

Simulation d'une alimentation des électroaimants d'un accélérateur de particules. (RAF)

Par l'équipe Électrosim

Contexte et problématique

Clients du projet

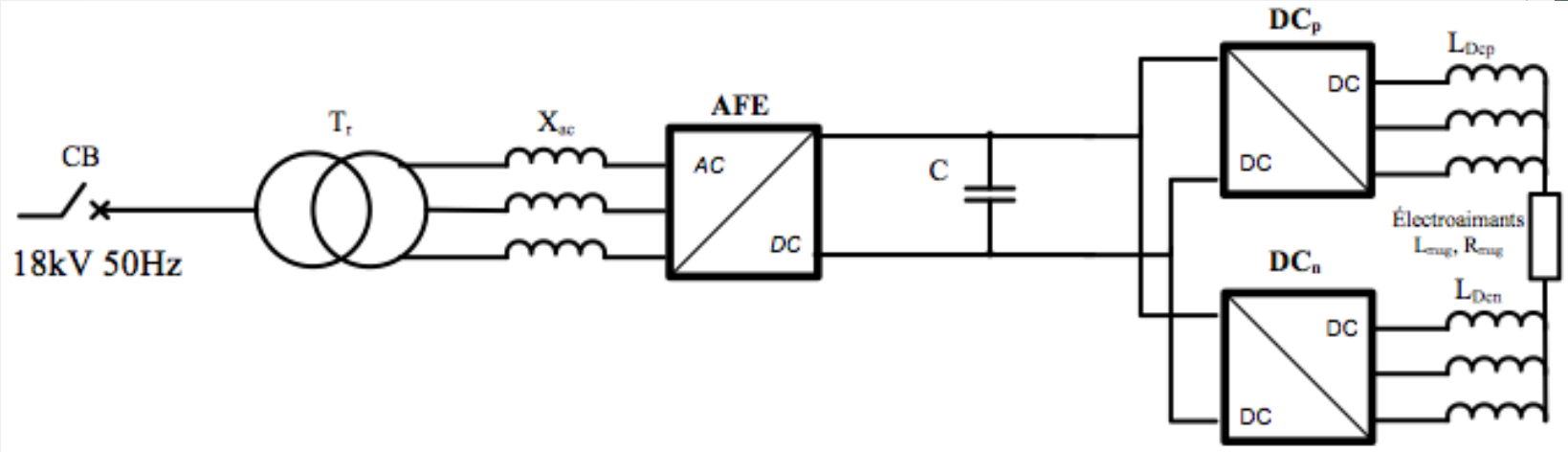


- ▶ Le CERN est un laboratoire de recherche multidisciplinaire sur la physique fondamentale
 - ▶ Le CERN est situé en Suisse (Genève)
 - ▶ Le laboratoire est constitué d'une chaîne complexe d'accélérateurs de particules
- ▶ Le LEEPCI est un laboratoire de recherche de l'université Laval et se concentre sur la
 - ▶ simulation de réseaux électriques;
 - ▶ modélisation et conception de machines électriques;
 - ▶ modélisation et conception de convertisseurs d'électronique de puissance.
- ▶ OPAL-RT est une compagnie spécialisée dans la développement de simulateurs temps réel PC/FPGA

Rappel des objectifs

- ▶ Livrer 3 outils de dimensionnement (interrupteurs et régulateurs)
 - ▶ Chaque outil doit être convivial et facile d'emploi
 - ▶ Ils permettent de valider modèles et méthodes de simulation employés sur 3 plateformes (SPS, PSIM, OPAL-RT)
- ▶ Livrer un simulateur sur 3 plateformes
 - ▶ Les 3 simulateurs doivent remplir les fonctionnalités attendues (exemple: alimenter la charge avec une forme de courant trapézoïdale présentant une faible ondulation)
 - ▶ Plateformes: Matlab (SPS), PSIM, Opal-RT (OPA500)
- ▶ Livrer une documentation technique de référence décrivant l'utilisation de chacun des simulateurs ainsi que les modèles mathématiques utilisés.
- ▶ Implanter une validation croisée des 3 simulateurs

Système complet



- AFE « Active Front End »

- Redresseur triphasé 3 niveaux NPC
- Permet de charger le banc de condensateurs et de maintenir la tension du bus CC
- Permet de réguler le facteur de puissance côté réseau (régulation d'angle)
- Permet de réguler le courant côté réseau (régulation de l'amplitude du courant)

- DC_p DC_n

- Hacheur 4 quadrants formé par l'association de 2 cellules onduleur NPC 3 niveaux triphasées
- Permet de fournir une forme de courant précise aux électroaimants
- Fonctionne dans les 4 quadrants (peut redonner de la puissance au banc de condensateur selon la tension appliquée sur les électroaimants)

Outil de contrôle et dimensionnement

- L'outil de dimensionnement est utilisé pour des fins de contrôle des intrants de simulation.
- Permet de lancer la simulation et de dimensionner les différentes composantes du système.
- Il est possible de lancer une simulation sur SPS.
- L'adaptation sur PSIM est faite, mais requiert tests et ajustements sur la plateforme du client.
- L'outil de dimensionnement fournit les outils nécessaires pour dimensionner les modèles SPS utilisables sur le simulateur temps réel.

Outil de contrôle et dimensionnement (Réglages initiaux)

A	B	C	D	E	F
Options générales					
Simulations disponibles	Nom de la simulation Simulink	Nom de la simulation Psim			Dossier des simulations
AFE					D:\Documents\GitHub\DesignIV\Remise\Simulation\AFE\
AFE 2 niveaux - Hystérésis - Charge Idéale	AFEDT1.slx	AFEDT1.psimsch			
AFE 2 niveaux - Hystérésis - Charge RC	AFEDT1_RC.slx	AFEDT1_RC.psimsch			
AFE 2 niveaux - PWM - Charge RC	AFEDT1_RD_PI.slx	AFEDT1_RD_PI.psimsch			
AFE 3 niveaux - Hystérésis - Charge idéale	AFEDT1_3L.slx	AFEDT1_3L.psimsch			
AFE 3 niveaux - Hystérésis - Charge RC	AFEDT1_3L_RC.slx	AFEDT1_3L_RC.psimsch			
AFE 3 niveaux - PWM - Charge RC	AFEDT1_3L_RC_PI.slx	AFEDT1_3L_RC_PI.psimsch			
DCP-DCN				Mettre à jour les paramètres	
Hacheur 4 Quadrants - PWM	NPC_1.slx				
DCP-DCN 3 niveaux - Hystérésis	NPC_1_modifs.slx				
DCP-DCN 3 niveaux - PWM	NPC_1_modifs.slx				
Assemblage complet					
Simulation Complète	NPC_1_modifs.slx				

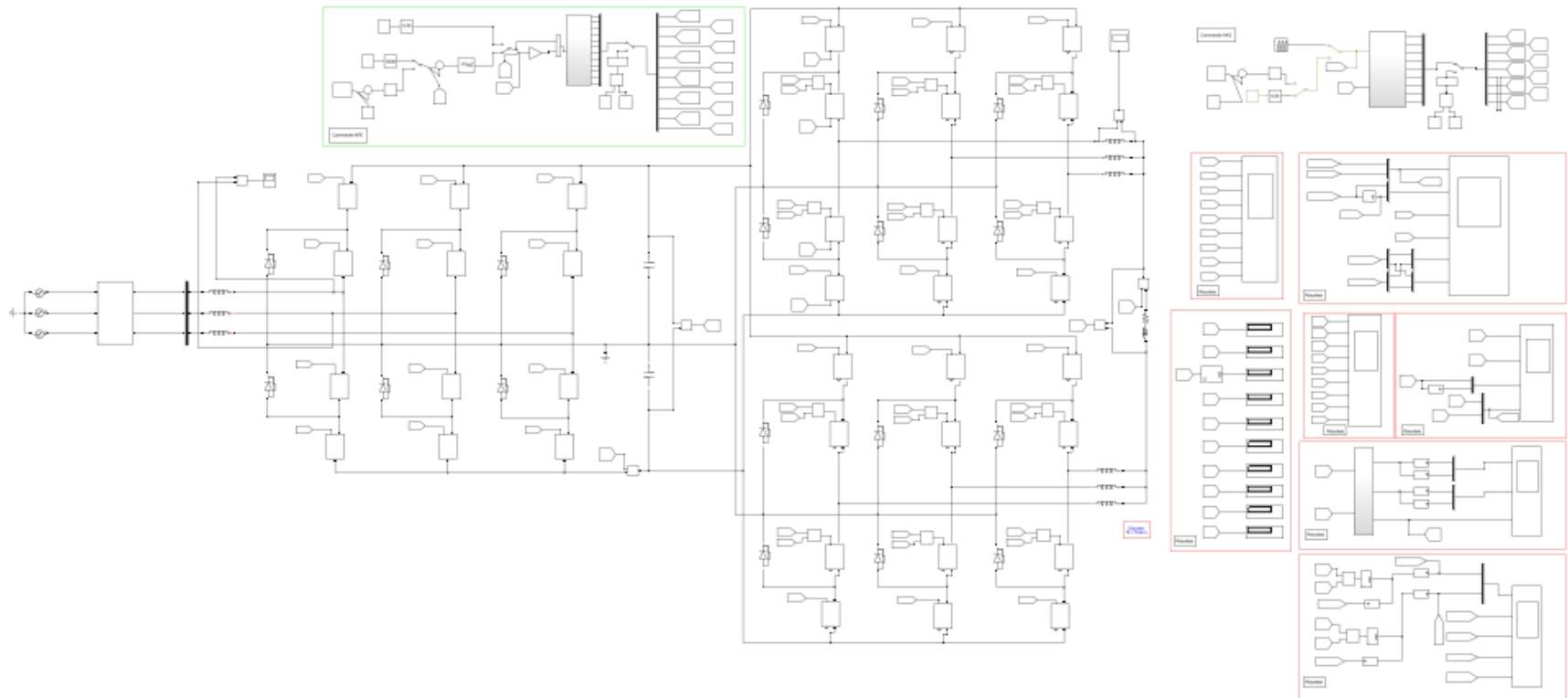
Outil de contrôle et dimensionnement (Paramètres de simulation)

Paramètres des simulations																			
Paramètres généraux																			
Pas de calcul	1.00E-05	Tpas	Type de simulation DCP-DCN																
Durée de simulation	0.90	Timer																	
Fréquence	50.00	Freq																	
Sensibilité pour la tension moyenne	3000	ech	Choix de la simulation Test																
Inductance de découplage	1.00E-05	Lcoup																	
Résistance IGBT	1.00E-02	Ron																	
Hysteresis	450	hys	Logiciels de simulation Psim																
Fréquence de modulation	1000	fmod4Q																	
Valeurs des électroaimants																			
Résistance	0.28	R																	
Inductance	0.1	L																	
Valeurs des subbers RC																			
Résistance	100000	Rs																	
Capacité	Inf	Cs																	
Valeurs des sources																			
Tension CA LL RMS	2000	Vac	Affichage des résultats <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nom</th> <th>Choix</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Puissance dans la charge</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Tension de la source</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Courant de la source</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Tension sur la charge</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Courant dans la charge</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Tension sur T1</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Courant dans T1</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>	Nom	Choix	Puissance dans la charge	<input checked="" type="checkbox"/>	Tension de la source	<input type="checkbox"/>	Courant de la source	<input type="checkbox"/>	Tension sur la charge	<input type="checkbox"/>	Courant dans la charge	<input type="checkbox"/>	Tension sur T1	<input type="checkbox"/>	Courant dans T1	<input type="checkbox"/>
Nom	Choix																		
Puissance dans la charge	<input checked="" type="checkbox"/>																		
Tension de la source	<input type="checkbox"/>																		
Courant de la source	<input type="checkbox"/>																		
Tension sur la charge	<input type="checkbox"/>																		
Courant dans la charge	<input type="checkbox"/>																		
Tension sur T1	<input type="checkbox"/>																		
Courant dans T1	<input type="checkbox"/>																		
Tension CC	5000	Vdc																	
Courant Maximal dans la charge	1469.7	Satv																	
Inductance de source	8.15E-04	Lac																	
Valeurs de la charge - AFE																			
Résistance	9.28	Rch																	
Capacité	0.3	Cbus																	
Paramètres du PI - Courant AFE - 2 Niveaux																			
P	25.72428	Pv																	
I	9.26	Iv																	

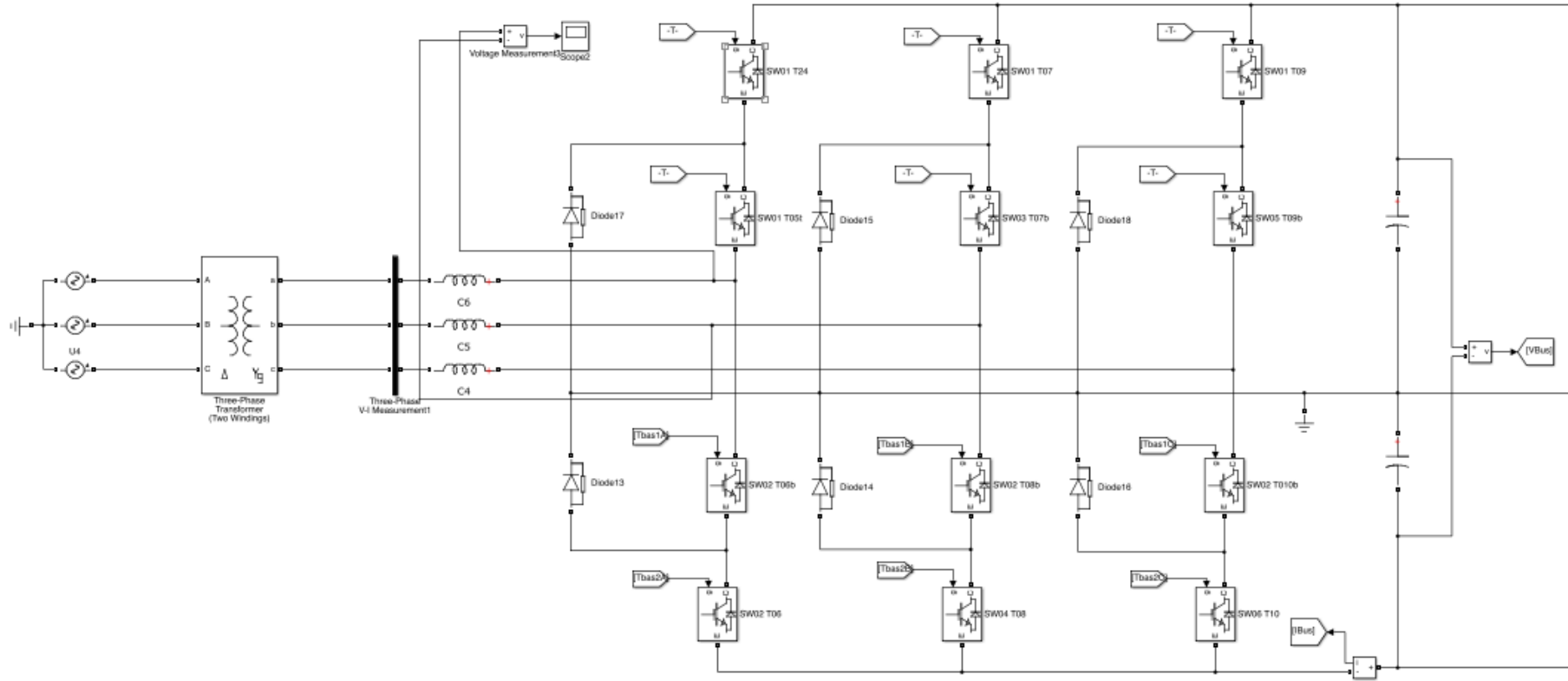
Outil de contrôle - Démonstration

- ▶ Réglages des paramètres initiaux
- ▶ Réglages des paramètres de simulation
- ▶ Lancement de la simulation SPS (H4Q)
- ▶ Lancement de la simulation Psim (H4Q)
- ▶ Affichage de résultats

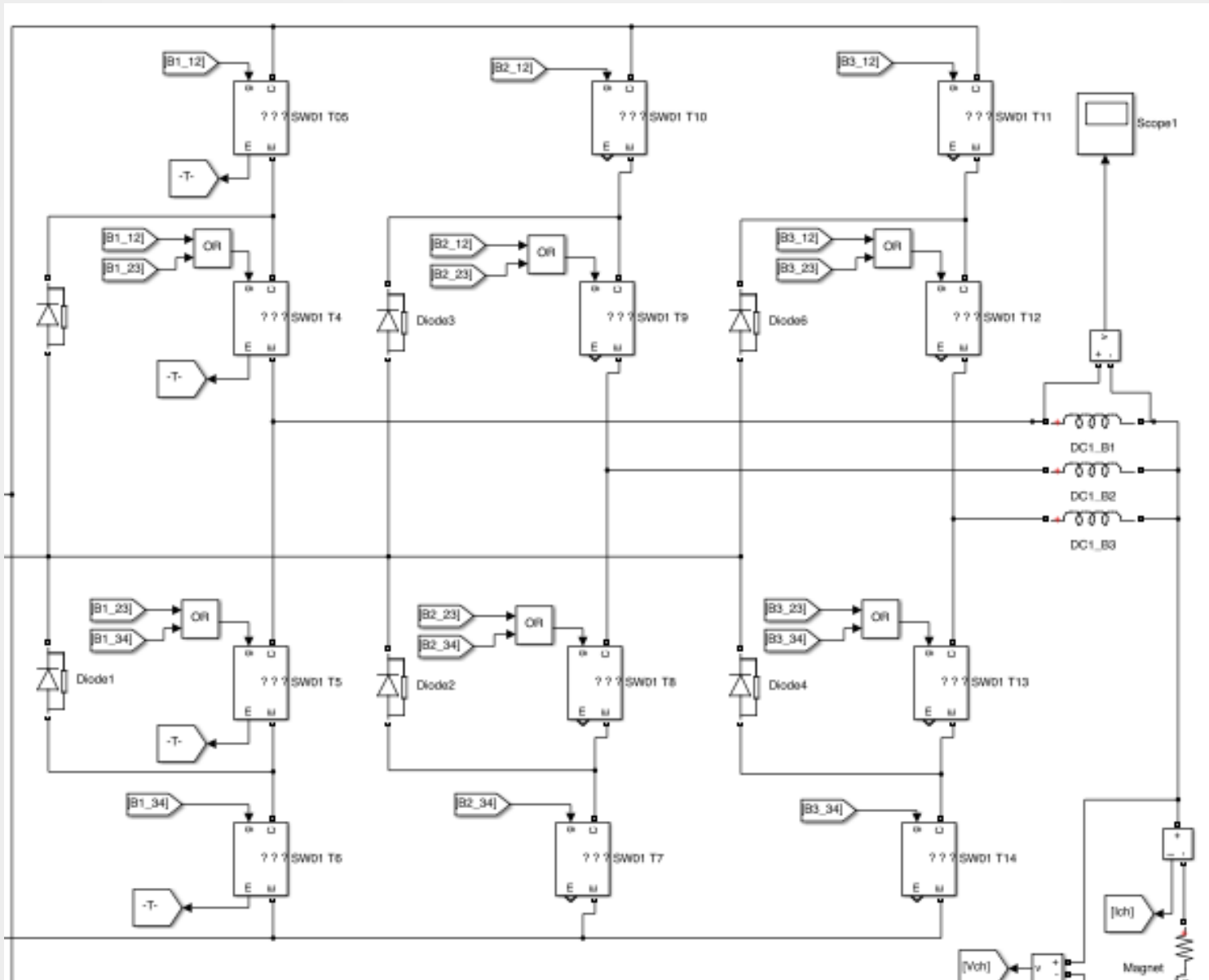
Simulation complète (SPS)



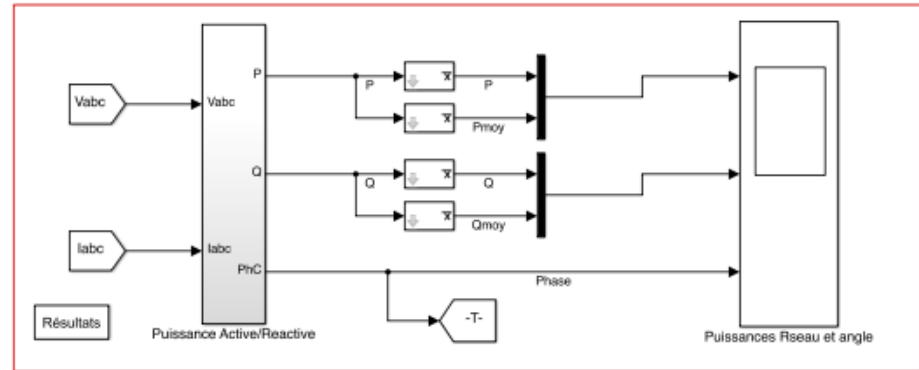
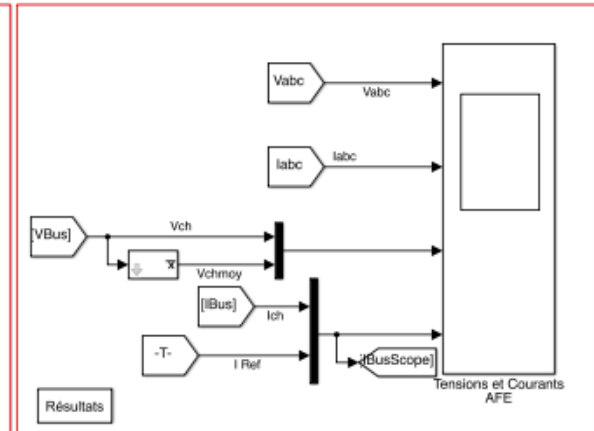
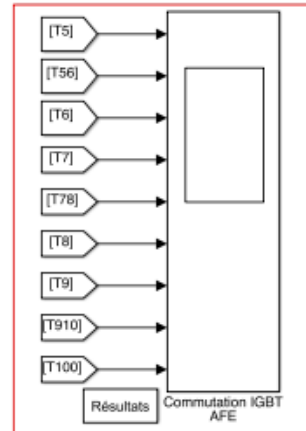
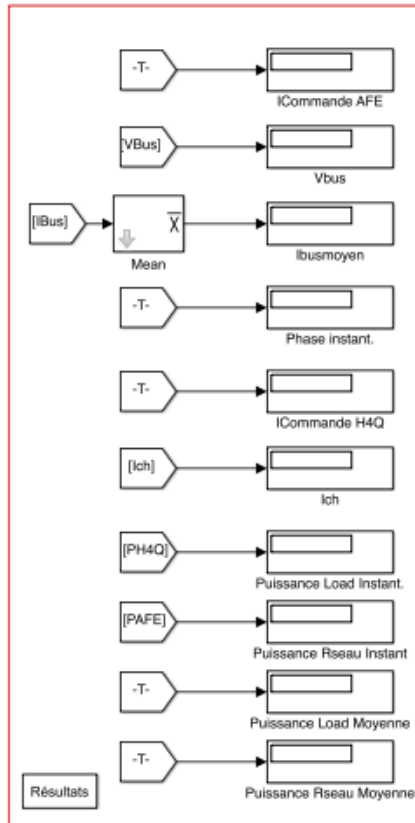
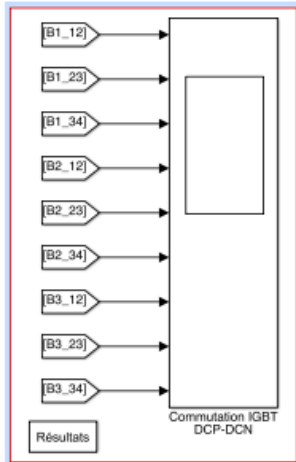
AFE (SPS)



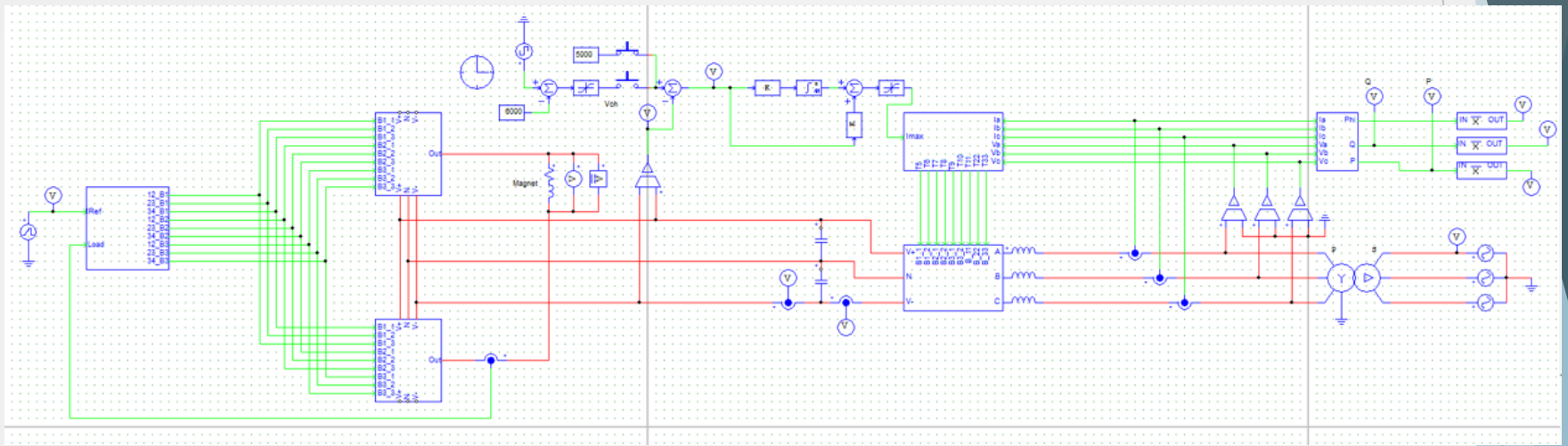
DCP-DCN (SPS)



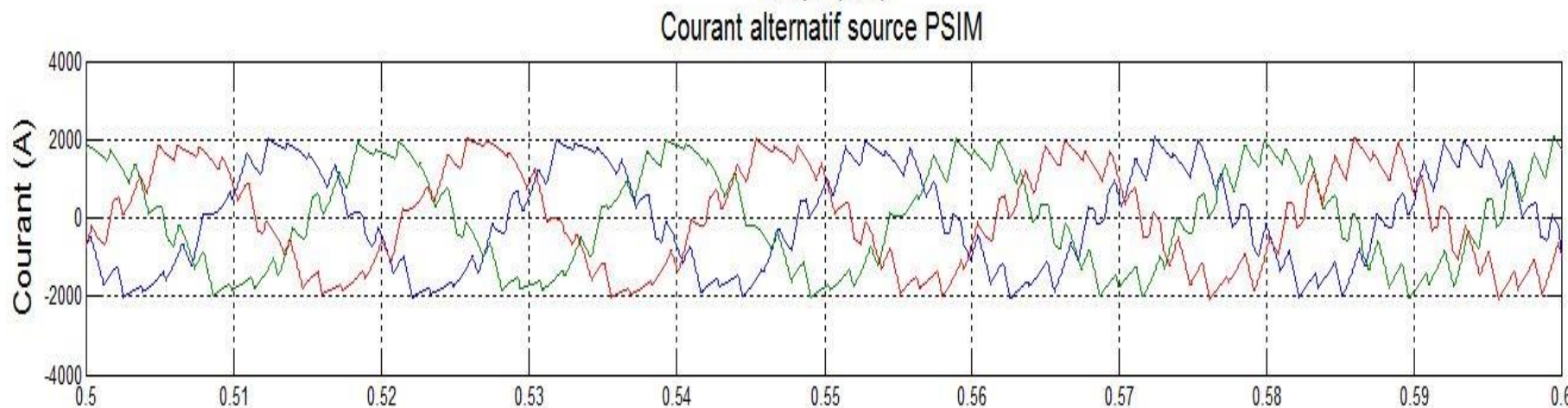
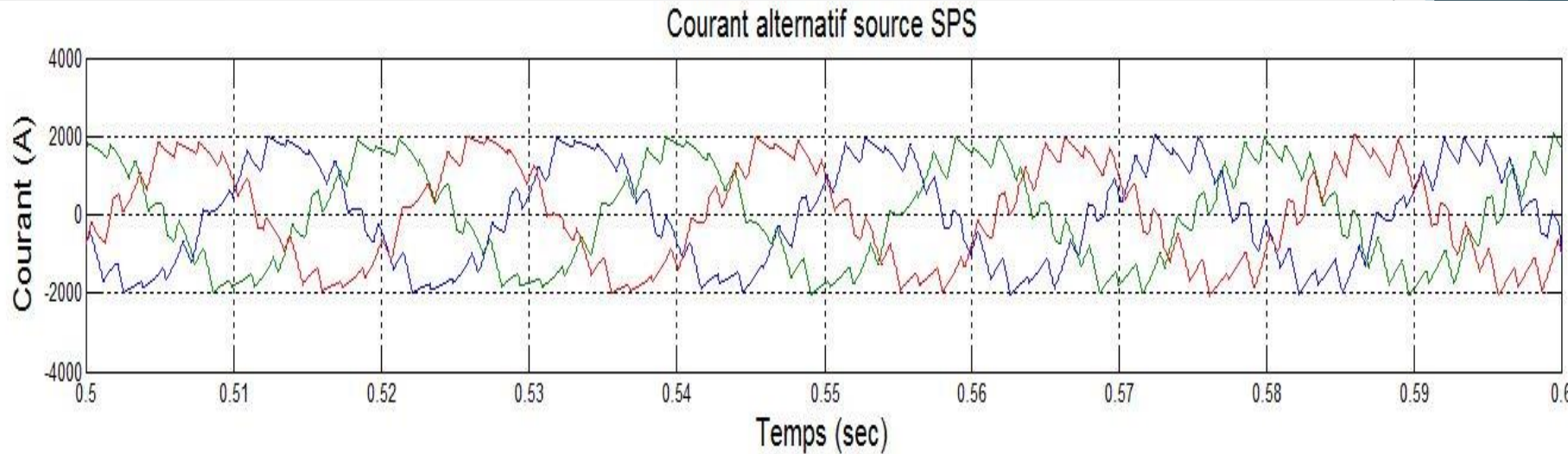
Affichages personnalisés (SPS)



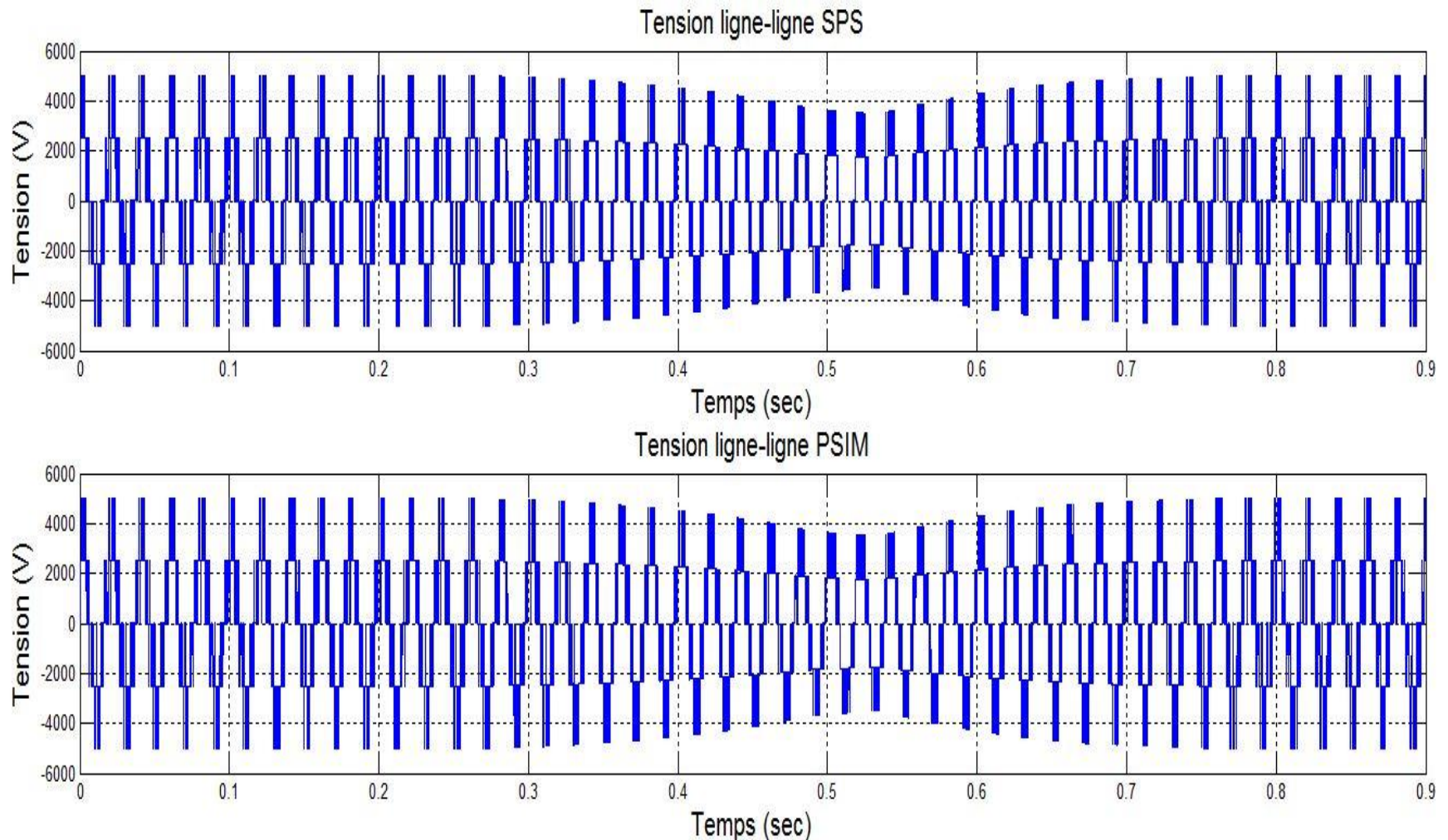
Simulation complète (PSim)



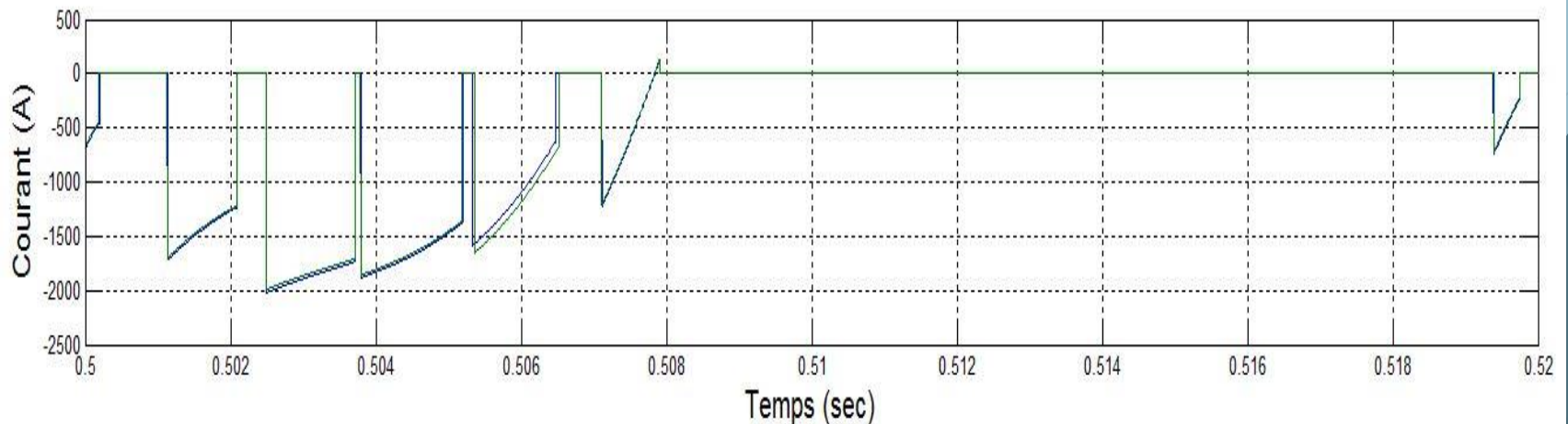
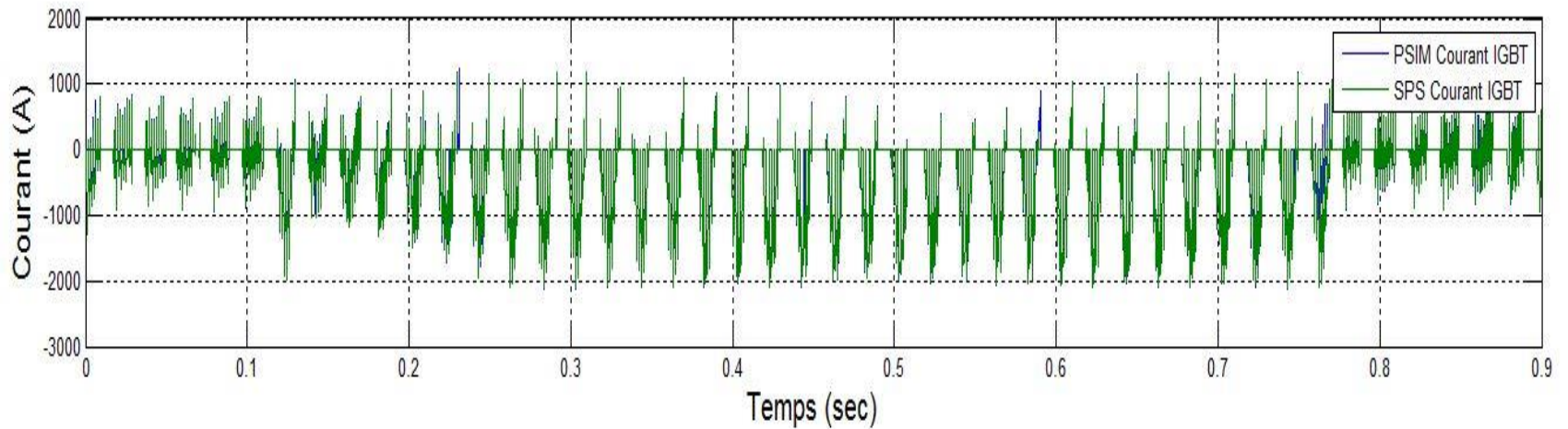
Validation croisée (Courant d'entrée AFE)



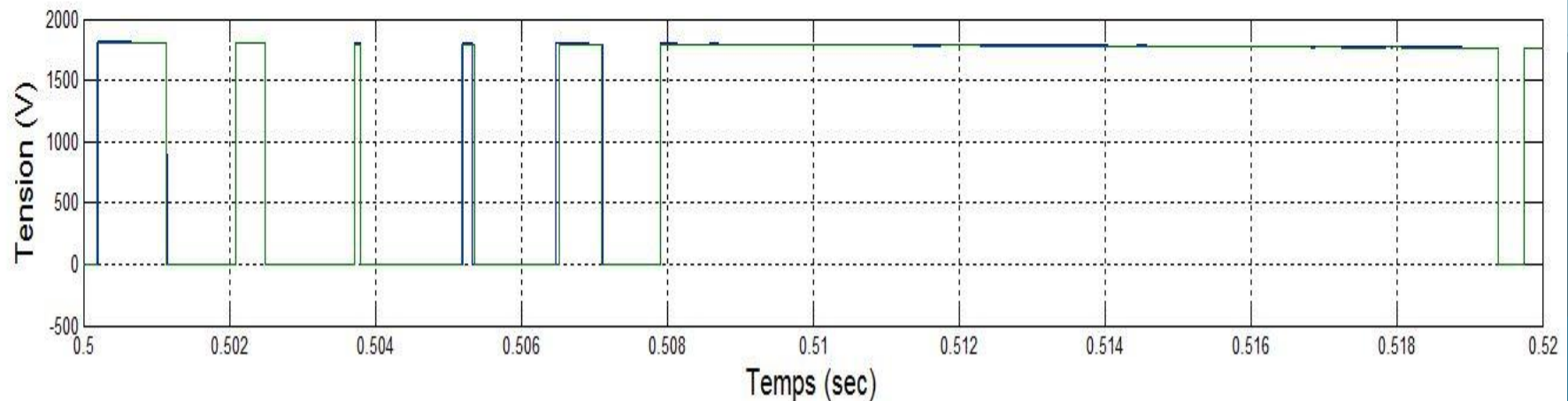
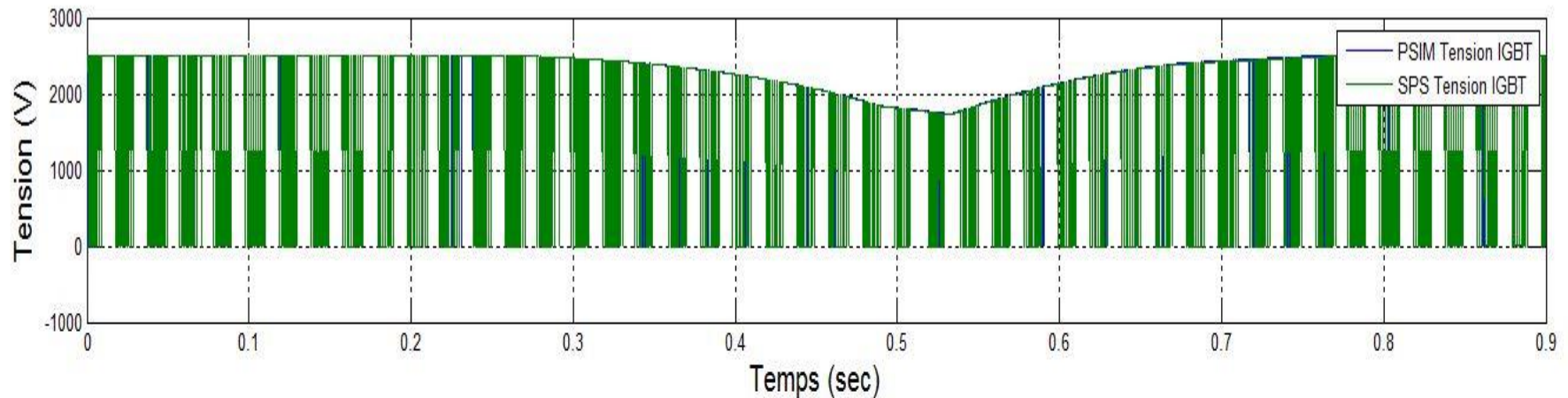
Validation croisée (Tension ligne-ligne AFE)



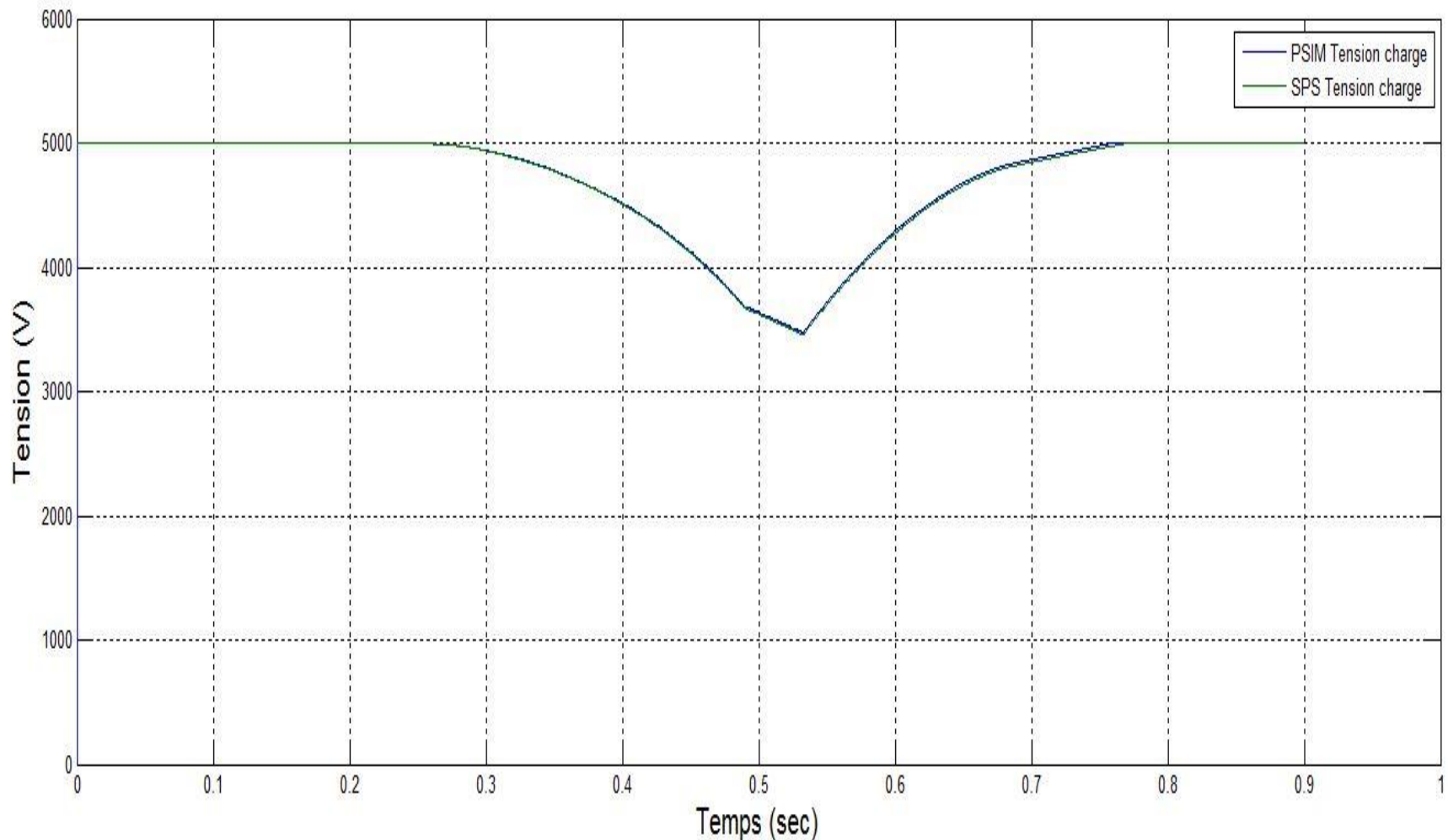
Validation croisée (Courant IGBT AFE)



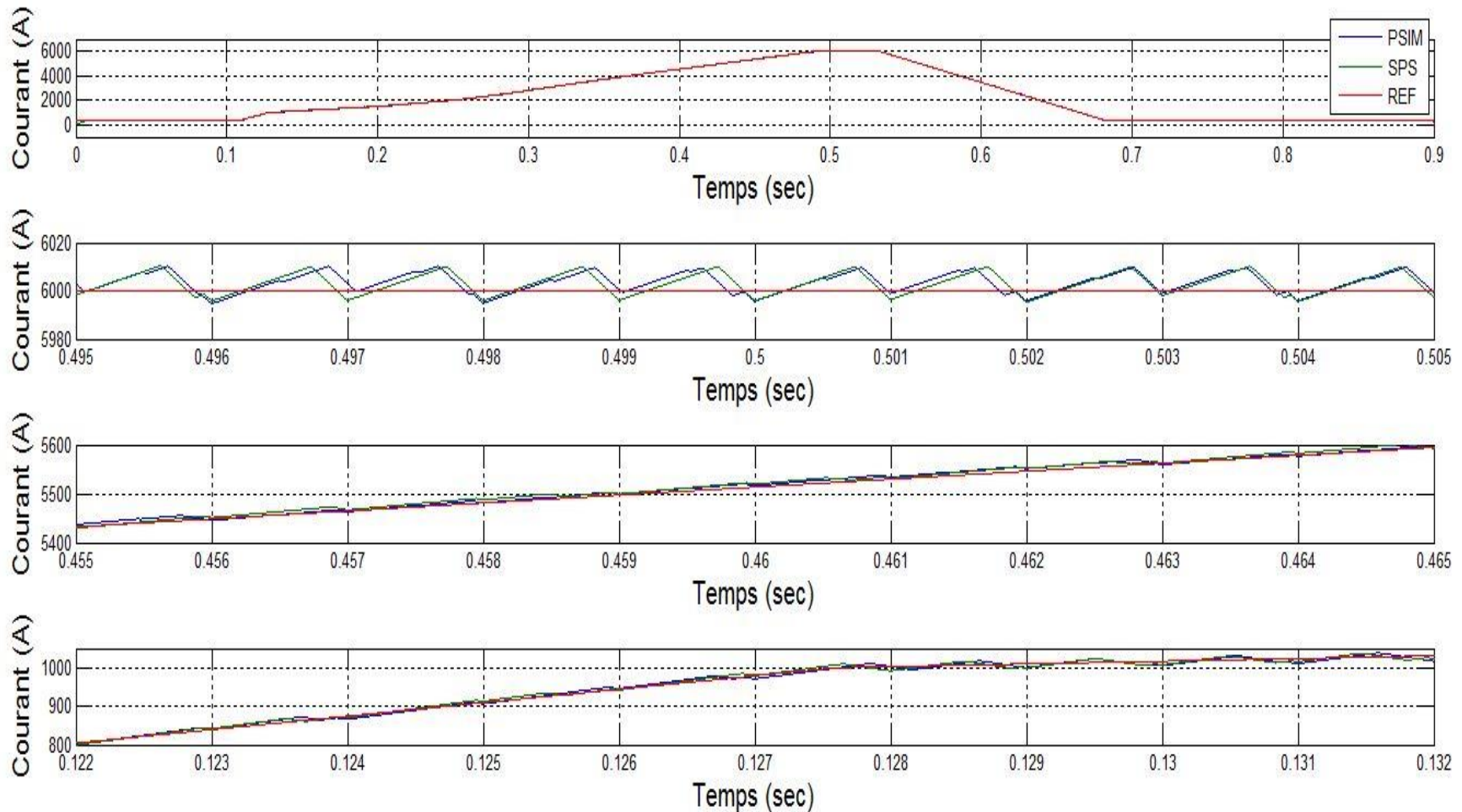
Validation croisée (Tension IGBT AFE)



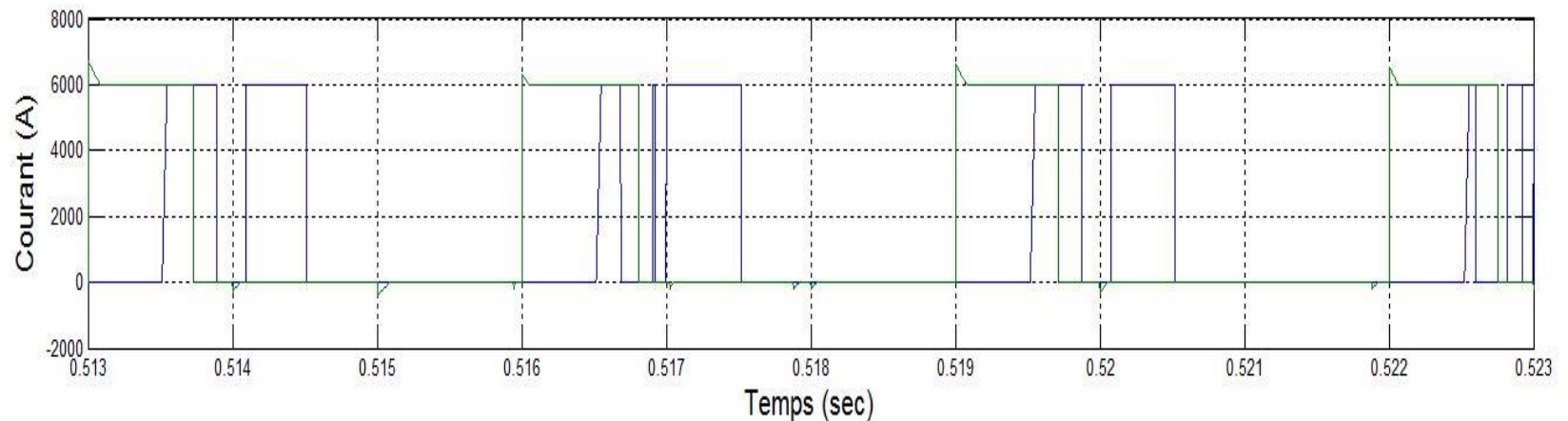
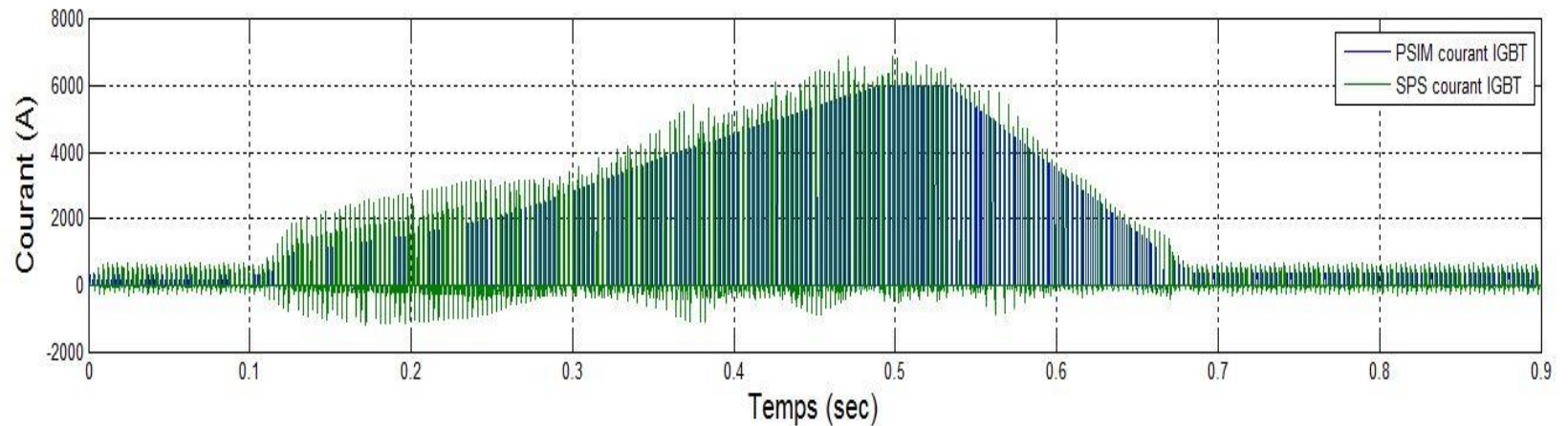
Validation croisée (Tension bus CC)



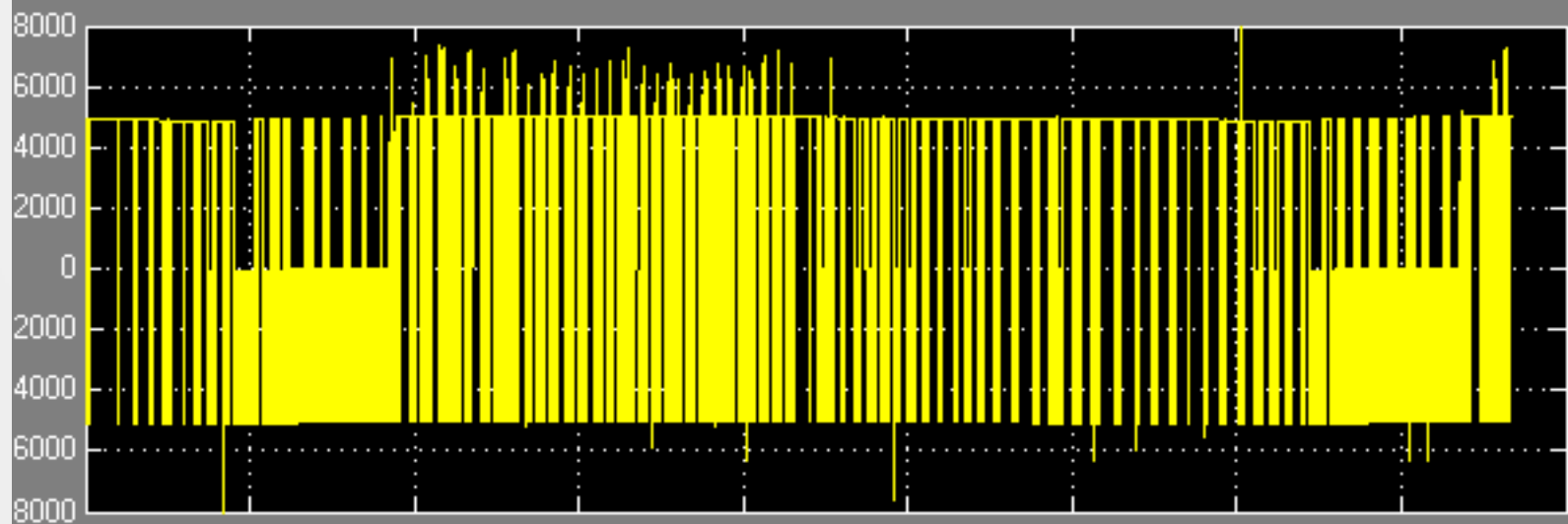
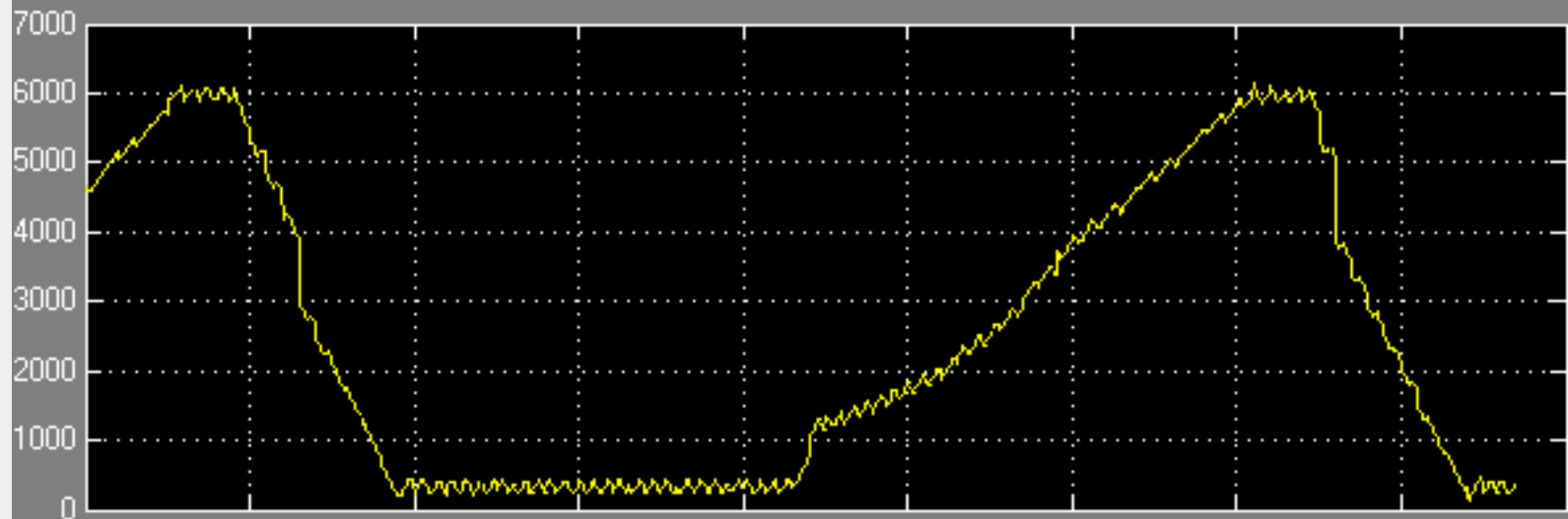
Validation croisée (Courant Charge)



Validation croisée (Courant IGBT DCP-DCN)



Opal-RT - Présentation



Plan de test du système intégré

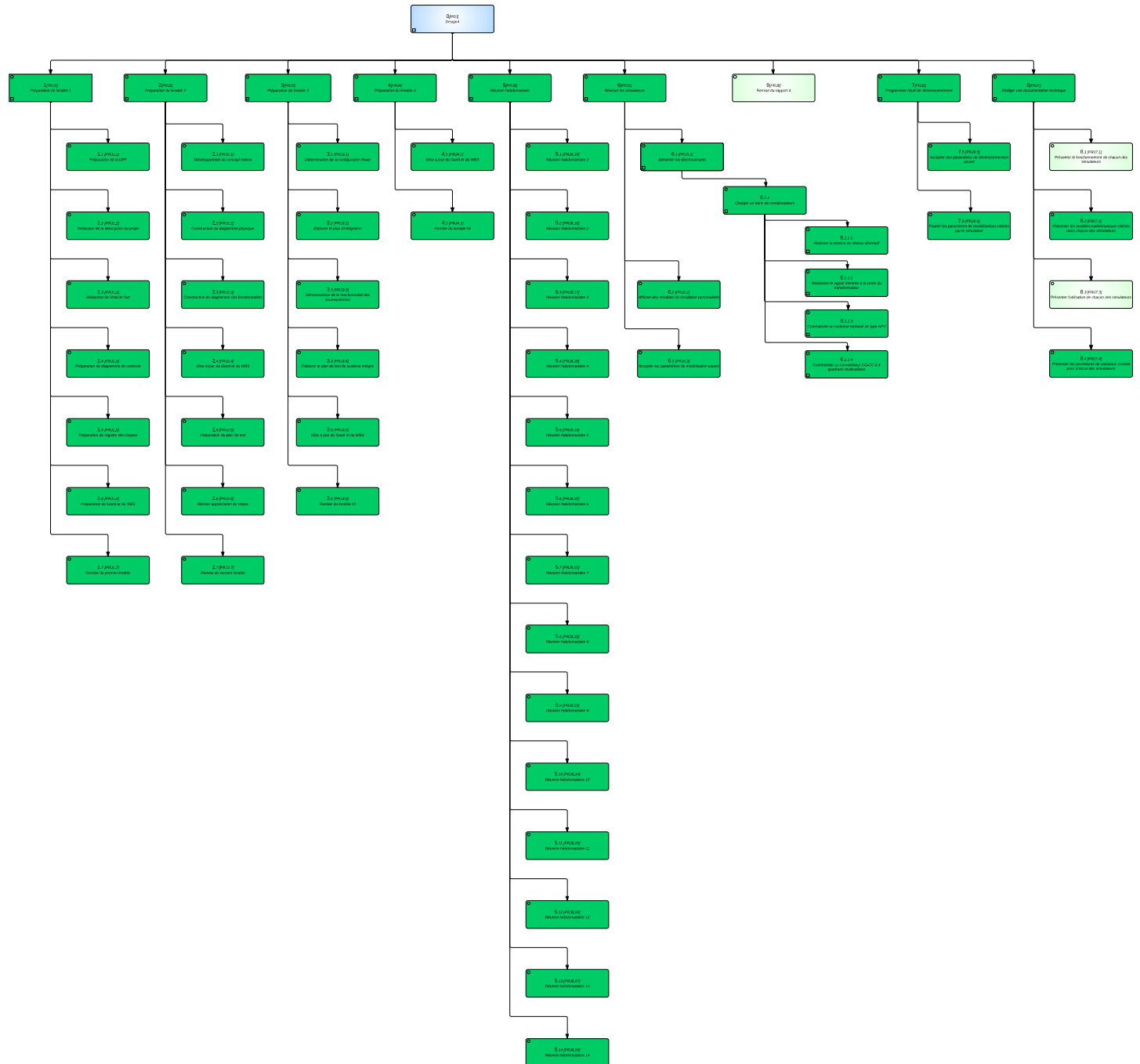
Niveau	Sous-niveau	Méthode de vérification	Méthode d'analyse	Spécification
Phase 1: Modélisation convertisseur 4 quadrants de base	Commander un convertisseur CC-CC à 4 quadrants	Test sur 3 plateformes	Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence	$\Delta I \leq 25A$
	Accepter des paramètres de modélisation	Test sur SPS et Psim	Injecter un paramètre de modélisation et vérifier que la variation a lieu	
Phase 2: Alimentation des électroaimants avec une forme de courant précise au moyen d'un convertisseur CC-CC formé de 2 cellules NPC 3 niveaux	Commander un onduleur triphasé de type NPC	Test en boucle ouverte et en boucle fermée	Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence	$\Delta I \leq 25A$
	Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules	Test en boucle fermée du système avec charge RL équivalente	Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence et comparaison de la tension moyenne avec courbe de référence	$\Delta I \leq 25A$
	Afficher des résultats de simulation personnalisés	Test	Oui/Non le critère est-il rempli?	
Phase 3: Redresser le signal d'entrée avec un redresseur actif et régler le facteur de puissance vu à l'entrée	Charger un banc de condensateur	Test sur SPS et Psim	Courbe de charge stable avec temps de charge minimal	$t \leq 2s$, $P_{max} \leq 3.6MW$, $P_{moy} = 2.7MW$
	Redresser le signal d'entrée à la sortie du transformateur	Test sur SPS et Psim	Vérification angle de charge par rapport à l'angle de charge imposé, Vérification de la tension moyenne à la charge par rapport à celle imposée en régime permanent	$\Delta V_{max} \leq 50V$, $\Delta \Phi \leq 2^\circ$
Phase 4: Outil de dimensionnement	Accepter des paramètres de dimensionnement usuels	Test sur Excel	Oui/Non le critère est-il rempli?	
	Fournir les paramètres de modélisation utilisés par le simulateur	Test sur Excel	Oui/Non le critère est-il rempli?	
Phase 5: Documentation technique	Présenter les procédures de validation croisées de chacun des simulateurs	Test de la méthode sur les plateformes	Oui/Non le critère est-il rempli?	
	Présenter l'utilisation de chacun des simulateurs	Test de la méthode sur les plateformes	Oui/Non le critère est-il rempli?	
	Présenter les modèles mathématiques utilisés dans chacun des simulateurs	Test sur les plateformes	Oui/Non le critère est-il rempli?	

Matrice de vérification des exigences

Niveau	Sous-niveau	Méthode d'analyse	Spécification	Performance	Marge	Commentaires
Phase 1: Modélisation convertisseur 4 quadrants de base	Commander un convertisseur CC-CC à 4 quadrants	Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence	$\Delta I \leq 25A$	$\pm 10A$	$\pm 15A$	Superposition du courant à la charge sur SPS et PSIM, amplitude et fréquence
	Accepter des paramètres de modélisation	Injecter un paramètre de modélisation et vérifier que la variation a lieu		La variation demandée se produit		Des changements ne compromettant pas la stabilité du système ont été testés
Phase 2: Alimentation des électroaimants avec une forme de courant précise au moyen d'un convertisseur CC-CC formé de 2 cellules NPC 3 niveaux	Commander un onduleur triphasé de type NPC	Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence	$\Delta I \leq 25A$	$\pm 10A$	$\pm 15A$	
	Alimenter les électroaimants de l'accélérateur de particules	Comparaison du courant dans la charge par rapport au courant de référence et comparaison de la tension moyenne avec courbe de référence	$\Delta I \leq 25A$	$\pm 15A$	$\pm 10A$	
	Afficher des résultats de simulation personnalisés	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
Phase 3: Redresser le signal d'entrée avec un redresseur actif et régler le facteur de puissance vu à l'entrée	Charger un banc de condensateur	Courbe de charge stable avec temps de charge minimal	$t \leq 2s$, $P_{max} \leq 3.6MW$, $P_{moy} \leq 2.7MW$	$t = 0.31s$, $P_{moy} = 2.53MW$ et $P_{max} = 3.55MW$ pour PSIM, $P_{moy} = 2.58MW$ et $P_{max} = 3.56MW$ pour SPS	$\Delta t = 1.69s$, $\Delta P_{moy} = -0.17MW$, $\Delta P_{max} = -0.04MW$	Temps de recharge de 0.31s calculé à partir du point bas de la tension du bus CC (variation de 1700V)
	Redresser le signal d'entrée à la sortie du transformateur	Vérification angle de charge par rapport à l'angle de charge imposé, Vérification de la tension moyenne à la charge par rapport à celle imposée en régime permanent	$\Delta V_{max} \leq 50V$, $\Delta \Phi \leq 2^\circ$	$\Delta V_{max} = 0.2$, $\Delta \phi = 0.3$	$49.8V$, 1.7°	
Phase 4: Outil de dimensionnement	Accepter des paramètres de dimensionnement usuels	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
	Fournir les paramètres de modélisation utilisés par le simulateur	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
Phase 5: Documentation technique	Présenter les procédures de validation croisées de chacun des simulateurs	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
	Présenter l'utilisation de chacun des simulateurs	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		
	Présenter les modèles mathématiques utilisés dans chacun des simulateurs	Oui/Non le critère est-il rempli?		Oui		

[illegible]

WBS



Améliorations proposées

- ▶ Méthode de contrôle RST à investiguer pour obtenir une précision similaire au CERN
- ▶ Optimisation de la commande pour l'AFE 3 niveaux (contrôle du courant maximal et contrôle de phase)
- ▶ Intégration du convertisseur (CA/CC) au niveau charge

