes, une composante axiale proportionnelle au champ électrique appliqué et une composante radiale proportionnelle au champ magnétique appliqué et à sa vitesse instantanée. Dans un accélérateur de type synchrotron, la circulation des groupes de particules est synchronisée sur les variations du champ électrique généré dans des cavités RF accélératrices alimentées par des amplificateurs RF de type Klystron (eux-mêmes alimentés par des convertisseurs d'électronique de puissance pulsés qui font l'objet de recherches au LEEPCI). De puissants électroaimants générant des champs magnétiques intenses sont disposés le long de l'anneau du synchrotron de manière à maintenir le faisceau des particules accélérées par le champ électrique sur une trajectoire circulaire en les soumettant à un champ magnétique variable suivant leur vitesse. Les variations du champ électrique dans les cavités accélératrices et du champ magnétique des électroaimants qui contrôlent la trajectoire sont asservies

par un système de commande complexe de manière à maintenir la stabilité et la focalisation du faisceau au cours du processus d'accélération.

Alimentation des électroaimants du Booster:

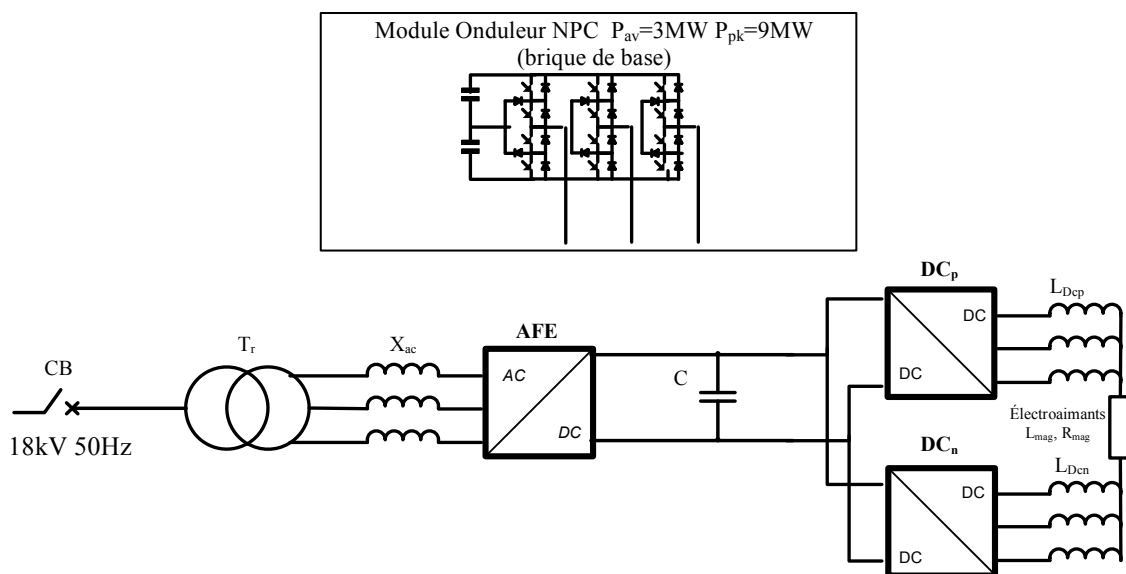
L'application concernée par le projet concerne une nouvelle alimentation de grande puissance des électroaimants d'une nouvelle version Booster qui est actuellement en cours de réalisation et qui permettra de porter sa puissance de 1.4GeV à 2GeV. Les principaux électroaimants du synchrotron sont mis en série et le fonctionnement du booster impose qu'ils soient alimentés par des impulsions de courant cycliques et unidirectionnelles dont la forme trapézoïdale doit être contrôlée très précisément. Ces impulsions dont la largeur est de l'ordre de 600ms et qui varient de 0 à 6000A CC sont délivrées par un convertisseur CC-CC 4 quadrants alimenté par un bus CC de 5kV maximum (Cf Fig.1).

Fig.1 Cycle de fonctionnement du Booster : Courant (en rouge) et tension (en vert foncé) dans les



électroaimants et tension aux bornes de la capacité du bus CC (en vert clair)

Fig.2 Schéma-Bloc de l'alimentation des électroaimants



Le bus CC comporte un grand banc de capacité de stockage $C=300\text{mF}$ utilisé pour filtrer les fluctuations de puissance dans le réseau alternatif triphasé à 18kV lors du fonctionnement du booster.

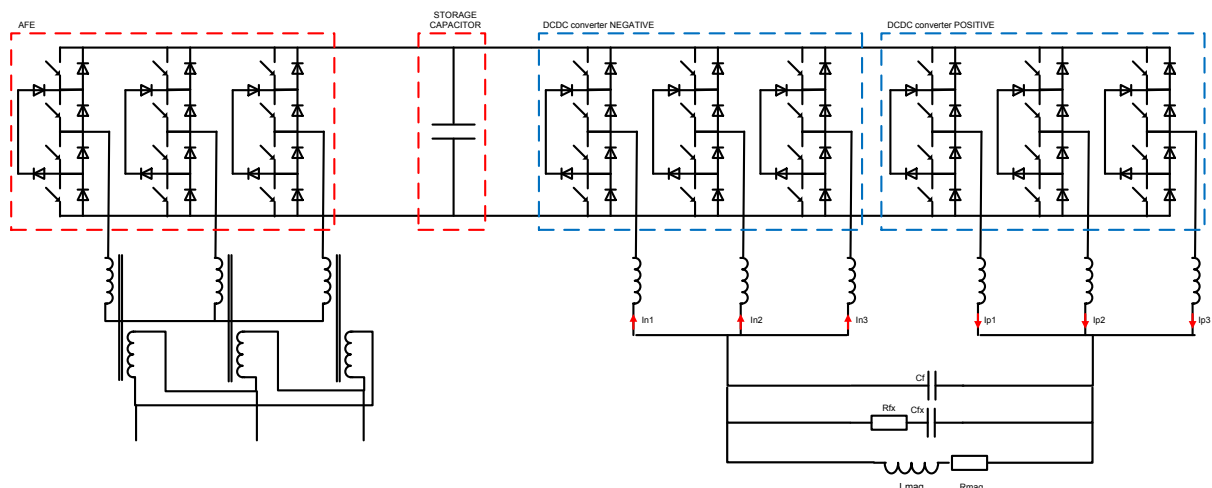
Le bus CC ($U_{\text{dcmax}}=5\text{kV}$) est alimenté à partir du réseau par un transformateur abaisseur T_r (2500kVA $18\text{kV}/2\text{kV}$) ($X_{\text{ac}}=16\%$ of T_r) et un convertisseur AC-DC (**AFE** : «Active Front-End», fréquence de modulation 1kHz) régulé pour atténuer les perturbations du côté alternatif reliées aux variations impulsionnelles de la puissance instantanée de l'application.

La puissance crête fournie par le réseau alternatif est limitée à 3.6MW et sa valeur moyenne à 2.7MW . Une partie de la puissance instantanée délivrée à l'électroaimant ($L_{\text{mag}}=0.1\text{H}$ $R_{\text{mag}}=0.28\Omega$) est donc fournie par les capacités de stockage placées C dans le bus continu, ce qui permet de réduire les perturbations dans le réseau.

Compte tenu des niveaux de puissance, le convertisseur CC-CC 4 quadrants est formé par l'association de deux convertisseurs DC_p et DC_n . Les convertisseurs **AFE**, DC_p et DC_n utilisent la même topologie qui est une brique de base de type **onduleur triphasé à 3 niveaux NPC** (« Neutral Point Clamped » à diodes) avec des inductances de découplage. La commande des 3 bras de chaque onduleur est de type entrelacée à 120° de manière à multiplier la fréquence de l'ondulation de la tension de sortie par rapport à la fréquence de commutation des interrupteurs élémentaires. La fréquence de l'ondulation de courant dans les électroaimants est en effet une spécification très serrée de l'application. La fréquence de commutation des interrupteurs est limitée à 333Hz pour des raisons liées au comportement thermique et à la durée de vie des IGBT car la robustesse et la fiabilité du fonctionnement pulsé sur une longue période est une caractéristique spécifique importante de ce type d'application.

L'AFE est aussi un onduleur triphasé à 3 niveaux NPC. Le schéma de puissance détaillé est présenté à la Fig.2

Fig.2 Schéma de puissance de l'alimentation des électroaimants du Booster



Objectifs, Besoins du client et Biens Livrables du projet

Le projet consiste d'une part à réaliser plusieurs outils de simulation des divers sous-systèmes de l'alimentation décrite (Onduleur NPC seul, AFE et sa commande seuls, DC_p et DC_n et leur commande seuls) jusqu'à la simulation complète du système (dans la mesure des contraintes liées aux outils de simulation employés) et d'autre part à implanter ces simulations dans Simpowersystems, PSIM et dans le système de simulation temps réel fourni par OPAL-RT.

Les objectifs détaillés de ce projet sont :

- Étudier en détail, modéliser et simuler la configuration de base onduleur triphasé à 3 niveaux NPC et en fournir un outil de dimensionnement préliminaire à partir d'un cahier des charges qui sera fourni par le client.
- Modéliser et simuler la commande de cette structure de base dans le cas de l'AFE, la charge étant représentée de manière simplifiée.
- Implanter et faire la validation croisée des simulations dans PSIM, Simpowersystems et dans le simulateur temps-réel d'OPAL-RT
- Modéliser et simuler le convertisseur CC-CC 4 quadrants formé par l'association de plusieurs cellules de base de type onduleur triphasé à 3 niveaux NPC avec des inductances de découplage. Fournir un dimensionnement préliminaire des modules à partir du cahier des charges.
- Modéliser et simuler la commande de ce convertisseur alimentant la charge spécifiée.
- Implanter la simulation dans PSIM, Simpowersystems et dans le simulateur temps-réel d'OPAL-RT, effectuer la validation croisée des divers outils
- Livrer les divers outils de dimensionnement et de simulation opérationnels et documentés sur les 3 plateformes considérées. L'accent doit être mis sur une présentation pédagogique des outils afin qu'ils puissent être utilisés comme support de formation par OPAL-RT, le LEEPCI et le CERN.

Responsables au LEEPCI Université Laval : Prof. Dr. Philippe Viarouge et H.Le-Huy

Bibliographie Préliminaire

- *Fonctionnement des accélérateurs et CERN* : (.ppt et pdf du domaine public téléchargeables)

<http://home.web.cern.ch/fr/about/accelerators>

<http://education.web.cern.ch/education/Chapter2/Teaching/accelerators.html>

- *Onduleur trois niveaux NPC*

<http://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42253210-d3176.pdf>

<http://newsletter.epfl.ch/sti/index.php?module=epflfiles&func=getFile&fid=102&inline=1>

http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2005/3188/EPFL_TH3188.pdf

http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001590/01/beltramini_partie_1_sur_2.pdf

http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1574975

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04592366>

- *Outils de simulation*

PSIM (Simulation software specifically designed for power electronics and motor drives)

<http://powersimtech.com/download-demo/> (d  mo gratuit)

D  mo Simpowersystem

power_3levelVSC

<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threelevelbridge.html>

http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples_v2/neutral-point-clamp-inverter-and-dead-time.html

P.Viarouge LEEPCI 02-01-2014