

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	1
Remerciements	3
1 Préface	4
2 Introduction.....	5
2.1 Théorie.....	5
2.2 Projet.....	6
2.3 Descriptif du travail de diplôme.....	7
2.4 Schéma-bloc fonctionnel.....	8
2.5 Eléments du groupe.....	9
2.6 Logiciels	10
3 Etude du fonctionnement d'une installation pompage – turbinage.....	10
3.1 Introduction	10
3.2 Fonctionnement	11
3.3 Avantages / inconvénients.....	11
3.4 Solutions techniques.....	12
3.5 Perspectives	13
3.6 Visite de la centrale de Veytaux	13
4 Etude du fonctionnement d'une MADA	15
4.1 Machine asynchrone schéma en T.....	15
4.2 Bilan de puissances	17
5 Etude du contrôle de la mada	20
5.1 Démarrage en mode turbine.....	20
5.2 Démarrage en mode pompe.....	20
5.3 Régulation.....	23
6 Mesure des caractéristiques de la machine	27
6.1 Calcul préliminaire	27
6.2 Mesures préliminaires.....	28
6.3 Saut de tension.....	30
6.4 Essai à vide.....	32
6.5 Essai à rotor bloqué.....	34
6.6 Mesure de la tension induite.....	34
6.7 Comparaison des résultats	37
6.8 Estimation de l'inertie.....	38
7 Mise en place du contrôle	39
7.1 Structure hardware	39

7.2	<i>Alimentation continue bidirectionnelle</i>	41
7.3	<i>Encodeur</i>	43
7.4	<i>Mise en place du hardware de la Boombox</i>	46
8	Vérification pratique.....	46
8.1	<i>Démarrage en mode pompe</i>	46
8.2	<i>Mesure de la vitesse</i>	55
8.3	<i>Simulation de la régulation</i>	57
9	Conclusion.....	60
10	Bibliographie.....	61



REMERCIEMENTS

Avant de commencer le rapport de mon travail de diplôme, je tiens à remercier mon professeur responsable, M. Samuel Chevailler, pour son aide et pour le soutien qu'il m'a apporté durant ce travail. Je tiens également à remercier toute l'équipe du laboratoire d'électronique de la HES-SO pour le temps qu'ils ont consacré à répondre à mes questions. Un grand merci aussi à M. Philippe Barrade pour son aide concernant l'utilisation de la Boombox.

1 PREFACE

Suite à la sortie du nucléaire en Suisse et à l'épuisement des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont à un tournant. En effet, le prix de l'électricité a fortement baissé en Europe à cause des subventions encourageant le photovoltaïque et à cause de la reprise récente de l'industrie du charbon en Allemagne notamment. Le stockage de l'énergie est donc très important pour compenser les fluctuations d'énergie dues au pic de courant créé par le photovoltaïque à midi.

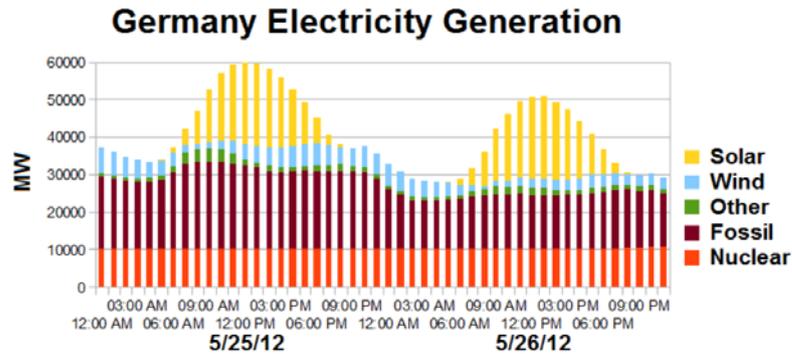


Figure 1 : Production électrique en Allemagne le 25 et 26 mai 2012 [1]

La force hydraulique, qui représente environ 60% de l'offre en Suisse et 99% du stockage énergétique, doit être un acteur important de ce tournant. [2]

Le prix de l'électricité ayant chuté, les centrales hydrauliques ne sont plus rentables. Le pompage-turbinage est une des solutions permettant d'améliorer leur rendement.

2 INTRODUCTION

2.1 Théorie

Dans les installations de pompage-turbinage il existe 2 types de groupes : ceux à vitesse fixe et ceux à vitesse variable. La thèse d'Yves Pannatier « Optimisation des stratégies de réglage d'une installation de pompage-turbinage à vitesse variable » présente l'avantage d'un groupe à vitesse variable par rapport à un groupe à vitesse fixe :

« La plupart des installations de pompage-turbinage actuellement en service sont équipées de machines synchrones et fonctionnent donc à vitesse fixe. La flexibilité et les performances dynamiques de ce type de centrale peuvent néanmoins être significativement améliorées en optant pour une technologie à vitesse variable. Les centrales de pompage-turbinage sont habituellement équipées de pompes-turbines de type Francis qui ont la particularité d'avoir une roue à géométrie fixe. Elles sont donc optimisées pour un point de fonctionnement bien défini, caractérisées par une hauteur de chute, un débit et une vitesse de rotation. Comme la hauteur de chute et le débit sont des grandeurs qui varient fortement en cours d'exploitation, un groupe à vitesse fixe fonctionne fréquemment à un rendement inférieur à sa valeur optimale. En revanche, si la vitesse du groupe est variable, il est alors possible de l'adapter continuellement selon la hauteur de chute et le débit de sorte à maximiser le rendement. » [3]

Une utilisation d'une turbine en dehors de son point de fonctionnement augmente aussi les risques de cavitation. La vitesse variable permet donc de diminuer ce risque.

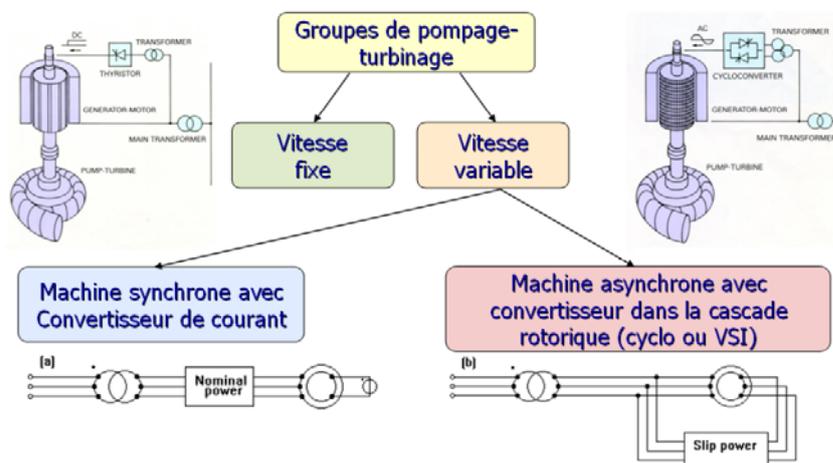


Figure 2 : Comparaison d'un groupe de pompage-turbinage à vitesse fixe ou à vitesse variable [3]

Pour un groupe à vitesse variable, 2 configurations sont envisageables : une machine synchrone avec convertisseur de courant ou une machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec convertisseur de fréquence. La différence est que l'électronique de la MADA ne voit qu'une partie de la puissance. L'électronique est donc dimensionnée plus petite et les pertes sont moins importantes.

La MADA est une machine asynchrone classique mais dont le rotor bobiné triphasé est atteignable au travers de balais.

Une grande partie des publications et des articles sur les MADAs concernent les alternateurs d'éolienne. En effet, l'un des avantages principaux de la MADA est la variation de vi-

tesse du rotor. Il est ainsi possible de régler cette vitesse en fonction du vent. Cela permet de fonctionner sur une large plage de vitesse et donc de pouvoir tirer le maximum de puissance possible de l'éolienne. Cette configuration, développée au Danemark se nomme « Modified Danish concept ».

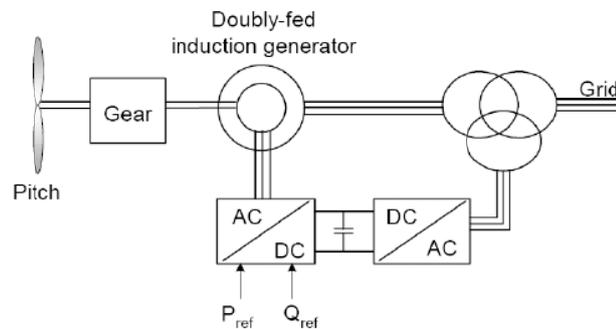


Figure 3 : Configuration « Modified Danish concept » [4]

Les installations de pompage-turbinage à MADA sont comparables à celles des éoliennes à cela près que les éoliennes n'ont pas de fonctionnement moteur.

2.2 Projet

Il est prévu de réaliser un groupe de démonstration de pompage-turbinage avec une MADA comme machine dans le laboratoire du Gridlab de la HES-SO Valais/Wallis.

Le Gridlab est un laboratoire dédié aux énergies renouvelables et au smart grid qui combine des infrastructures réelles et des émulations. Ce groupe de pompage-turbinage à échelle réduite sera utilisé comme outil pédagogique pour les étudiants de l'école. Sa puissance sera de 3kW.

Quatre groupes de turbinage correspondants à la figure suivante sont déjà existants dans l'école.

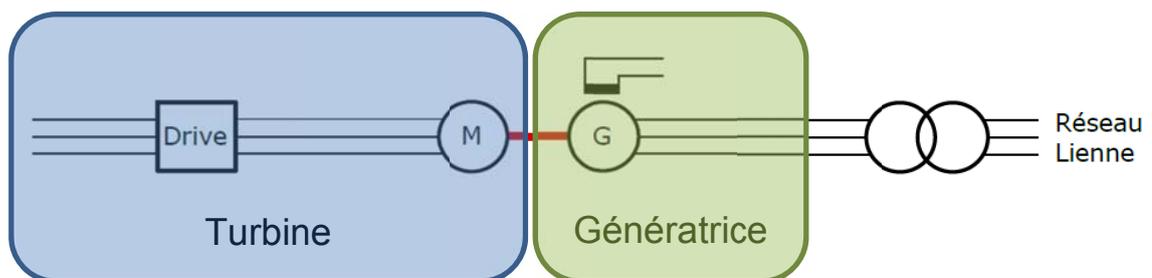


Figure 4 : Schéma des groupes existants

Un moteur synchrone à aimants permanents piloté par un convertisseur 4 quadrants simule la turbine. Il entraîne la génératrice qui réinjecte la puissance sur le réseau.

Il est possible de les modifier afin qu'ils fonctionnent en pompage. Leur structure devient la suivante :

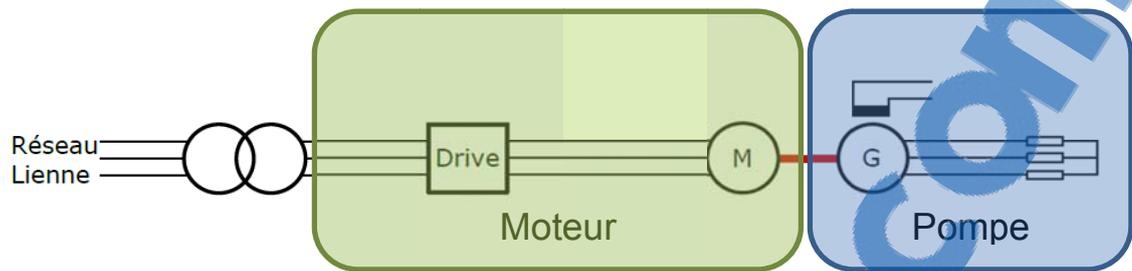


Figure 5 : Schéma du groupe modifié en mode pompe

Le moteur à aimants permanents entrainerait cette fois la machine asynchrone. Des résistances de puissance représenteraient la charge. Le changement du fonctionnement en pompage au fonctionnement en turbinage entrainerait un nombre conséquent de commutations afin de connecter la bonne machine au réseau, aux résistances de charge ou au drive. Cette solution n'est pas optimale pour une utilisation par des étudiants lors de laboratoires.

Il est alors envisagé de monter un nouveau groupe dédié spécialement au pompage-turbinage :

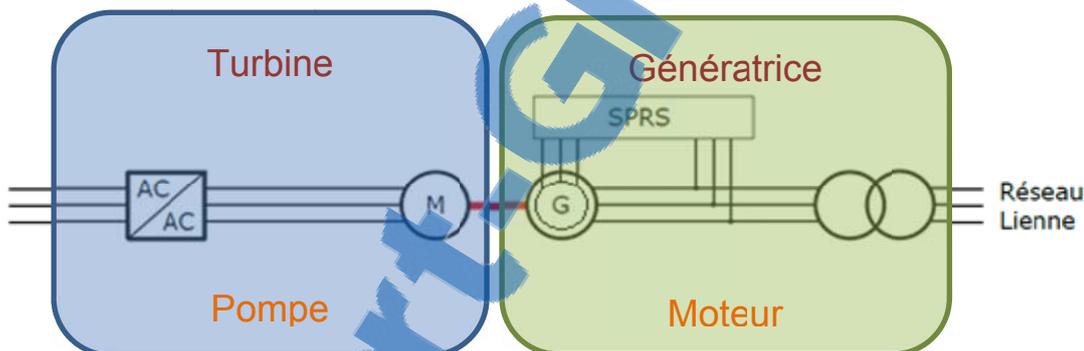


Figure 6 : Schéma du futur groupe de pompage-turbinage

Cette fois-ci la machine synchrone est remplacée par une MADA. Lorsque la machine fonctionne en génératrice, la machine synchrone à aimants permanents (MS) représente une turbine et lorsque la MADA fonctionne en moteur, la MS représente une pompe.

Le SPRS (Slip Power Recovery System) est un convertisseur back to back. Il sert à modifier le glissement de la MADA afin de produire ou consommer de l'énergie.

Les SPRS disponibles sur le marché sont principalement pour des puissances de l'ordre d'1MW alors que notre système est de 3kW pour une utilisation en laboratoire. C'est pourquoi il est réalisé en interne.

2.3 Descriptif du travail de diplôme

Dans une installation de pompage turbinage avec MADA, la machine asynchrone est régulée en connectant un convertisseur de fréquence au rotor bobiné à travers des balais, alors que le stator est connecté au réseau. La machine peut dans cette configuration

fonctionner soit en mode moteur soit en mode générateur. La figure ci-dessous représente ce qui vient d'être énoncé :

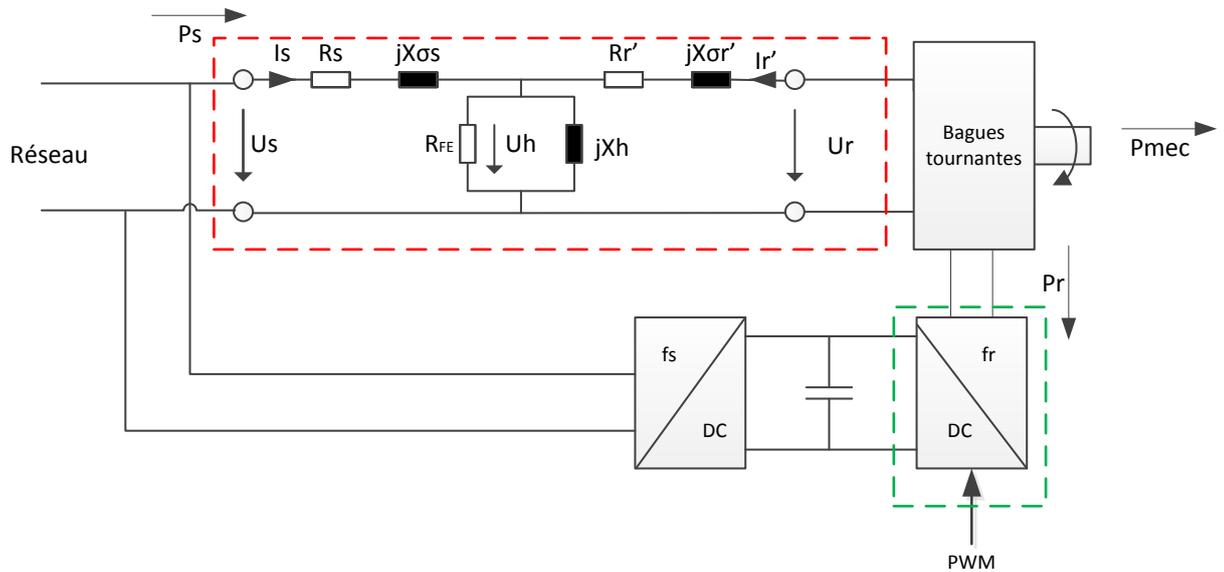


Figure 7 : Schéma monphasé de la structure à mettre en place durant le travail de diplôme [3]

Pour ce travail de diplôme, il s'agira de réaliser un démonstrateur qui sera intégré au Gridlab et qui permettra de comprendre et de mettre en avant les avantages et inconvénients de cette technologie. Les points suivants devront être traités :

- Etude théorique du fonctionnement de la MADA, représentée sous la forme de schéma en T dans l'encadré en rouge.
- Dimensionnement de la régulation du convertisseur DC/AC connecté au rotor et représenté dans l'encadré vert.
- Vérification pratique du fonctionnement de la machine et de sa régulation.

2.4 Schéma-bloc fonctionnel

Fonctionnement général :

- Un onduleur triphasé alimente le rotor de la MADA.
- L'onduleur triphasé est alimenté par une alimentation continue bidirectionnelle.
- L'onduleur triphasé est commandé par une plateforme de contrôle appelée « Boombbox ».
- Un moteur synchrone à aimants permanents fournit un couple de charge ou d'entraînement de la MADA représentant la turbine hydraulique.
- Un couplemètre permet de connaître le couple résistant imposé et la vitesse de rotation du système.
- Le générateur de fonction crée les consignes en couple ou en vitesse pour la machine synchrone à aimants permanents.

- Un encodeur incrémental de position permet de connaître la position et la vitesse du rotor de la MADA.
- Tous les éléments tournants sont placés sur un banc d'essai pour machines électriques.

Le schéma ci-dessous présente l'installation actuelle et les différentes fonctions des éléments la composant.

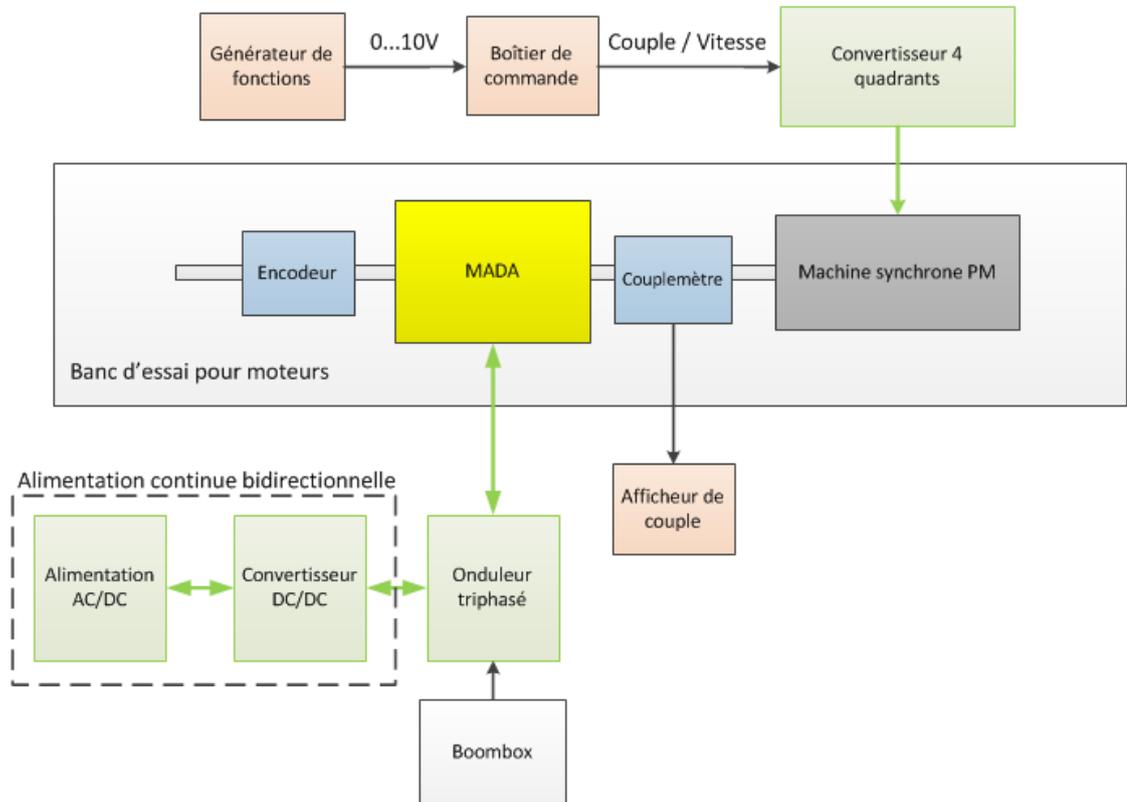


Figure 8 : Schéma bloc de l'installation

Remarque : Les différents éléments tournants sont accouplés ensemble sans que les accouplements ne soient représentés.

2.5 Eléments du groupe

MADA

- Machine asynchrone à pôles lisses à 4 bagues

Machine synchrone PM

- Machine synchrone à aimants permanents
- Convertisseur 4 quadrants
- Générateur de fonctions Agilent – 33220A

Encodeur

- Encodeur incrémental magnétique, Baumer ITD49H00

Couplemètre

- Afficheur de couple – Magtrol – Model 3410 Torque Display

Alimentation continue bidirectionnelle

- Convertisseur DC-DC Zenone – Model PUB 100V 100A 10kW, No 1481 – Firmware AL MV1.15
- Alimentation AC-DC Regatron – Model TC.GSS Bidirectional DC PSU – Type TC.655.32.600.400.HMI

La photo suivante permet de voir les éléments présents sur le banc d'essai.

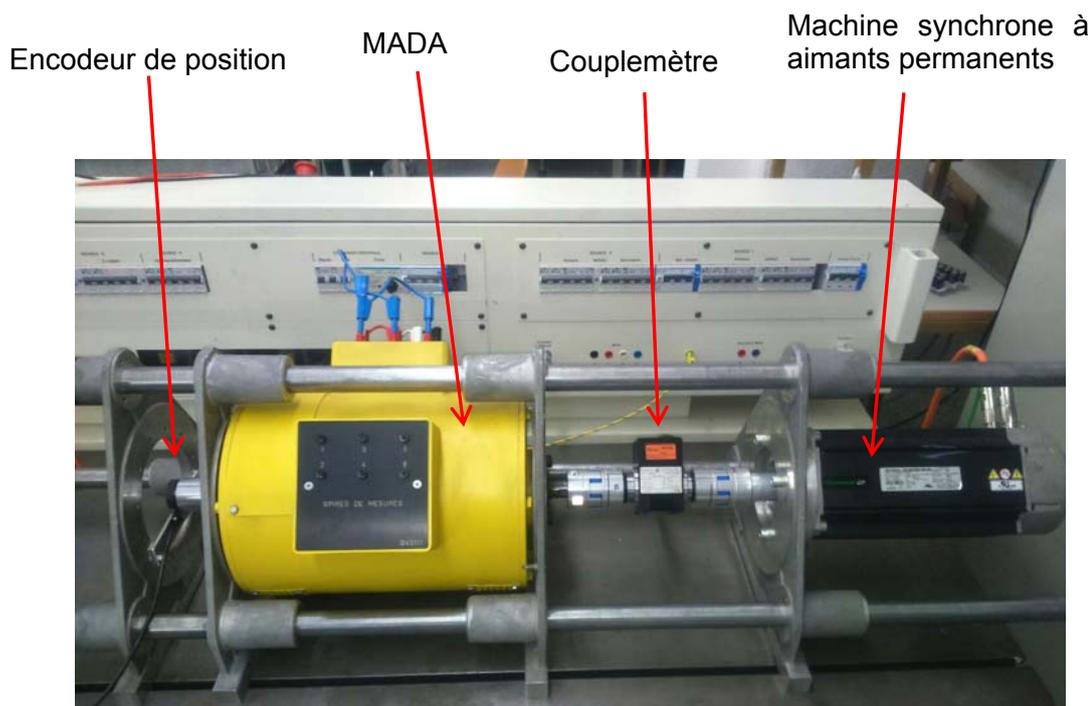


Figure 9 : Photo du banc d'essai

2.6 Logiciels

- Matlab – Simulink : Logiciel de simulation et de calcul
- Code Composer Studio : Logiciel de programmation
- BoomBox Control : Logiciel de contrôle de la Boombox

3 ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UNE INSTALLATION POMPAGE – TURBINAGE

3.1 Introduction

Comme énoncé en préface, la force hydraulique représente 99% du stockage d'énergie dans le monde ; mais ce chiffre va certainement diminuer grâce au développement de nouvelles technologies. Par exemple, des batteries de grandes capacités sont prévues aux Etats-Unis et au Japon. [1]

En 2012, environ 400 installations de pompage-turbinage se répartissent 100GW de production dans le monde. En Europe, 27GW supplémentaires étaient prévus d'ici 2020. Ce chiffre a tendance à diminuer à cause de la diminution du prix de vente de l'électricité et donc du rendement économique de ces installations.

La Suisse compte 20 ouvrages de plus de 1MW et le pompage-turbinage représente 10% de la puissance hydraulique installée. Trois centrales de pompage-turbinage sont en construction ou en transformation :

- Linth-Limmern : 1 GW : Groupe à vitesse variable : Utilisation de MADAs
- Nant de Drance : 900 MW : Groupe à vitesse variable : Utilisation de MADAs
- Forces Motrices de Hongrin-Léman (FMHL+) : de 240 à 480 MW : Groupe à vitesse fixe : Utilisation de machines synchrones

3.2 Fonctionnement

Une centrale de pompage-turbinage utilise la différence de niveau entre 2 lacs de retenue pour produire et stocker de l'énergie. Lorsqu'on désire produire de l'électricité l'eau est turbinée depuis le lac en amont jusqu'au lac en aval. À l'inverse, lorsque le prix de l'électricité est bas, l'eau est pompée depuis le bassin aval jusqu'au bassin amont par les mêmes galeries afin de la stocker. Elle sera turbinée lorsque la demande d'énergie sera plus grande.

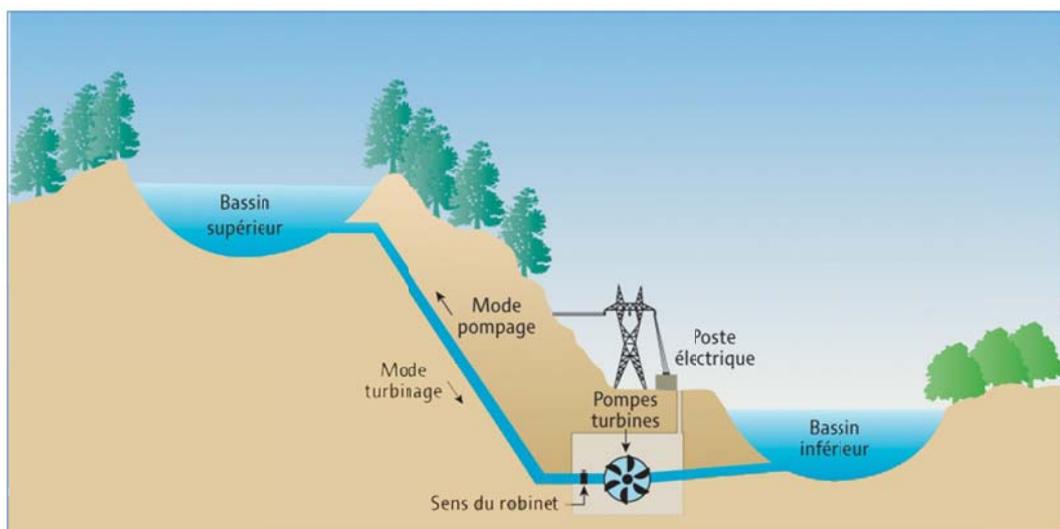


Figure 10 : Schéma d'illustration du principe de fonctionnement du pompage-turbinage [5]

En pratique, la turbine est souvent à un niveau inférieur au bassin aval afin de turbiner un maximum de chute.

3.3 Avantages / inconvénients

Le pompage-turbinage est une énergie de réglage. Elle permet qu'à tout moment, la production soit égale à la consommation. Elle constitue un stock d'énergie hydraulique qui pourra être injecté en tout temps sur le réseau en complément des énergies éoliennes ou solaires et permet donc leur optimisation.

Le pompage-turbinage permet d'augmenter le rendement d'autres installations de production d'énergie renouvelable. Il se meut en capacité de stockage lors des pics de produc-

tion d'un parc éolien ou photovoltaïque afin qu'aucune énergie ne soit perdue par simple manque de demande. Il est donc possible de produire en continu.

Malheureusement cette technologie est limitée géographiquement. Il n'existe qu'une quantité limitée de sites permettant une telle infrastructure et les meilleurs sont déjà exploités. Une diminution du nombre de projets futurs est donc inéluctable.

3.4 Solutions techniques

Trois solutions techniques sont possibles pour une installation de pompage-turbinage :

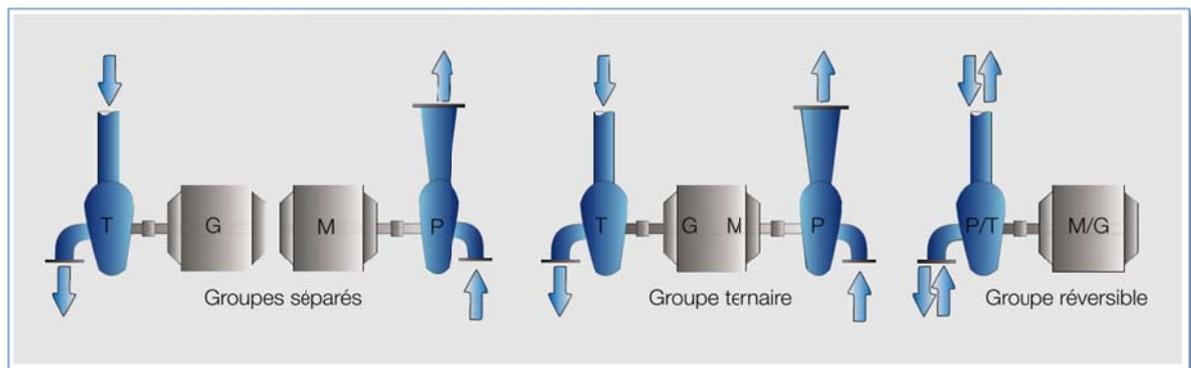


Figure 11 : Différentes architectures de groupes de pompage-turbinage [2]

3.4.1 Groupes séparés

Cette solution consiste à utiliser un groupe de pompage et un groupe de turbinage qui n'ont en commun que les réservoirs et/ou les conduites. L'avantage est que les 2 groupes peuvent être dans deux centrales différentes. Cette solution n'est quasiment plus utilisée et lors de rénovations les machines sont remplacées par des plus récentes.

3.4.2 Groupe ternaire

Cette fois la turbine, la pompe et la machine électrique sont sur le même arbre mécanique. Cela permet de dimensionner chaque groupe pour son point de fonctionnement optimal. La machine électrique tourne toujours dans le même sens. Ce type de groupe est utilisé dans le projet FMHL+.

3.4.3 Groupe réversible

Cette solution combine une pompe-turbine réversible accouplée à une machine électrique. Elle est plus compacte et plus économique qu'une solution ternaire. Le désavantage par rapport à un groupe ternaire est qu'une procédure de dénoyage/remplissage est nécessaire. Cela parce qu'il n'y a pas de turbine pour désengorger la pompe, ce qui implique que l'inertie est grande au démarrage de la pompe. Le dimensionnement de l'entraînement électrique est donc plus important de même que son coût. C'est dans ce type d'installation que la vitesse variable est nécessaire et qu'une MADA s'impose. Ce type de groupe se trouve dans le projet de Nant de Dranse et à Linth-Limmern.

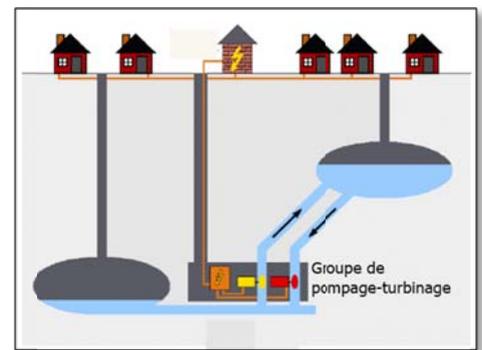
3.5 Perspectives

Les installations de pompage-turbinage commencent à être reliées à des champs d'éoliennes situés en mer. La Belgique, par exemple, projette de créer une île artificielle qui fonctionnerait comme un barrage ; la mer étant le bassin supérieur et un puit de 30 mètres de profond faisant office de bassin inférieur. [6]



Figure 12 : Illustration de l'île artificielle que compte construire la Belgique [7]

Le concept de pompage-turbinage s'étend à d'autres domaines que les barrages. En Allemagne notamment, de nouvelles applications sont trouvées. Les anciens puits de mines noyés pourraient être utilisés comme site de pompage turbinage.



3.6 Visite de la centrale de Veytaux

3.6.1 Présentation

Durant ce travail de diplôme, une visite d'une centrale de pompage-turbinage a permis de se rendre compte des réalités de ces installations. La centrale de Veytaux est une des plus anciennes stations de pompage-turbinage du monde. Elle fonctionne entre le lac de l'Hongrin et le lac Léman. Elle est constituée de 2 groupes de 4 turbines Pelton tournant à 600min^{-1} . La différence entre les 2 lacs est de 800 mètres.

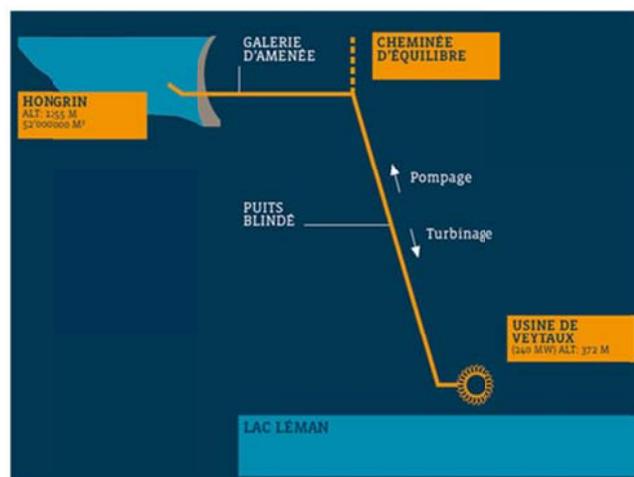


Figure 14 : Schéma de principe de l'installation de FMHL [9]

Une modification de cette centrale est en construction. Ce projet, FMHL+, augmentera la puissance de la centrale de pompage-turbinage de 240 à 480MW. Les travaux ont démarré en avril 2011 et la mise en service s'est déroulée à l'automne 2016. La production est passée de 520 millions de kWh par année à environ 1 milliard de kWh. L'investissement se monte à 331 millions de francs suisses.

La visite de cette centrale ne concerne que l'installation existante et non l'expansion. Les 4 groupes existants sont des groupes ternaires et ne sont pas équipés de MADAs mais de moteurs synchrones. Il est toutefois possible de comparer les avantages/désavantages des deux systèmes et de repérer des familiarités.

3.6.2 Installation existante

Les données techniques du groupe de Veytaux sont en annexe 1.



Figure 15 : Photo d'un groupe ternaire de Veytaux : vert-turbine, rouge-moteur, bleu-pompe

3.6.3 Fonctionnement

En général, il n'y a que 2 transitions pompage-turbinage par jour : une le matin et une le soir. Toutefois, les machines sont régulièrement arrêtées par bloc d'une heure selon la demande.

Transition turbinage pompage :

- Le moteur est entraîné à 600 tr/min par la turbine.
- Le moteur est excité.
- Le moteur est synchronisé au réseau.
- La petite turbine de lancement Pelton de la pompe est enclenchée.
- Une fois la vitesse de 600tr/min atteinte, la pompe est accouplée au moteur.
- La pompe de mise en charge est enclenchée.
- Une fois la pression désirée atteinte, la vanne sur la sortie de la pompe est ouverte.

Le temps de transition est de plus de 30 minutes afin de garantir la sécurité. Ce temps est calculé en fonction des répercussions d'un changement de sens du débit dans les galeries d'amenées et non au temps de changement du groupe qui pourrait être en-dessous des 15 minutes.

L'enclenchement de la pompe ne dure que 4 minutes.

Le désavantage le plus important d'un groupe ternaire avec machine synchrone est que le groupe doit fonctionner à sa puissance nominale lors du pompage. Dans le cas de la centrale actuelle de Veytaux, la puissance ne peut être que de 1, 2, 3 ou 4 fois 65MW.

3.6.4 Améliorations

La centrale sera bientôt dotée de 2 groupes ternaires tournant à 500min-1 sous une chute variant de de 831 à 913 mètres.

La pompe sera désormais en position verticale et non plus horizontale. Cela la dispense de pompe de mise en charge. La pompe est donc toujours noyée.

Le groupe sera mis en « court-circuit hydraulique ». C'est à dire qu'une partie du débit sortant de la pompe passe dans la turbine. Le groupe est donc en partie autoalimenté. Ce type de fonctionnement permet d'exploiter la pompe à sa puissance nominale et de contrôler la puissance consommée par le moteur électrique en ajustant la puissance fournie par la turbine. Ce fonctionnement est présenté sur la figure ci-dessous.

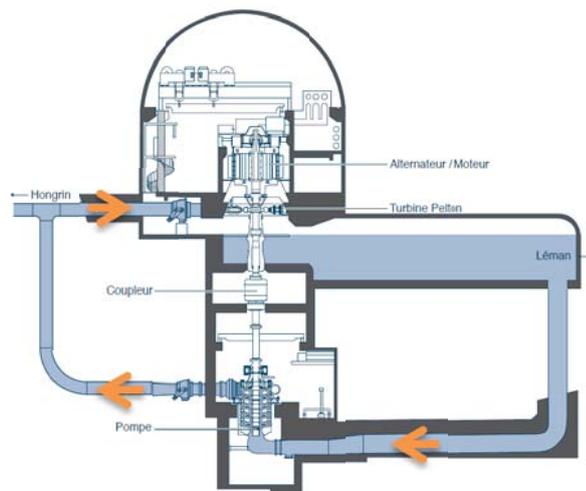


Figure 16 : Coupe du groupe de pompage-turbinage de la centrale de Veytaux [10]

4 ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UNE MADA

4.1 Machine asynchrone schéma en T

Il est nécessaire de comprendre parfaitement le schéma en T de la machine asynchrone si l'on veut comprendre la MADA.

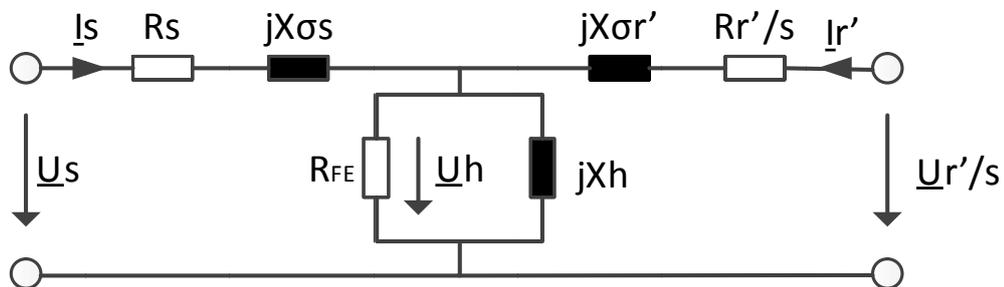


Figure 17 : Schéma en T de la MADA

Le schéma en T est la représentation du circuit magnétiquement couplé du rotor et du stator pour une phase.

Une variation de flux associée au bobinage du stator ou du rotor fait apparaître une tension à leurs bornes :

$$u = R \cdot i + \frac{d\psi}{dt}$$

Avec : u : Valeur instantanée de la tension
 R : Résistance
 i : valeur instantanée du courant
 ψ : Flux totalisé

Cette équation est appliquée au rotor et au stator :

$$u_s = R_s \cdot i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \qquad u_r = R_r \cdot i_r + \frac{d\psi_r}{dt}$$

Si toutes les grandeurs sont sinusoïdales. En régime établi les équations deviennent :

$$\underline{u}_s = R_s \cdot \underline{i}_s + j\omega \underline{\psi}_s \qquad \underline{u}_r = R_r \cdot \underline{i}_r + j\omega_r \underline{\psi}_r$$

Le flux total associé à un circuit électrique (celui du rotor ou du stator) couplé magnétiquement avec le rotor et le stator devient :

$$\underline{\psi}_s = L_s \cdot \underline{i}_s + L_{sr} \cdot \underline{i}_r \qquad \underline{\psi}_r = L_r \cdot \underline{i}_r + L_{sr} \cdot \underline{i}_s$$

Avec : L_s, L_r : Inductances propres
 L_{sr} : Inductance mutuelle

L'inductance propre est égale à l'inductance de champ plus l'inductance de fuite :

$$L_s = L_{hs} + L_{\sigma s} \qquad L_r = L_{hr} + L_{\sigma r}$$

Avec : L_{hs}, L_{hr} : Inductances de champ
 $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$: Inductance de fuite

En recombinaison l'équation du flux et l'équation de l'inductance propre à l'équation de la tension induite en régime établi on obtient :

$$\underline{u}_s = R_s \cdot \underline{i}_s + j\omega L_{\sigma s} \cdot \underline{i}_s + j\omega L_{hs} \cdot \underline{i}_s + j\omega L_{sr} \cdot \underline{i}_r$$

$$\underline{u}_r = R_r \cdot \underline{i}_r + j\omega_r L_{\sigma r} \cdot \underline{i}_r + j\omega_r L_{hr} \cdot \underline{i}_r + j\omega_r L_{sr} \cdot \underline{i}_s$$

Afin de rapporter la tension du rotor au primaire, il est nécessaire de faire les transformations suivantes :

Avec \ddot{u} : Rapport de transformation

On a : $\underline{u}' = \ddot{u} \cdot \underline{u}$

$$\underline{i}' = \frac{i}{\ddot{u}}$$

$$X' = \ddot{u}^2 \cdot X$$

Rapportées à l'équation de la tension du rotor on obtient :

$$\underline{u}_r' = R_r \cdot \ddot{u}^2 \cdot \frac{\underline{i}_r}{\ddot{u}} + j s \omega L_{\sigma r} \cdot \ddot{u}^2 \cdot \frac{\underline{i}_r}{\ddot{u}} + j s \omega L_{hr} \cdot \ddot{u}^2 \cdot \frac{\underline{i}_r}{\ddot{u}} + j s \omega L_{sr} \cdot \underline{i}_s$$

Le terme $s\omega$ dans l'équation précédente correspond à la pulsation rotorique ω_r . Afin de coupler magnétiquement le rotor au stator il est nécessaire d'avoir la même pulsation ω_s . En considérant que $s \cdot \omega_s = \omega_r$, il est nécessaire de diviser par s l'équation de la tension au rotor précédente. L'équation devient :

$$\frac{u_r'}{s} = \frac{R_r'}{s} \cdot \dot{i}_r' + j\omega L_{\sigma r'} \cdot i' + j\omega L_{hr'} \cdot \dot{i}_r' + j\omega L_{sr'} \cdot \dot{i}_s'$$

Le schéma en T est désormais identifié.

4.2 Bilan de puissances

Il est nécessaire de connaître la puissance que doit fournir le convertisseur de puissance au rotor. Les développements suivants sont tirés de la publication « Theory of the Doubly-Fed Induction Machine in the Steady State » par T.J.E. Miller [11]. Les puissances sur la MADA sont considérées comme suit :

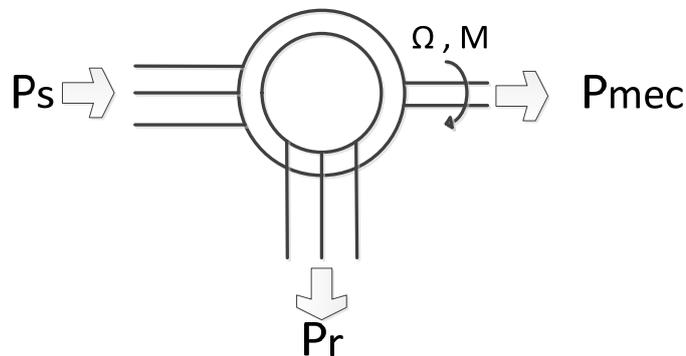


Figure 18 : Représentation des puissances sur la MADA

Lorsque la machine fournit du couple ; la machine fonctionne en moteur. Si la puissance mécanique est négative, la machine fonctionne en générateur.

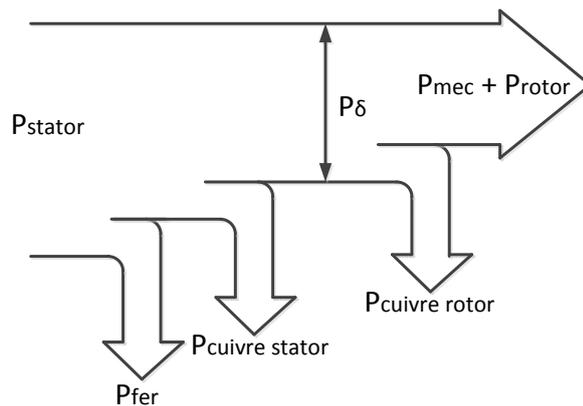


Figure 19 : Bilan de puissances

P_δ : Puissance d'entrefer : Couple transmis au rotor par le champ tournant

La puissance d'entrefer est en fonction du couple électromagnétique.

$$P_\delta = M_{em} \cdot \Omega_s$$

$$\Omega = (1 - s) \cdot \Omega_s$$

Si la puissance mécanique est considérée égale à la puissance électromagnétique :

$$P_{mec} = P_{em} = M_{em} \cdot \Omega = M_{em}(1 - s) \cdot \Omega_s$$

La puissance d'entrefer peut donc être calculée :

$$P_{\delta} = \frac{P_{mec}}{1-s}$$

A) Selon le bilan des puissances :

$$P_{\delta} = P_{cu_r} + P_{mech} + P_r$$

En considérant la formule de la puissance d'entrefer démontrée précédemment :

$$P_{mec} = P_{\delta}(1 - s)$$

On obtient :

$$P_{\delta} = P_{cu_r} + P_{\delta}(1 - s) + P_r$$

$$P_r = s \cdot P_{\delta} - P_{cu_r}$$

On formule l'hypothèse que les pertes cuivres sont négligeables par rapport à la puissance d'entrefer : $P_{cu_r} \ll s \cdot P_{\delta}$

$$P_r = s \cdot P_{\delta}$$

La puissance au rotor dépend donc du glissement et de la puissance d'entrefer.

B) Selon le bilan des puissances :

$$P_s = P_{cu_s} + P_{fer} + P_{\delta}$$

En négligeant les pertes cuivre et fer : $P_s = P_{\delta}$

En insérant l'équation obtenue au point A :

$$P_s = \frac{P_r}{s}$$

donc

$$P_r = s \cdot P_s$$

La taille du convertisseur back-to-back de la MADA peut donc être définie en fonction de la puissance au stator.

C) En négligeant les pertes, on constate que le bilan de puissance est simple :

$$P_{grid} = P_{\delta} - P_r = P_s - P_r = P_{mec}$$

Toute la puissance fournie est récupérée. Comme démontré au point B), la puissance au stator est plus grande que celle au rotor ; les signes de **P_s** et **P_{mec}** seront donc toujours les mêmes.

Lorsque la machine tourne à une vitesse plus élevée que celle du champ tournant du stator, elle est en fonctionnement hypersynchrone. Sinon, elle est en fonctionnement hypsynchrone.

Quatre cas sont possibles en fonction du signe du glissement et de la puissance au stator.

Comme vu au développement **B)** de ce chapitre, la puissance au rotor est proportionnelle au glissement et à la puissance au stator. Donc, lorsque le glissement devient négatif, le signe de la puissance au rotor change.

Selon ces règles, il découle les 4 cas suivants :

- ① Moteur hyposynchrone $\Omega < \Omega_s$

$s > 0$ $P_s > 0$ $P_{mec} > 0$	$\left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}$	$P_r > 0$
---------------------------------------	---	-----------
- ② Moteur hypersynchrone $\Omega > \Omega_s$

$s < 0$ $P_s > 0$ $P_{mec} > 0$	$\left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}$	$P_r < 0$
---------------------------------------	---	-----------
- ③ Génératrice hyposynchrone $\Omega < \Omega_s$

$s > 0$ $P_s < 0$ $P_{mec} < 0$	$\left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}$	$P_r > 0$
---------------------------------------	---	-----------
- ④ Génératrice hypersynchrone $\Omega > \Omega_s$

$s < 0$ $P_s < 0$ $P_{mec} < 0$	$\left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}$	$P_r < 0$
---------------------------------------	---	-----------

Il est possible de réunir ces cas dans un graphique simplifiant leur compréhension :

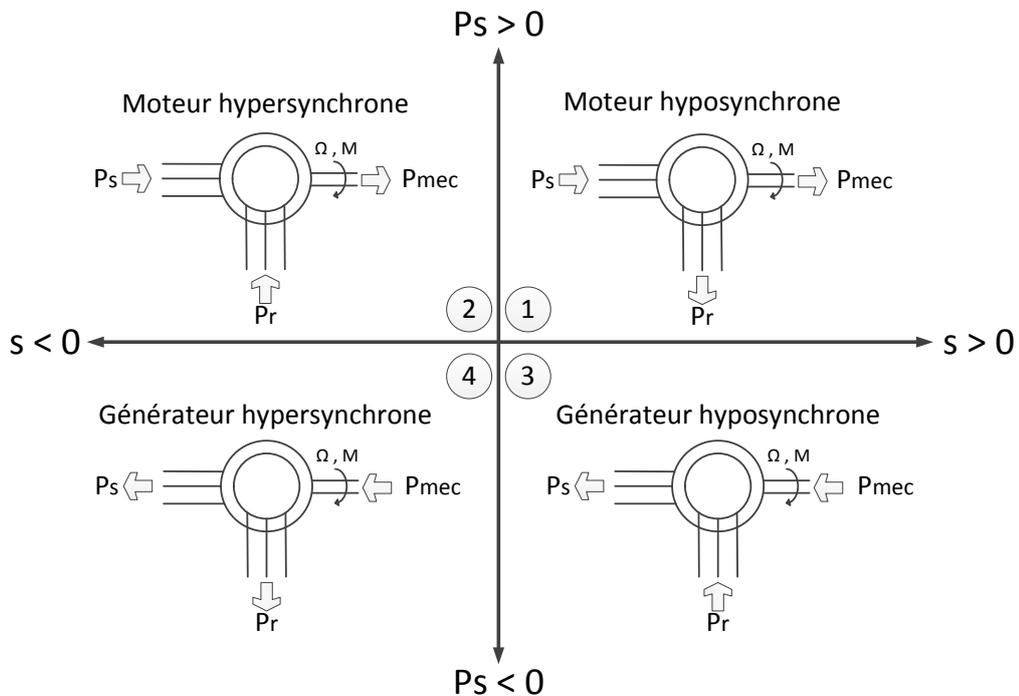


Figure 20 : Fonctionnement par quadrant de la MADA

La puissance du convertisseur peut maintenant être fixée en fonction du glissement.

$$P_r = P_s \cdot s$$

La fréquence des courants au rotor est aussi connue $f_s \cdot s = f_r$. Si le glissement est négatif, la fréquence des courants au rotor le devient aussi. Le champ tournant du rotor est donc inversé. En effet, un glissement négatif est interprété comme une séquence de phase négative.

5 ETUDE DU CONTROLE DE LA MADA

Le contrôle de la MADA est séparé 3 cas de fonctionnement :

- Démarrage en mode pompe
- Démarrage en mode turbine
- Régulation lorsque la vitesse de synchronisme a été atteinte ; que ce soit en fonctionnement moteur ou générateur.

5.1 Démarrage en mode turbine

Le démarrage en mode turbine se passe de la façon suivante :

- Le rotor est excité comme pour une machine synchrone.
- La turbine est entraînée par la chute d'eau.
- Lorsque la tension au stator est adéquate, c'est-à-dire avec la même amplitude et la même fréquence que le réseau, la procédure de synchronisation est enclenchée.
- La régulation de puissance est ensuite enclenchée.

5.2 Démarrage en mode pompe

Le démarrage en mode pompe consiste à amener la MADA à sa vitesse de synchronisme avant de la synchroniser au réseau.

Le schéma de connexion de la MADA au réseau est le suivant [12] :

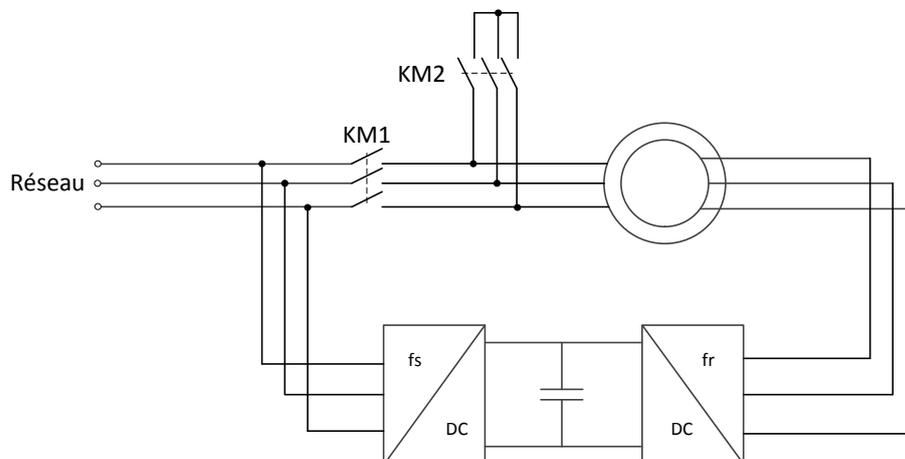


Figure 21 : Configuration du système

Le démarrage en mode pompe s'effectue selon les étapes suivantes [12]:

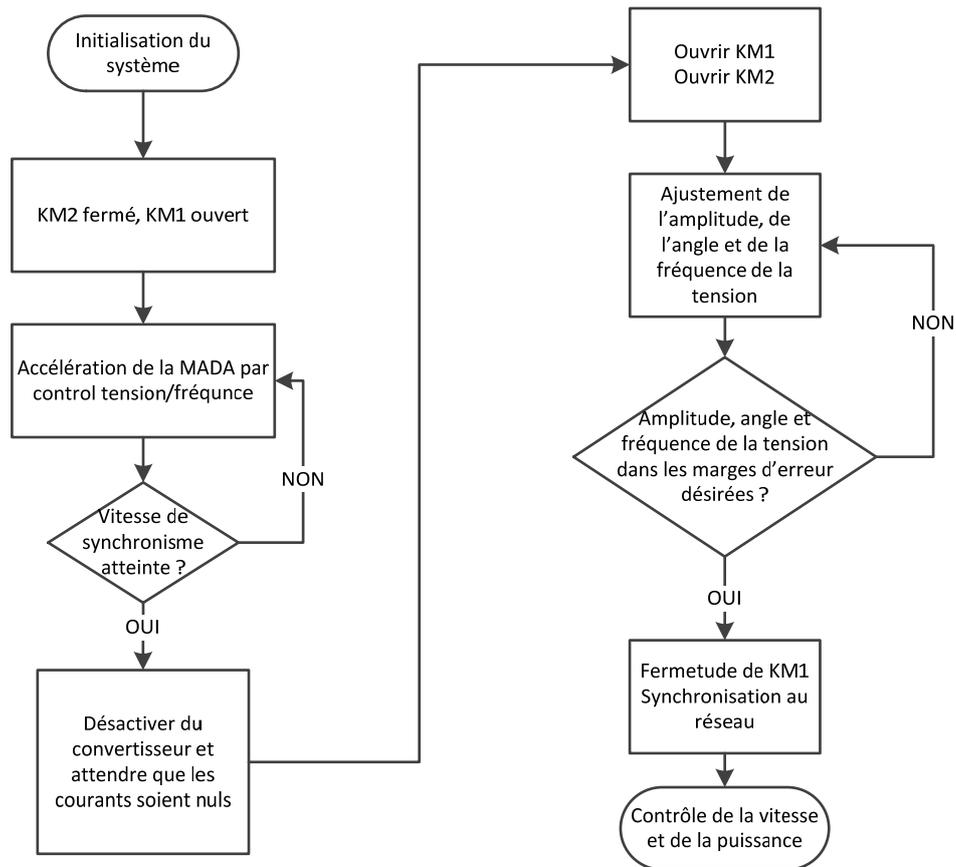


Figure 22 : Diagramme de séquence de la procédure de démarrage en mode pompe

La machine est démarrée par le rotor en court-circuitant le stator. Ensuite, un contrôle tension/fréquence est utilisé afin d'amener la machine à la vitesse minimum pour la synchronisation.

La vitesse à atteindre pour synchroniser la machine est la vitesse de synchronisme.

Le convertisseur est ensuite désactivé. Lorsque les courants sont quasiment nuls, la procédure de synchronisation est enclenchée.

Lorsque la synchronisation est faite, le contrôle de la machine en vitesse et en puissance peut être enclenché.

Plusieurs stratégies sont possibles pour amener la machine à la vitesse minimum de synchronisation.

La thèse « Start-up and synchronisation of a variable speed pump-turbine in pumping mode » présente une stratégie pour le démarrage basée sur un contrôle orienté du flux du stator [13]. Toutefois, le contrôle qu'elle présente est relativement complexe, il a été décidé de réaliser un contrôle plus simple.

La stratégie de commande la plus simple consiste à imposer le module de la tension rotorique afin qu'en régime établi le flux statorique reste constant. [14]

La méthode est appelée tension-fréquence car la tension et la fréquence doivent rester proportionnels afin d'imposer un flux constant. Elle est en principe appliquée à des machines asynchrone à cage d'écureuil :

$$\frac{U_h}{f_s} = \text{constant}$$

L'inconvénient principal est que le courant et le couple ne sont pas régulés et qu'à basse vitesse des non-linéarités sont présentes et donc qu'à basse tension le système n'est pas très performant. Cela est dû au fait qu'à très petite vitesse la résistance statorique a une plus grande influence car les impédances deviennent très petites. Le schéma suivant résume ce qui vient d'être énoncé pour une fréquence rotorique égal à zéro :

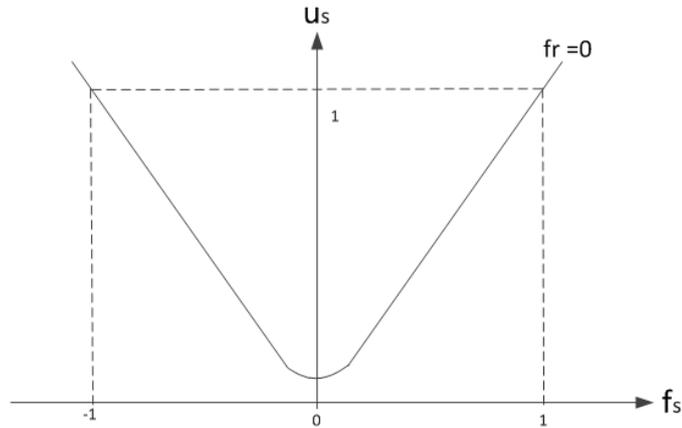


Figure 23 : Caractéristiques en régime établi pour le module de la tension statorique u_s pour un flux constant

La figure suivante représente le schéma de principe pour la réalisation de la stratégie de commande de l'imposition du flux statorique par le module de la tension statorique pour une machine alimentée par le stator :

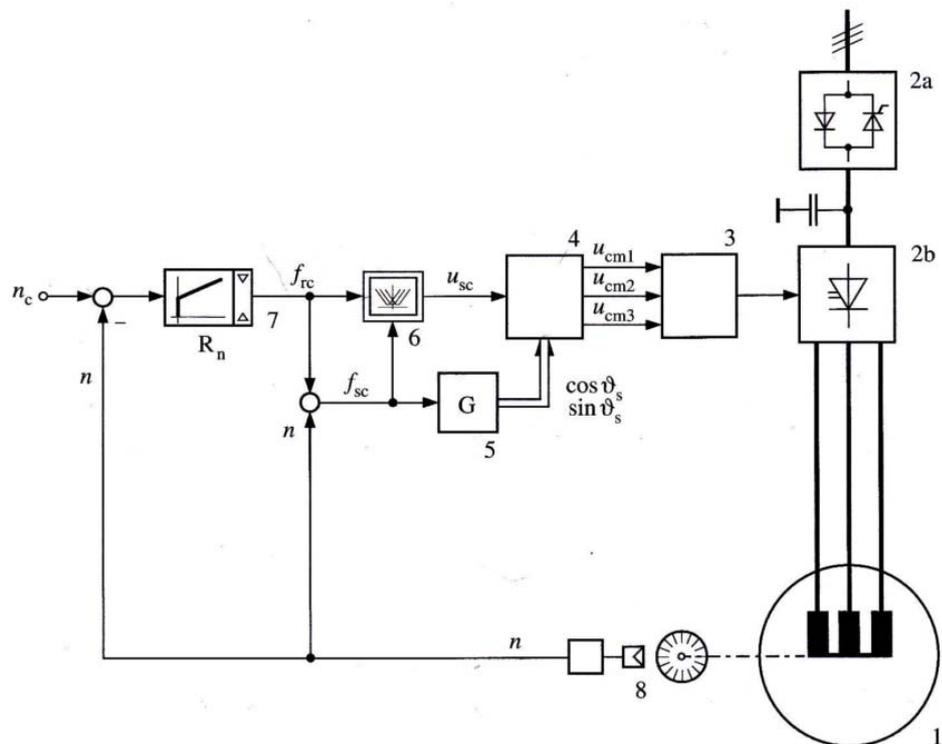


Figure 24 : Schéma de principe pour la réalisation de la régulation U/f par le module de la tension statorique [14]

Le système de régulation peut-être décrit à l'aide des équations suivantes :

$$f_{sc} = f_{rc} + n \cdot p$$

$$f_{rc} = K_{REG}(s) \cdot (w - n)$$

Avec : f_{sc} : la fréquence de commande statorique
 f_{rc} : la fréquence de commande rotorique
 w : la consigne de vitesse
 n : la vitesse mécanique de rotation

La tension statorique de commande **usc** est obtenue par la caractéristique en régime établi pour le module de la tension statorique.

Les signaux de commande **ucm1**, **ucm2** et **ucm3** sont déterminées à partir de la consigne **usc** pour le module de la tension rotorique et des signaux **cos ϑ_s** **sin ϑ_s** dans le bloc 4 :

$$u_{cm1} = \frac{u_{sc}}{U_{dc}} \cdot \cos \vartheta_s$$

$$u_{cm2} = \frac{u_{sc}}{U_{dc}} \cdot \cos \left(\vartheta_s - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$u_{cm3} = \frac{u_{sc}}{U_{dc}} \cdot \cos \left(\vartheta_s - \frac{4\pi}{3} \right)$$

Le bloc 3 réalise la modulation et la commande de l'onduleur.

Dans notre cas, l'alimentation se fait par le rotor. Le stator est donc court-circuité. Le principe de régulation reste le même. Le seul changement est que les fréquences rotoriques et statoriques sont inversées.

$$f_{rc} = f_{sc} + n \cdot p$$

5.3 Régulation

5.3.1 Structure

La régulation qui va être décrite dans ce chapitre est utilisée lorsque la MADA est synchronisée au réseau. La régulation qu'il a été choisi de réaliser se base sur la thèse « Double-fed asynchronous motor-generator equipped with a 3-level VSI cascade » de André Hodder [15] car elle concerne une MADA utilisée en pompage-turbinage. Elle permet de varier la vitesse ainsi que la puissance réactive.

Il serait possible de réguler la puissance active de la machine au lieu de sa vitesse selon la même structure. En général, en turbinage, la vitesse est régulée alors qu'en pompage la puissance active est régulée. Il a été choisi de réaliser une régulation de vitesse. Une régulation de puissance pourra être mise en place par la suite.

La vitesse et la puissance réactive sont régulées en contrôlant, en cascade, les courants au stator et au rotor.

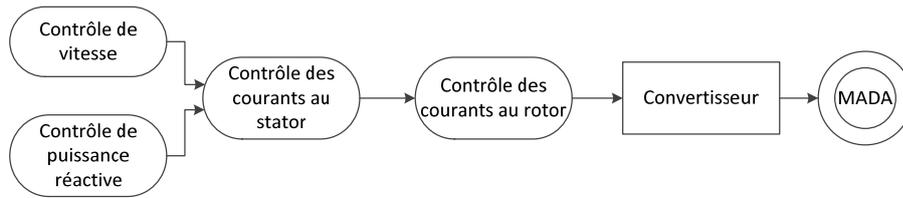


Figure 25 : Principe de base de la régulation mise en place

Une transformation de Park permet d'exprimer les grandeurs triphasées dans un référentiel synchrone sous forme de phaseurs spatiaux à composantes directe (axe d) et transverse (axe q). Les grandeurs à régler sont alors constantes ce qui permet d'appliquer la théorie de réglage classique. Les courants au stator et au rotor sont découplés dans les axes d et q. Deux référentiels tournants sont donc utilisés, un pour le contrôle du stator et un pour le rotor.

Le référentiel choisi pour le découplage est de caler le phaseur de la tension statorique \underline{U}_s sur l'axe direct C'est-à-dire que lors de la décomposition de la tension du réseau $\hat{U}_{sd}=325V$ et $\hat{U}_{sq}=0V$. La puissance active est donc sur l'axe d et la puissance réactive sur l'axe q.

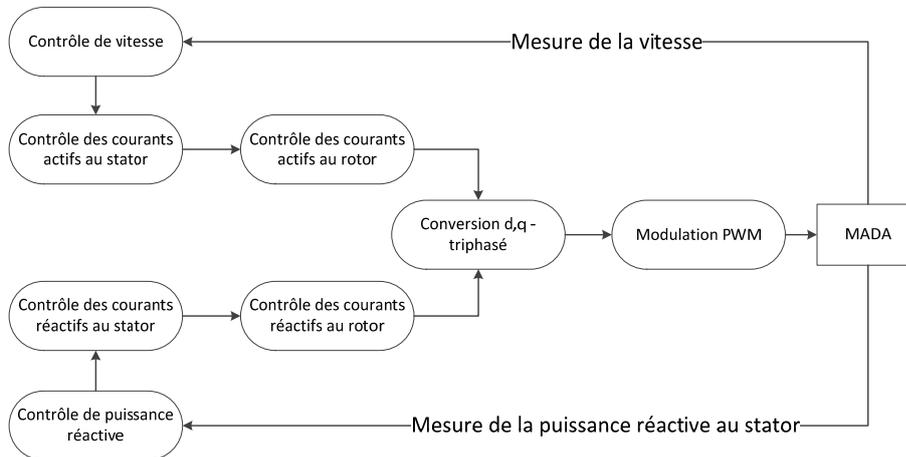


Figure 26 : Structure de contrôle de la MADA avec découplage d,q

Le schéma suivant présente plus précisément la régulation mise en place avec les régulateurs nécessaires.

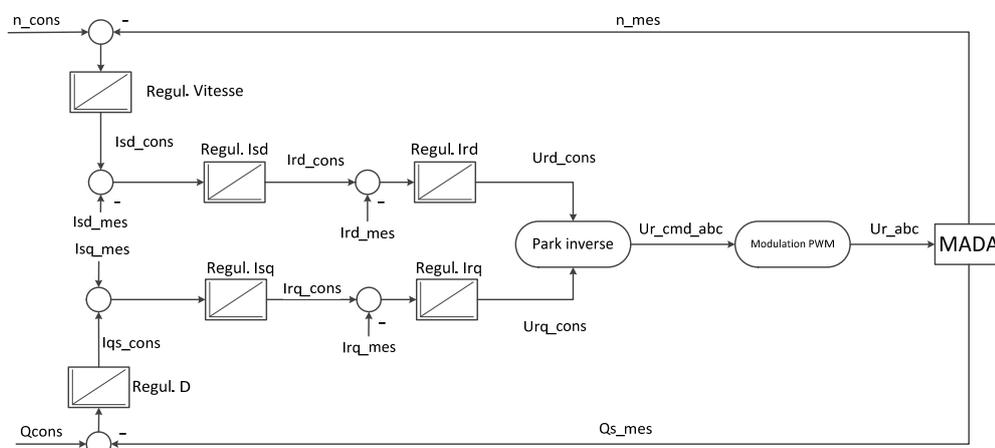


Figure 27 : Régulation mise en place

Les régulateurs sont dimensionnés selon la même thèse [15]. La thèse développe les équations de base et en tire les fonctions de transfert en prenant en compte les retards introduits par l'électronique. Tous les calculs sont réalisés en per units (PU). Les fonctions de transfert et régulateurs ont été testés en boucle ouverte avec les valeurs de la MADA.

Les conversions de systèmes triphasés vers un système d,q se font par transformation de Park. Le schéma suivant présente la structure de réglage complète.

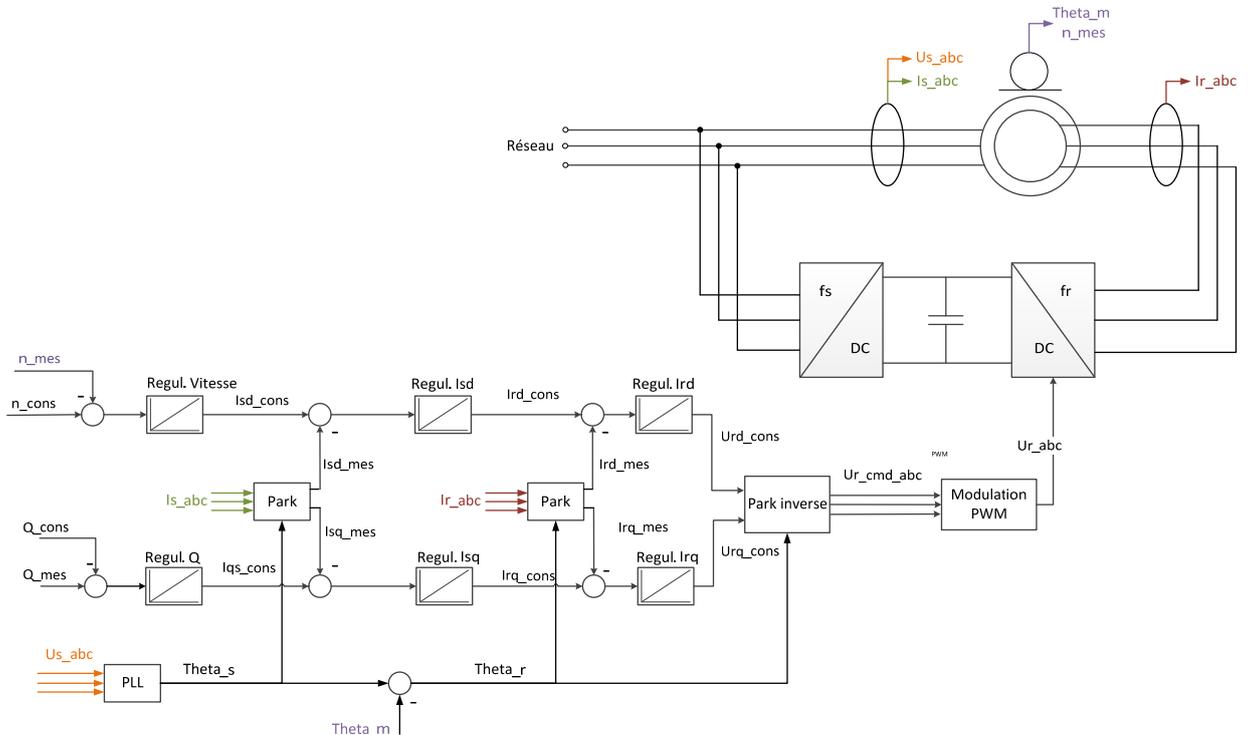


Figure 28 : Schéma de la régulation en régime établi

Le référentiel de la décomposition des courants statoriques est l'angle du stator. L'angle du stator **Theta_s** est calculé grâce à une PLL de la tension du réseau.

Le référentiel de la décomposition des courants rotoriques est l'angle rotorique. L'angle rotorique **Thera_r** est obtenu de la façon suivante :

$$\theta_r = \theta_s - \theta_m$$

Avec : **Theta_m** la position du rotor.

5.3.5 Régulation de puissance réactive

Comme il est le cas pour le réglage de vitesse, vu le référentiel choisi pour le découplage, le réglage de puissance réactive n'agit que sur l'axe q du régulateur de courant statorique. Selon la fonction de transfert définie, le régulateur un est PI :

$$G_{Rq} = \frac{1}{1 + s \cdot T_{pEq}}$$

Avec : T_{pEq} : Constante de temps du régulateur de puissance réactive

La mesure de la puissance réactive se fait selon l'équation suivante tirée de [15] :

$$q = -u_{sd} \cdot i_{sq}$$

6 MESURE DES CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE

Il est nécessaire de déterminer complètement le schéma en T caractérisant la MADA afin de dimensionner la régulation.

La machine est à pôles lisses feuilletés à 4 bagues montée en étoile.

La machine sera caractérisée selon le schéma en T ci-dessous :

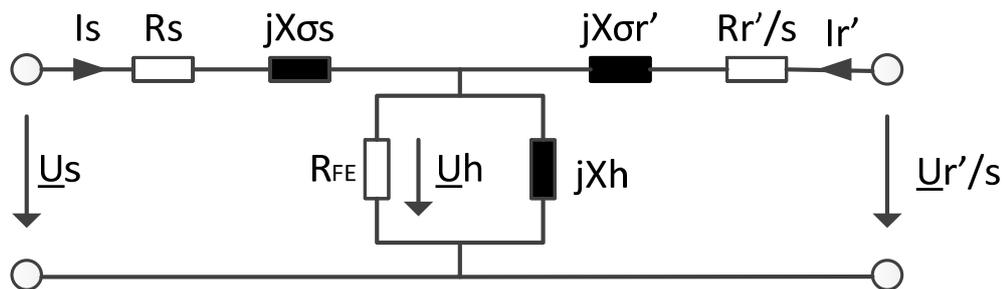


Figure 30 : Schéma équivalent en T

6.1 Calcul préliminaire

La valeur de l'inductance de champ est calculée selon le traité d'électricité sur les machines électriques [16] :

$$Lh_{théorique} = \frac{24}{\pi} \cdot \frac{\tau_p \cdot l}{p \cdot \delta} \cdot (Nk_{w1})^2 \cdot 10^{-7} = 590,5 \text{ mH}$$

Hypothèse : Tous les éléments sont considérés idéaux.

τ_p : Pas polaire

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot (d_{rotor} + \delta)}{4} = \frac{\pi \cdot (145 \cdot 10^{-3} + 1,2 \cdot 10^{-3})}{4} = 114,82 \text{ mm}$$

$p = 2$: Nombre de paires de pôles

$\delta = 1,2 \text{ mm}$: Entrefer

$l = 0,08 \text{ m}$: Longueur active

$k_{w1} = 0,945$: Facteur de bobinage

$N = 336$: Nombre total de conducteurs en série par bobine

Tous les paramètres sont par rapport au stator.

6.2 Mesures préliminaires

6.2.1 Résistance du bobinage statorique

Valeur théorique

Selon la notice technique :

$$R_{s75^{\circ}C} = 5,58 \Omega$$

Mesure à l'ohmmètre :

À 20°C :

$$R_{U1-U2} = 5,5\Omega$$

$$R_{V1-V2} = 5,3 \Omega$$

$$R_{W1-W2} = 4,9 \Omega$$

À 75°C :

Selon la formule suivante :

$$R_{75^{\circ}C} = R_{20^{\circ}C} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Avec $\alpha_{cuiivre} = 4 \cdot 10^{-3} [K^{-1}]$ et $\Delta T = 75 - 20 = 55K$

On obtient les valeurs suivantes :

$$R_{U1-U2} = 6,71\Omega$$

$$R_{V1-V2} = 6,47 \Omega$$

$$R_{W1-W2} = 5,98 \Omega$$

Comparaison des résultats

Rs théorique à 75°	Rs mesuré à 75°	Erreur
5,58 Ω	6,71 Ω	+16,1%
	6,47 Ω	+11,9%
	5,98 Ω	+3,46%

Figure 31 : Comparaison des valeurs obtenues pour les résistances statoriques

Les valeurs mesurées sont acceptables.

6.2.2 Résistance du bobinage rotorique

Valeur théorique

Le schéma du rotor triphasé à déterminer est le suivant :

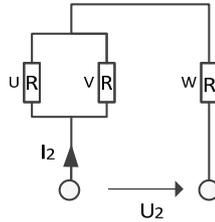


Figure 32 : Schéma électrique du bobinage rotorique

Selon la notice technique :

$$R_{tot,75^{\circ}C} = 2,04 \Omega$$

$$R_{phase,75^{\circ}C} = 1,36 \Omega$$

Il est possible de vérifier ces valeurs grâce à la tension nominale $U_2 = 25,2V$ et au courant nominal $I_2 = 12,3A$ donnés sur la plaque signalétique de la machine.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{tot} = \frac{R \cdot R}{R + R} + R = 1,5R \\ R_{tot} = \frac{U_2}{I_2} \end{array} \right.$$

$$\rightarrow R = \frac{U_2}{I_2 \cdot 1,5} = \frac{25,2}{12,3 \cdot 1,5} = 1,36 \Omega$$

Mesure :

La mesure des résistances rotoriques s'est faite par la méthode courant-tension à cause des balais qui fausseraient une mesure à l'ohmmètre.

À 20°C :

$$R_{rU} = 1,176 \Omega$$

$$R_{rV} = 1,153 \Omega$$

$$R_{rW} = 1,172 \Omega$$

À 75°C :

$$R_{rU} = 1,435 \Omega$$

$$R_{rV} = 1,406 \Omega$$

$$R_{rW} = 1,43 \Omega$$

On peut maintenant calculer la valeur de la résistance totale à 75°C selon le schéma présenté auparavant.

$$R_{tot} = \frac{R_{rU} \cdot R_{rV}}{R_{rU} + R_{rV}} + R_{rW} = 2,14 \Omega$$

Comparaison des résultats

À 75°C	Notice technique	Mesure	Erreur
Résistance par phase	1,36 Ω	1,42 Ω (moyenne)	+4,41%
Résistance totale	2,04 Ω	2,14 Ω	+4,9 %

Tableau 1 : Comparaison des valeurs théoriques et mesurées des résistances statoriques de la machine synchrone à 75°C

Les valeurs mesurées sont acceptables vu la faible erreur par rapport à la valeur théorique.

6.3 Saut de tension

6.3.1 Inductance du stator

Une mesure de la constante de temps électrique du courant lors d'un saut de tension sur une phase du stator avec le rotor ouvert permet de déterminer l'inductance ; la résistance par phase du stator étant connue.

$$L_s = T_{el} \cdot R_s$$

L'inductance calculée est égale à l'inductance de fuite du stator plus l'inductance principale.

$$L_s = L_{\sigma s} + L_{h1s}$$

Le saut de tension se fait de façon à obtenir un courant proche du courant nominal.

$$\Delta U = R_s \cdot I_N = 5,2 \cdot 3,5 = 18,3 \text{ V}$$

La mesure a été effectuée pour chaque bobine.

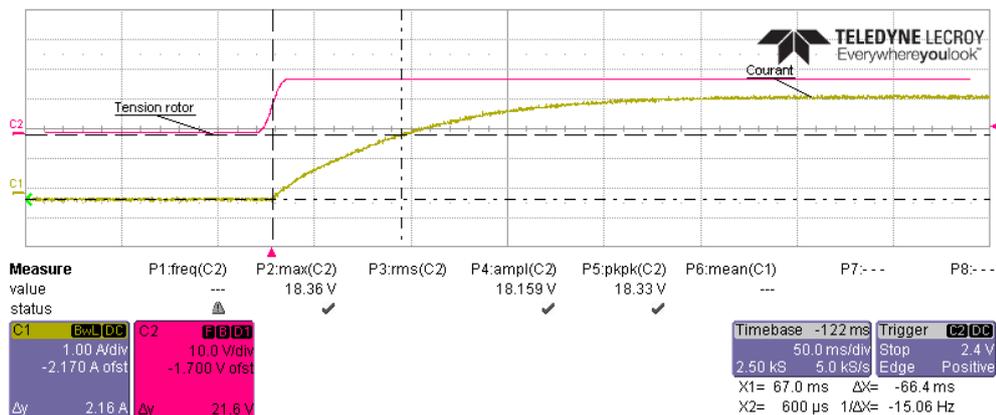


Figure 33 : Courbe du courant suite à un saut de tension sur la bobine U1-U2 du stator de la machine synchrone.

Les captures d'écran des autres bobines sont en annexe 2.

Bobine	Tel [ms]	R [Ω]	L [mH]
U1 – U2	66,4	5,5	365,2
V1 – V2	68,2	5,3	361,46
W1 – W2	71,8	4,9	351,82

Tableau 2 : Calcul de l'inductance en fonction de la constante de temps électrique

6.3.2 Inductance du rotor

Une mesure de la constante de temps électrique du courant lors d'un saut de tension sur une phase du rotor avec le stator ouvert permet de déterminer l'inductance, la résistance par phase du stator étant connue.

$$L_r = T_{el} \cdot R_r$$

L'inductance calculée est égale à l'inductance de fuite du rotor plus l'inductance principale.

$$L_r = L_{\sigma r} + L_{h1r}$$

Le saut de tension se fait de façon à obtenir un courant proche du courant nominal. Un interrupteur à mercure est utilisé afin d'avoir un saut de tension franc. Toutefois il supporte un courant maximal de 5A. La mesure est donc faite avec un courant limité à 5A.

$$\Delta U = R_R \cdot I_N = 1,16 \cdot 5 = 5,8 \text{ V}$$

Une mesure par bobine a été effectuée.

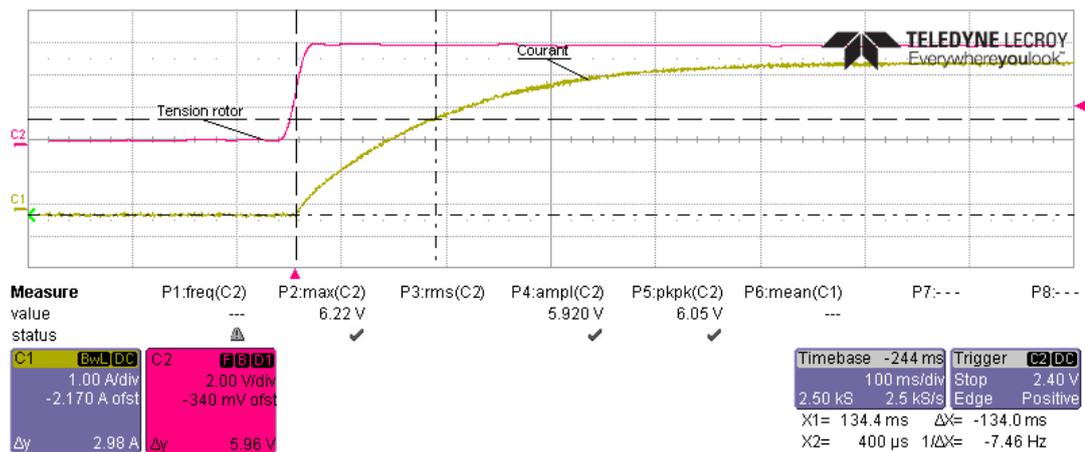


Figure 34 : Courbe du courant suite à un saut de tension sur la bobine U-N du rotor de la machine synchrone.

Les captures d'écran des autres bobines sont en annexe 3.

Bobine	Tel [ms]	R [Ω]	L [mH]
U -N	134	1,18	158,1
V - N	141,2	1,15	162,4
W -N	136,4	1,17	159,6

Tableau 3 : Calcul de l'inductance en fonction de la constante de temps électrique par bobine

6.4 Essai à vide

Lors de l'essai à vide le rotor est court-circuité. La vitesse est donc proche du synchronisme et le glissement est égale à zéro ($\Omega \cong \Omega_s$ $s = 0$). Le schéma en T peut donc être simplifié :

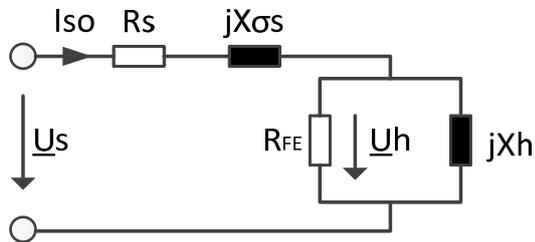


Figure 35 : Schéma pour la marche à vide

La puissance totale consommée par le moteur et le courant sont mesurées. Les pertes cuivre sont déterminées grâce à la formule suivante :

$$P_{cu} = 3 \cdot R_s \cdot I_{s0}^2$$

Le bilan des puissances est le suivant :

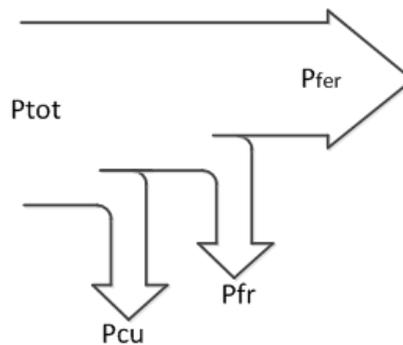


Figure 36 : Bilan des puissances lors de l'essai à vide

Un graphique présentant la puissance totale sans les pertes cuivre en fonction de la tension d'alimentation au carré permet de déterminer les pertes frottement.

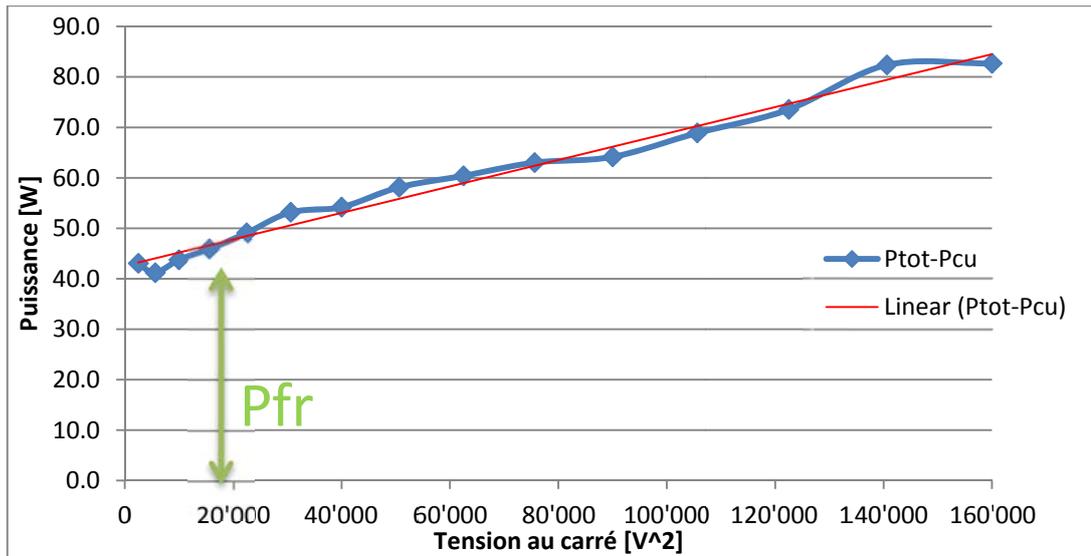


Figure 37 : Détermination graphique des pertes dues au frottement

Les pertes frottement sont déterminées graphiquement : $P_{fr} = 43W$

Les pertes fer peuvent maintenant être calculées et donc la résistance des pertes fer aussi :

$$P_{fer} = P_{tot} - P_{fr} - P_{cu}$$

$$R_{fer} = \frac{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2}{P_{fer}/3}$$

L'inductance de champ peut être calculée grâce à la mesure de la puissance réactive. L'inductance de fuite est beaucoup plus petite que l'inductance de champ ; elle est donc négligée ($X_{\sigma s} \ll X_h$)

$$X_h = \frac{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2}{Q_{tot}/3} \qquad L_h = \frac{X_h}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Le tableau récapitulant les mesures effectuées est en annexe 4.

Les valeurs retenues sont les valeurs mesurées au point de fonctionnement (400V). On obtient une inductance de champ de 478,2mH et une résistance fer de 4033,1Ω.

6.5 Essai à rotor bloqué

Lors de l'essai à rotor bloqué, la vitesse est nulle. Le glissement est donc égal à 1. Le schéma en T peut être simplifié de la façon suivante :

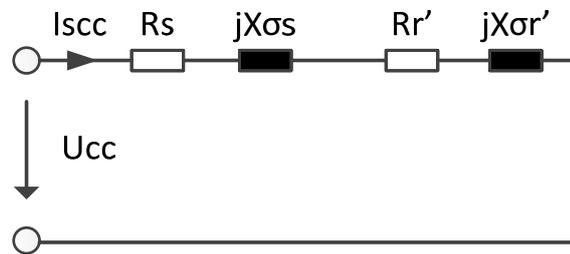


Figure 38 : Schéma à rotor bloqué

Les mesures suivantes sont réalisées :

$$U_{cc} = 23,2V$$

$$P_{tot} = 44,7W$$

$$I_{sc} = 1,3A$$

$$Q_{tot} = 84,73 \text{ Var}$$

On peut calculer les résistances et réactances de court-circuit :

$$R_{cc} = \frac{P_{tot}}{I_{cc}^2} = 8,81 \Omega = R_s + R_r' \cdot \dot{u}^2$$

$$X_{cc} = \frac{Q_{tot}}{I_{cc}^2} = \frac{84,73}{1,3^2} = 16,7 \Omega$$

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{16,7}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 53,16 \text{ mH}$$

En considérant les inductances de fuites égales :

$$L_{\sigma s} = L_{\sigma r}' = \frac{L_{cc}}{2} = \frac{53,16 \cdot 10^{-3}}{2} = 26,6 \text{ mH}$$

6.6 Mesure de la tension induite

6.6.1 Etapes

1. Faire tourner le rotor de la machine à la vitesse nominale avec la machine synchrone à aimants permanents.
2. Alimenter le stator avec le rotor ouvert. Le glissement est nul donc aucune tension n'est induite au rotor.
3. La vitesse d'entraînement est modifiée. Elle est variée entre 1300 et 1700 tr/min. La tension induite au rotor n'est désormais plus nulle. L'amplitude et la fréquence de la tension induite entre la phase et le neutre sont mesurées.

6.6.2 Mesures

La tension obtenue au rotor est sinusoïdale comme attendu :

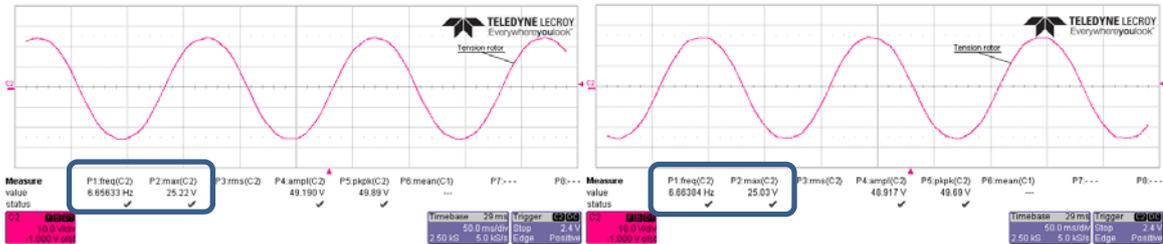


Figure 39 : Tension rotor lors de l'essai à rotor ouvert pour une vitesse de 1700 et 1300 tr/min

La vitesse de rotation définit le glissement par rapport à la vitesse de synchronisme :

$$s = \frac{n_s - n}{n}$$

La fréquence théorique de la tension au rotor peut être calculée par rapport à la fréquence du réseau :

$$f_{r\text{théorique}} = s \cdot f_s$$

La mesure se fait à rotor ouvert ; la tension induite mesurée rapportée au primaire $\frac{U_i'}{s}$ est donc égale, selon le schéma en T, à la tension U_h . Il est aussi possible de considérer que cette tension est environ égale à la tension U_s d'alimentation car l'inductance de champ est beaucoup plus grande que l'inductance de fuite.

$$\frac{U_r'}{s} = U_h \approx U_s$$

La mesure de \hat{U}_r permet donc de connaître le rapport de transformation :

$$\hat{u} = \frac{U_s}{\hat{U}_r / s} = \frac{U_s}{\frac{U_r'}{\sqrt{2}} / s}$$

Le tableau récapitulatif des mesures est en annexe 5.

Lorsque la vitesse est proche du synchronisme, le rapport de transformation a une valeur très différente des autres mesures. Cela peut être dû à une induction rémanente car on constate que même à vitesse de synchronisme une tension induite est présente. En retirant ces valeurs erronées, la valeur moyenne du rapport de transformation est de 1,67.

Si la tension et la fréquence au rotor sont représentées en fonction de la vitesse de rotation la tension induite est linéaire en hypersynchrone et en hyposynchrone. À la vitesse de synchronisme il n'y a quasi aucune tension induite comme attendu.

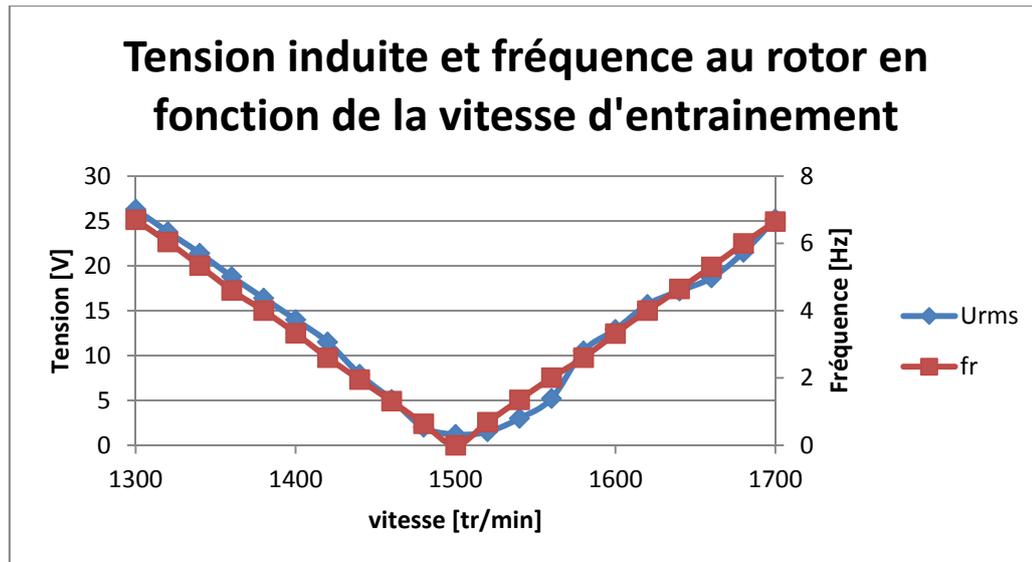


Figure 40 : Courbe de la tension induite (amplitude et fréquence) en fonction de la vitesse d'entrainement

6.6.3 Vérification théorique

Il est possible de calculer le rapport de transformation en connaissant le bobinage du moteur.

$$\ddot{u} = \frac{N_s \cdot kw_s}{N_r \cdot kw_r}$$

N_s : Nombre de spires en série par phase au stator

N_r : Nombre de spires en série par phase au rotor

kw_s : Facteur de bobinage du stator

kw_r : Facteur de bobinage du rotor

La notice technique du moteur donne le nombre de conducteurs total par encoche qui est de 56 pour le stator et 52 pour le rotor. Afin de connaître le nombre de conducteurs total il est nécessaire de multiplier le nombre de conducteurs par encoche par le nombre d'encoches et de le diviser par le nombre de phases et de conducteurs par bobine.

$$N_{condtotal} = \frac{N_{conducteurs/enchoche} * Nombre\ d'encoches}{Nombre\ de\ phases * Nombre\ de\ conducteurs\ par\ bobine}$$

On obtient pour le rotor et le stator :

$$N_s = \frac{56 * 36}{3 * 2} = 336$$

$$N_r = \frac{52 * 24}{3 * 2} = 208$$

Les facteurs de bobinage sont inscrits dans la notice technique :

$$kw_s = 0,945$$

$$kw_r = 0,96$$

On peut finalement calculer le rapport de transformation :

$$\ddot{u} = \frac{N_s \cdot kw_s}{N_r \cdot kw_r} = \frac{336 \cdot 0,945}{208 \cdot 0,96} = 1,59 [-]$$

6.7 Comparaison des résultats

6.7.1 Rapport de transformation

La valeur moyenne calculée pour le rapport de transformation \ddot{u} est de 1,67 alors que la valeur calculée est de 1,59. L'erreur est de 4,8%. Cette erreur est acceptable.

6.7.2 Inductances

En considérant les 2 inductances de fuites égales, il résulte de l'essai à rotor bloqué :

$$L_{\sigma s} = L_{\sigma r}' = 26,6 \text{ mH}$$

Le saut de tension permet de connaître :

$$L_{S_{moy}} = L_{\sigma s} + L_{h1s} = 359,5 \text{ mH}$$

$$L_{r_{moy}} = \frac{L_{\sigma r}'}{\ddot{u}^2} + L_{h1r} = 160 \text{ mH}$$

Si l'on retranche l'inductance de fuite calculée lors de l'essai à rotor bloqué :

$$L_{h1s} = L_{S_{moy}} - L_{\sigma s} = 359,5 \cdot 10^{-3} - 26,6 \cdot 10^{-3} = 332,9 \text{ mH}$$

$$L_{h1r} = L_{r_{moy}} - L_{\sigma r} = 160 \cdot 10^{-3} - \frac{26,6 \cdot 10^{-3}}{1,59^2} = 149,5 \text{ mH}$$

L'inductance de champ peut être considérée égale à 1,5 fois l'inductance principale [16].

$$L_h = \frac{3}{2} L_{h1}$$

Lorsque cette formule est appliquée aux valeurs calculées lors de l'essai à rotor bloqué :

$$L_{h_s} = \frac{3}{2} L_{h1s} = \frac{3}{2} \cdot 332,9 \cdot 10^{-3} = 499,3 \text{ mH}$$

$$L_{h_r} = \frac{3}{2} L_{h1r} = \frac{3}{2} \cdot 149,5 \cdot 10^{-3} = 224,3 \text{ mH}$$

Les inductances de champ devraient être égales si elles sont par rapport à leur enroulement respectif :

$$L_{h_s} = 499,3 \text{ mH} \quad L_{h_r}' = L_{h_r} \cdot \ddot{u}^2 = 567 \text{ mH}$$

Ces valeurs peuvent être comparées avec l'inductance de champ calculée lors de l'essai à vide. Attention, lors de l'essai à vide, les inductances de fuites ont été négligées ; les valeurs ne seront pas exactement les mêmes mais sont comparables afin de confirmer les mesures.

$$L_{h_{\text{à vide}}} = 478 \text{ mH}$$

Le tableau ci-dessous compare les valeurs de l'inductance de champ mesurées à l'inductance de champ théorique calculée :

Mesure	Valeur [mH]	Erreur
$Lh_{théorique}$	590,5	-
Lh_s	499,3	-15,4%
Lh_r'	567	-4%
$Lh_{à\ vide}$	478	-19%

Tableau 4 : Comparaison des inductances de champ

Les valeurs mesurées sont toutes inférieures à celle calculée. L'inductance de champ théorique est calculée avec des éléments idéaux. Elle est donc un peu surestimée.

Une autre hypothèse qui a été formulée et qui peut expliquer une erreur est que les inductances de fuites ont été considérées égales.

Pour la mesure de l'inductance de champ lors de l'essai à vide, les pertes dues au frottement ont été estimées graphiquement et les pertes cuivre ont été calculées par rapport à une valeur moyenne de résistance. Cela peut expliquer en partie l'erreur.

6.7.3 Schéma en T final

Le schéma en T est désormais déterminé. Les valeurs choisies et qui seront utilisées lors des simulations et calculs sont les suivantes :

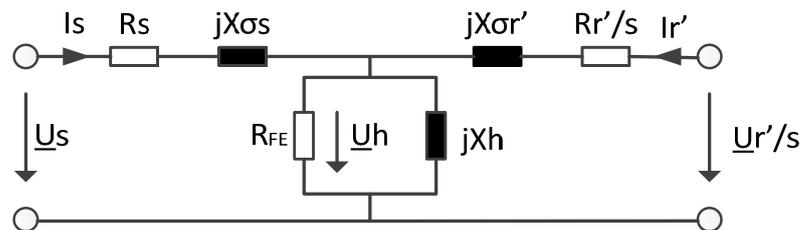


Figure 41 : Schéma équivalent en T

R_s	$X_{\sigma s}$	R_{FE}	X_h	$X_{\sigma r'}$	$R_{r'}$
5,58Ω	26,6 mH	4033,1Ω	478,2mH	26,6 mH	3,43Ω

Tableau 5 : Récapitulatif des grandeurs du schéma en T de la MADA

6.8 Estimation de l'inertie

Un calcul de l'inertie de la machine permettra de réaliser des simulations plus réalistes.

Hypothèse : La masse du rotor est calculée comme un cylindre plein d'acier.

$$J = \frac{m \cdot R^2}{2}$$

Avec : $m = \rho \cdot V$ et $V = l \cdot \pi \cdot R^2$

Pour :

$$\rho_{acier} = 7500 \frac{kg}{m^3}$$

$$l = 80 \text{ mm}$$

$$R = 72.5 \text{ mm}$$

L'inertie calculée est donc de 0,026 [kg·m²].

7 MISE EN PLACE DU CONTROLE

7.1 Structure hardware

La structure hardware mise en place pendant ce travail de diplôme et expliquée dans ce chapitre est la suivante :

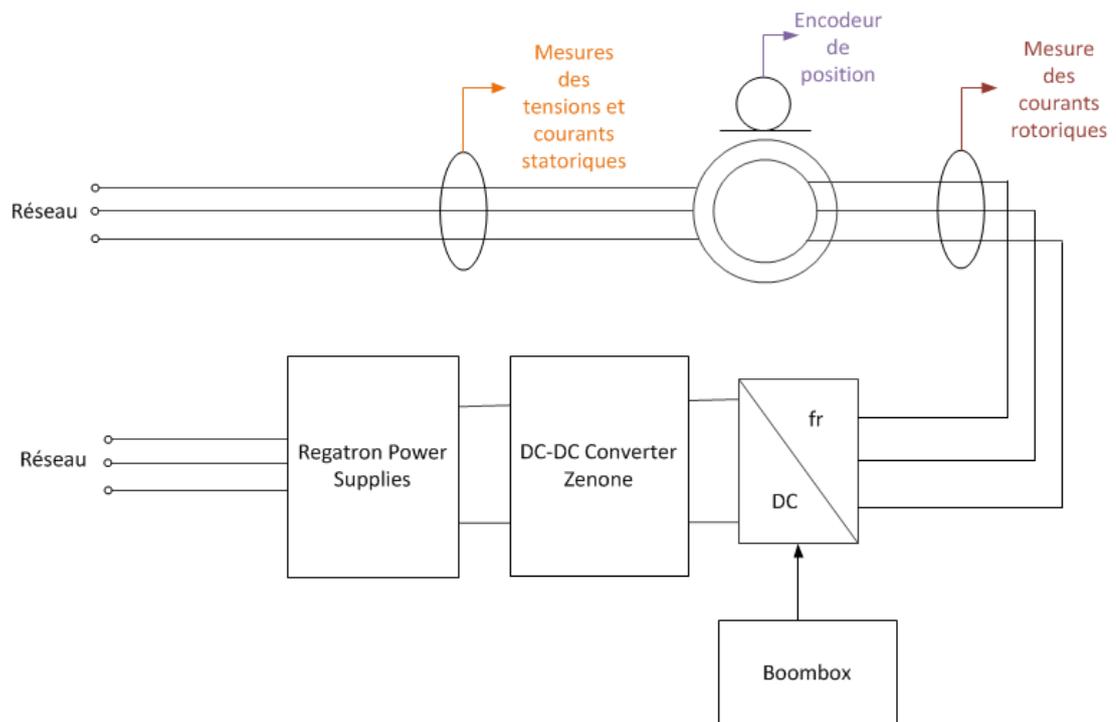


Figure 42 : Structure hardware

L'onduleur connecté au rotor de la MADA est un onduleur triphasé à 2 niveaux. Il est alimenté par un convertisseur bidirectionnel qui fournit une tension fixe.

L'onduleur utilisé est composé de 3 demi-ponts fabriqués par la société Impérix. Ils peuvent fonctionner jusqu'à 32A pour 600V/30kHz avec une alimentation de 800V maximum. Ils sont prévus pour être commandés par la plateforme de contrôle « Boombbox » de la même société. La Boombbox est une plateforme de contrôle destinée à aider les ingénieurs R&D à développer de l'électronique de puissance.

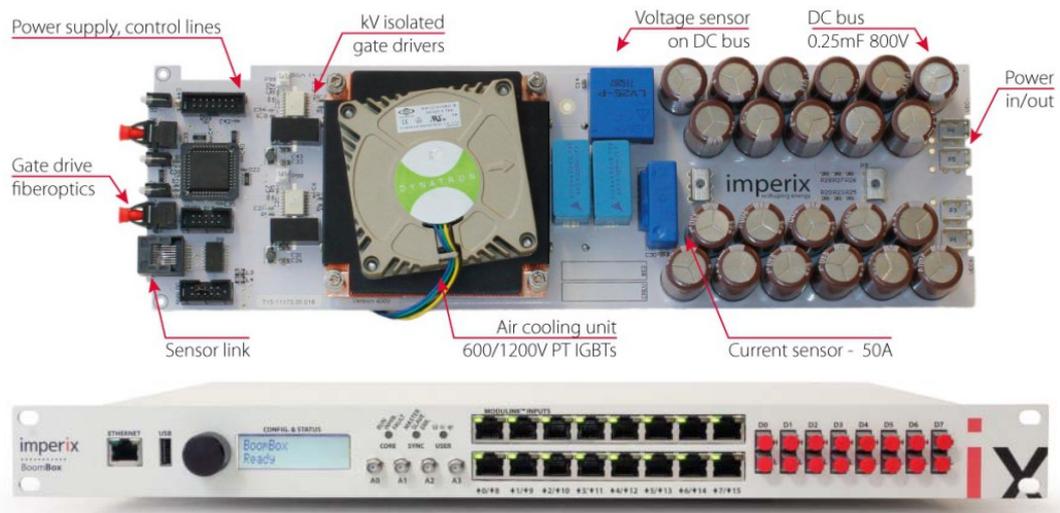


Tableau 6 : Photos représentant une carte demi-pont d'onduleur et la Boombox [17]

Les capteurs de tension et de courant utilisés sont fabriqués spécifiquement pour fonctionner avec la Boombox.

L'encodeur de position doit permettre de connaître la vitesse et la position de la MADA.

Le logiciel Code Composer Studio permet de programmer le DSP de la Boombox et de le déboguer.

Le logiciel Boombox Control est un logiciel débogage et de commande pour l'utilisateur.

Le manuel d'utilisateur de la Boombox [17] présente son architecture hardware et software ainsi que les principes de programmation du DSP.

Des tests d'utilisation et de prise en main de la Boombox ont été effectués afin de le maîtriser et sont en annexe 6.

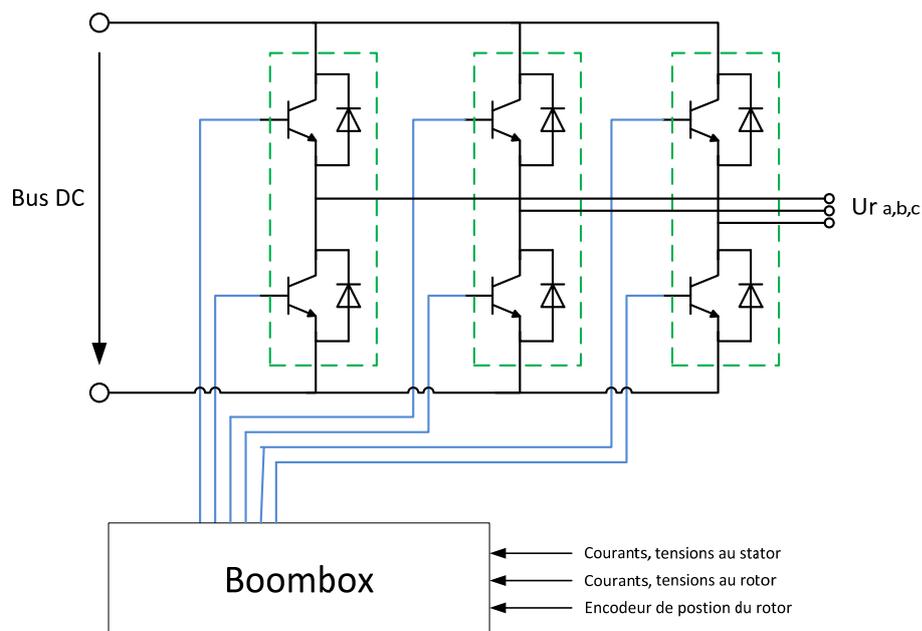


Figure 43 : Schéma de principe de la commande de l'onduleur

La Boombbox permet de réguler la PWM de l'onduleur et donc la tension et la fréquence que l'onduleur fournit.

C'est la première fois que les bras d'onduleur Impérix sont utilisés dans la HES-SO de Sion. Il est nécessaire de les tester afin de comprendre et confirmer leur fonctionnement avant de les utiliser. La procédure de test a été réalisée avec M. Cyril Morisod qui effectue un travail de diplôme qui comprend aussi ce matériel.

Les tests ont été réalisés sur un seul bras d'onduleur. La commande utilisée est une modulation de largeur d'impulsions (MLI) à 2 niveaux.

Les tests ont été réalisés avec comme charge une self. Les cartes Impérix fournissent une mesure de courant et une mesure de la tension de bus. Ces mesures ont été vérifiées.

Les mesures suivantes ont été effectuées :

- Tension du bus DC (mesure de la carte)
- Courant de sortie (mesure de la carte)
- Tension sur la self
- Courant dans la self

Elles ont ensuite été comparées à une simulation sur Matlab Simulink.

Le schéma de mesure, les calculs de gain de mesure, les résultats des mesures ainsi que les résultats de la simulation son en annexe 7.

Les erreurs de mesure pour le courant parcourant la self sont en dessous de 1%. Un petit retard est constaté entre le courant du LEM et le courant mesuré. Il est en dessous des 4µs et est donc acceptable.

Les erreurs de mesures pour la tension du bus sont en dessous des 6%. En tenant en compte que la tension maximale mesurée est 60V alors que la tension maximale possible est 800V, les résultats sont acceptables.

7.2 Alimentation continue bidirectionnelle

Deux alimentations sont disponibles dans les laboratoires de la HES :

- Zenone DC-DC Converter 110÷120V/100V 100A 10kW
- Regatron Power Supplies 3x400VAC 3x60A / 0...600VDC -66A...+66A

L'alimentation Regatron peut fournir une tension de 0 à 600V. Toutefois en analysant le manuel utilisateur [18], on constate que la régénération de courant est nulle en dessous de 35V. Or lors du fonctionnement de la MADA, les tensions peuvent devenir inférieures à 35V. Par exemple, pour un glissement de 0,5%, la tension continue que peut générer l'onduleur est de 20,5V.

L'alimentation Zenone [19] va donc être utilisée. Elle sera alimentée en tension continue par l'alimentation Regatron.

La structure qui a donc été mise en place est la suivante :

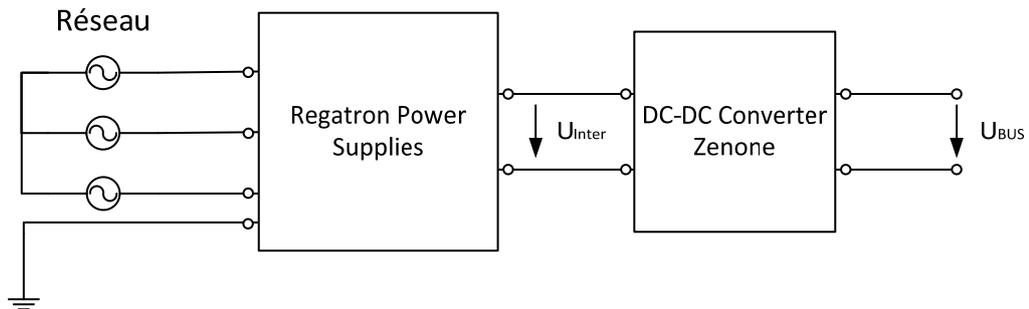


Figure 44 : Configuration de l'alimentation continue bidirectionnelle

La tension du bus DC alimentant les demi-ponts d'onduleur est constante. L'amplitude du fondamental de la tension de phase à la sortie de l'onduleur (tension rotorique) est donnée selon [20] :

$$\hat{U}_{ph_r} = \frac{U_{DC}}{2} \cdot \frac{\hat{U}_{ph_{cm}}}{\hat{U}_h}$$

Avec \hat{U}_h l'amplitude du signal de la porteuse qui est choisie égale à 1 et $\hat{U}_{ph_{cm}}$ celle du signal de commande.

Or $\frac{\hat{U}_{ph_{cm}}}{\hat{U}_h} \leq 1$ donc $\hat{U}_{ph_{r_max}} = \frac{U_{DC}}{2}$

La tension maximale que peut fournir l'alimentation Zenone est de 100V. Ce sera donc la tension maximale du bus.

Il est nécessaire de disposer d'une réserve de réglage permettant de dépasser temporairement le glissement maximal. Une réserve de 30% est choisie [3]. La tension maximale théorique du bus continu en soustrayant cette réserve de 30% est de 77V.

La relation entre la tension du bus continu et la tension maximale fournie par l'onduleur est la suivante :

$$U_{DC} = 2 \cdot \hat{U}_{ph_{r_max}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ph_{r_max}}$$

En connaissant la tension théorique maximale du bus continu, il est possible de calculer la tension maximale que pourra délivrer l'onduleur.

$$U_{ph_{r_max}} = \frac{U_{DC}}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{77}{2 \cdot \sqrt{2}} = 27,2V$$

L'équation définissant le rapport entre les tensions au stator et au rotor est la suivante :

$$U_{ph_r} = U_{ph_s} \cdot s / \ddot{u}$$

Il est maintenant possible de connaître le glissement maximal jusqu'auquel pourra fonctionner la MADA :

$$s_{max} = \frac{U_{ph_{r_max}} \cdot \ddot{u}}{U_{ph_s}} = \frac{27,2 \cdot 1,59}{230} = 18,8\%$$

Cela correspond à une variation de vitesse de $\pm 282 \text{tr/min}$ autour de la vitesse synchrone et à une vitesse maximale de 1782tr/min .

7.3 Encodeur

Un encodeur est nécessaire afin de connaître la position du rotor et sa vitesse. Il a d'abord été choisi d'utiliser un encodeur disponible dans l'école. L'encodeur prévu était un encodeur incrémental avec une précision de 2500ppr. L'encodeur incrémental dispose de 3 canaux fournissant les signaux suivants :

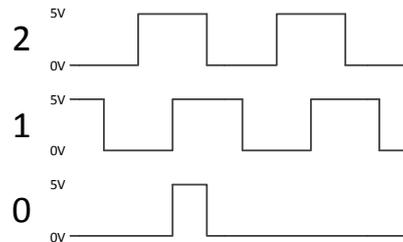


Figure 45 : Représentation du fonctionnement des canaux de l'encodeur.

La durée d'une impulsion lorsque la MADA fonctionne à sa vitesse maximale 1782tr/min est de $13,5\mu\text{s}$; ce qui correspond à $78,125\text{kHz}$. La fréquence d'acquisition des entrées digitales de la Boombox n'est pas précisée dans le manuel utilisateur. Toutefois les tests ont montré qu'au-dessus de 600tr/min , l'impulsion n'est pas toujours détectée par la Boombox. Il a donc été décidé d'utiliser un autre type d'encodeur.

En effet, les entrées digitales de la Boombox, ont l'avantage d'avoir une isolation optique mais cela ralentit l'acquisition et cela ne convient pas pour des signaux à haute fréquence comme les signaux de ce capteur.

Le capteur qu'il a donc été choisi est un encodeur magnétique de type sin/cos. Celui-ci utilise l'effet Hall afin de générer deux signaux analogiques. L'avantage de ce capteur est que la détection se fait sans contact donc cela n'implique aucune usure et que la vitesse de détection est très importante (jusqu'à 20'000 mesures par seconde).

Les détecteurs Hall utilisent un élément semi-conducteur parcouru par un courant sous précontrainte magnétique constante due au champ magnétique d'un aimant permanent monté derrière cet élément. Dès qu'un objet en matériau ferromagnétique pénètre dans ce champ magnétique, il a une influence directe sur l'intensité de ce champ provoquant une modification de la tension au niveau du semi-conducteur. [21]

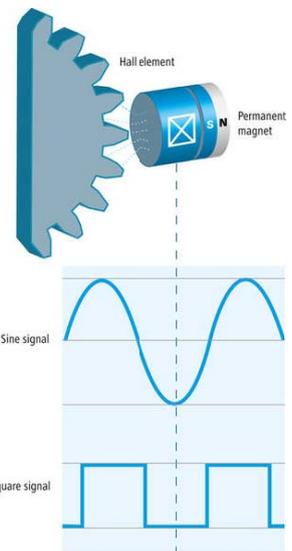


Figure 46 : Fonctionnement d'un détecteur à effet Hall [21]



Figure 47 : Représentation de l'encodeur sinus/cosinus [22]

Le capteur utilisé [22] fournit en sortie 3 canaux :

- Canal A : 64 périodes de sinus par tour d'amplitude 1Vpp
- Canal B : 64 périodes de sinus par tour décalé de 90° par rapport au canal A et d'amplitude 1Vpp
- Canal N : 1 impulsion par tour d'amplitude 2,5 V

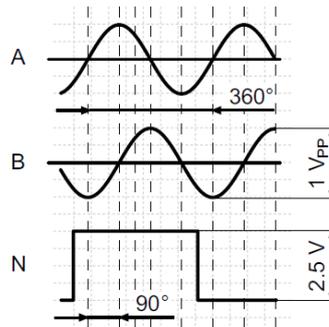


Figure 48 : Signaux fournis par l'encodeur [22]

Cette fois-ci les canaux A et B sont connectés aux entrées analogiques de la Boombox.

Les signaux que fournit le capteur étant de $\pm 1V_{pp}$, le canal A ainsi que le canal B sont directement raccordés comme les capteurs LEM sur les entrées analogiques de la Boombox.

L'encodeur est en deux pièces. Le capteur en lui-même ainsi qu'une roue en matériau ferromagnétique. La roue a un diamètre intérieur de 14mm. Un accouplement a dû être réalisé afin de la monter sur l'axe du moteur. Elle a été montée à l'aide d'une presse sur l'axe de l'accouplement. Le capteur doit être placé à 0,3mm de la roue. Le sens de montage de la roue par rapport au capteur a une influence sur son comportement. Les schémas des pièces mécaniques réalisées sont en annexe 8.



Figure 49 : Photo de l'encodeur monté sur l'axe de la MADA

Après avoir été monté sur l'axe, les signaux que ce capteur fournit ont été testés à une vitesse de rotation de 600 tr/min.

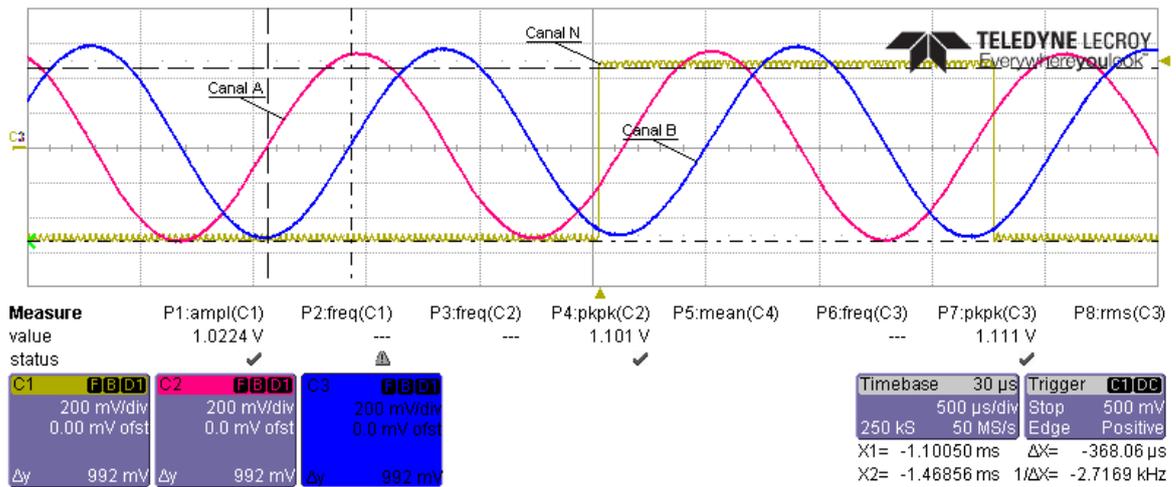


Figure 50 : Test des signaux fournis par l'encodeur magnétique à 600tr/min

Il devrait y avoir, selon le datasheet, 64 périodes de sinus par tour. A une vitesse de 600 tr/min, la fréquence du rotor est de 10Hz ; ce qui correspond à 100ms. Une période de sinus devrait donc durer 1,5625ms. Les mesures ont montré qu'une période de sinus dure 1,54ms pour le canal A comme pour le canal B. L'erreur est donc de 1,44%. Cela est sûrement dû à la référence de vitesse. La référence de vitesse est l'afficheur de couple Magtrol qui n'a une précision que de 1tr/min.

La pulsation sur le canal N est bien présente 1 fois par tour. Elle a la même durée qu'une période de sinus comme attendu. Toutefois, son amplitude n'est pas de 2,5V comme le présente le datasheet mais de 1V. Cela n'engendre aucun problème pour la suite du projet.

Les entrées analogiques fournissent une alimentation pour les capteurs de $\pm 15V$ avec un point milieu. Par contre, l'alimentation du capteur est de 5V. Il n'est pas possible d'utiliser la même alimentation 5V que celle utilisée pour le reste du système. Il est important que la masse de l'entrée analogique soit fixée car on ne sait pas si elle est réutilisée pour une autre fonction dans la Boombox. Il a donc été choisi d'utiliser l'alimentation $\pm 15V$ des entrées analogiques pour alimenter le capteur en 5V. Pour cela, un convertisseur DC/DC a été utilisé [23].

Afin de calculer la vitesse du rotor, une PLL (Phase Lock Loop) sera implémentée.

7.4 Mise en place du hardware de la Boombox

7.4.1 Entrées analogiques

Les mesures des courants et tensions définies lors de l'étude de la régulation sont connectées aux entrées digitales de la Boombox. La mesure de position du rotor est elle aussi reliée par les entrées analogiques comme décrit dans le chapitre « Encodeur ».

Les entrées analogiques sont configurées de la manière suivante :

	U _{dc}	I _{r_{a,b,c}}	I _{s_{a,b,c}}	U _{s_{a,b,c}}	Ω
Capteur	LEM LV25-P	IX-ModuLink15A	IX-ModuLink15A	IX-ModuLink400V	Baumer_ITD49H00
Nombre de capteurs	1	3	3	3	1
Plage de mesure	800V	±15 A	±15 A	±400 V	±30000 rpm
Impédance d'entrée	100Ω	3kΩ	3kΩ	3kΩ	3kΩ
Gain de précision	4	8	8	8	8
Limitations	420V	±10A	±10A	-	-
Limitations sur la boombox	+4,2V et -0,1V	±5,6V	±5,6V	-	-

Tableau 7 : Configuration des entrées analogiques [22], [24], [25]

Un tableau précisant le raccordement des capteurs sur la Boombox est disponible en annexe 9.

8 VERIFICATION PRATIQUE

8.1 Démarrage en mode pompe

Le schéma de régulation présenté au chapitre 5.2 est modifié en fonction du matériel dont nous disposons :

- La machine est alimentée par le rotor au lieu du stator. Le stator est donc court-circuité.
- L'alimentation utilisée est le convertisseur AC/DC Regatron.
- L'onduleur est composé de trois cartes Impérix.
- La mesure de vitesse a été réalisée, pendant les tests, avec une dynamo tachymétrique puis avec l'encodeur de position incrémental pour le montage final.
- La régulation est programmée dans la Boombox.

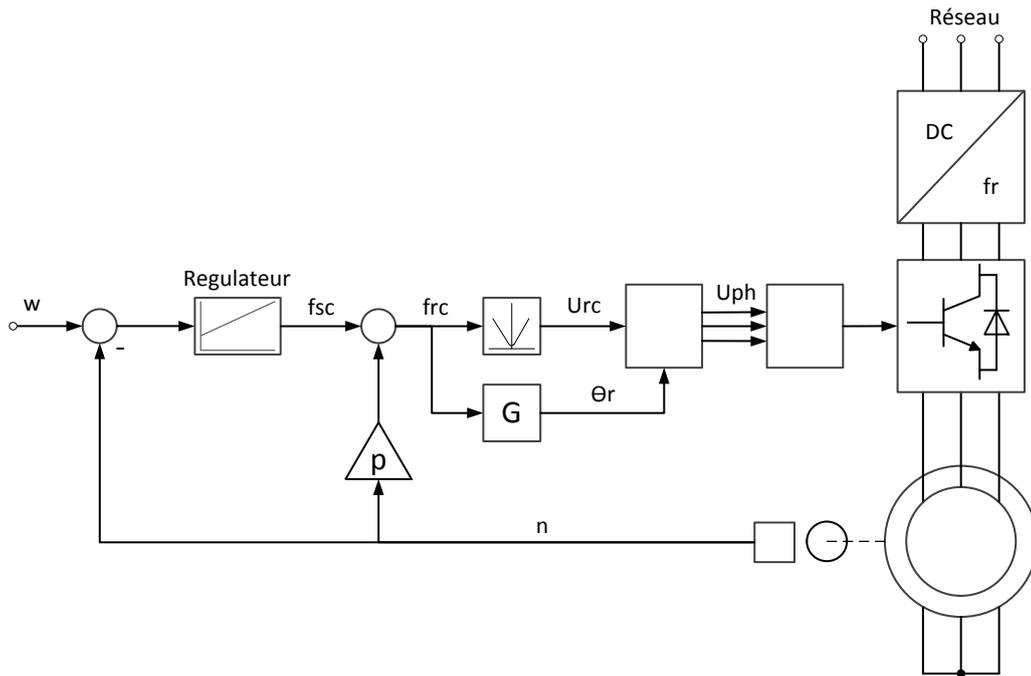


Figure 51 : Structure de la régulation U/f

8.1.1 Schéma bloc du système en boucle fermée

Il est nécessaire de décrire la fonction de transfert en boucle fermée n/w afin de dimensionner le régulateur. Les symboles utilisés sont les suivants :

n : vitesse mécanique de la MADA

w : consigne de vitesse mécanique

p : nombre de paires de pôles

$K_{REG}(s)$: régulateur

$H(s)$: système d'entraînement à réguler

Comme expliqué précédemment, le système de régulation peut maintenant être décrit à l'aide des équations suivantes :

$$frc = fsc + n \cdot p$$

$$fsc = K_{REG}(s) \cdot (w - n)$$

La combinaison de ces deux équations permet d'exprimer fsc en fonction de n et w .

$$frc = K_{REG}(s) \cdot (w - n) + n \cdot p = K_{REG}(s) \cdot w - K_{REG}(s) \cdot n - n \cdot p$$

Le système d'entraînement peut être décrit par l'équation :

$$n = frc \cdot H(s)$$

La fonction du système en boucle fermée est donc la suivante :

$$F_{CL}(s) = \frac{n(s)}{w(s)} = \frac{H(s) \cdot K_{REG}(s)}{1 + H(s) \cdot K_{REG}(s) - p \cdot H(s)}$$

8.1.2 Identification du système

La première étape consiste à identifier le système $H(s)$. Celui-ci est identifié grâce à un saut indiciel de la commande **frc** et en observant la vitesse résultante de rotation **n**.

La relation entre la fréquence et la vitesse est la suivante :

$$f = n \cdot p$$

Avec f : la fréquence d'alimentation

p : le nombre de paires de pôles de la machine

n : la vitesse en tr/min

Le saut de fréquence (30Hz à 35Hz) correspond à un changement de vitesse de 900 tr/min à 1050tr/min.

L'onduleur est caractérisé par les paramètres suivants :

$U_{bus} = 400V$: Tension d'alimentation du bus continu

$F = 20kHz$: Fréquence de commutation

Attention, les courants ne sont pas régulés. Il est donc important de mesurer les courants et de fixer les limites de sécurité proposées par la Boombbox. Dans notre cas la limite est de $\pm 10A$; c'est-à-dire environ 3 fois le courant nominal. Lorsque la limite de courant est dépassée, toutes les commutations de l'onduleur sont coupées.

Le système identifié est un système du premier ordre comme le montre les résultats des essais :

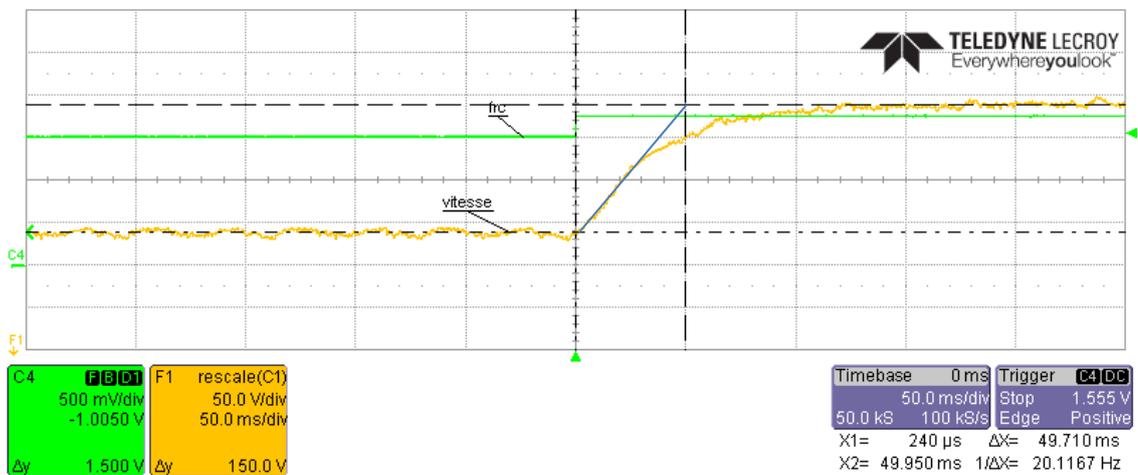


Figure 52 : Résultats de l'identification du système

La constante de temps est mesurée : $T_s = 49.7ms$

Le gain statique peut être calculé : $K_s = \frac{\Delta n}{\Delta f_{sc}} = \frac{150/60}{35-30} = 0.5$

Le système identifié en simulation est donc :

$$H_s(s) = \frac{K_{sim}}{1 + sT_{sim}} = \frac{0,5}{1 + s \cdot 49,7 \cdot 10^{-3}}$$

Le diagramme de Bode du système est le suivant :

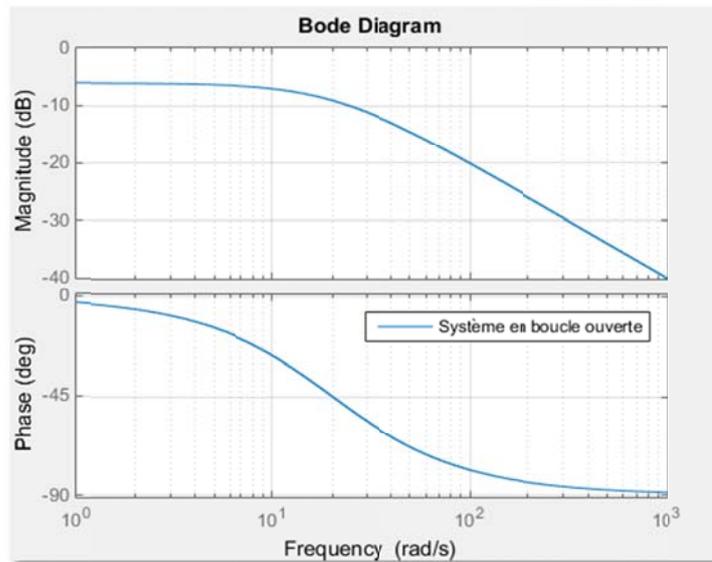


Figure 53 : Diagramme de Bode du système

Le diagramme de Bode est conforme à celui d'un système du premier ordre. On constate qu'il est conforme à un filtre passe-bas avec une atténuation de 20dB/dec.

Le système en boucle ouverte a été testé avec un saut de consigne comme lors de l'essai, c'est-à-dire de 30 à 35Hz.

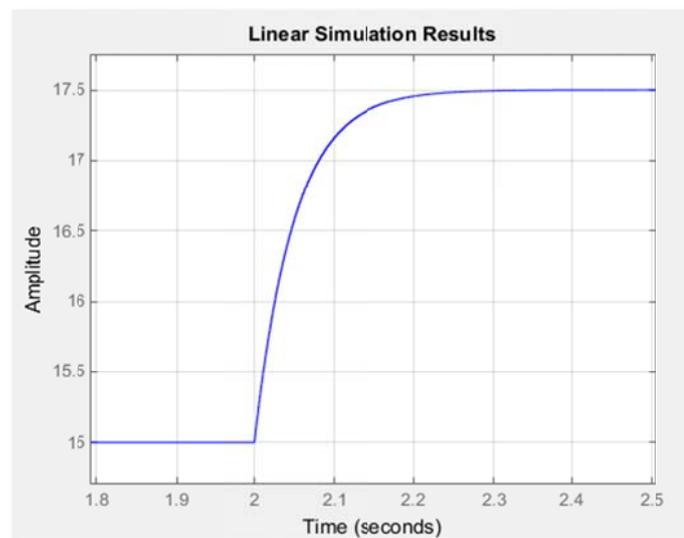


Figure 54 : Résultat de la vitesse en fonction d'un saut de consigne en boucle ouverte

La vitesse sur la simulation est en [tr/s]. On constate un saut de vitesse de 900 à 1050tr/min comme attendu.

La réponse indicielle du système en boucle ouverte permet de vérifier le gain statique et la constante de temps mesurée plus tôt.

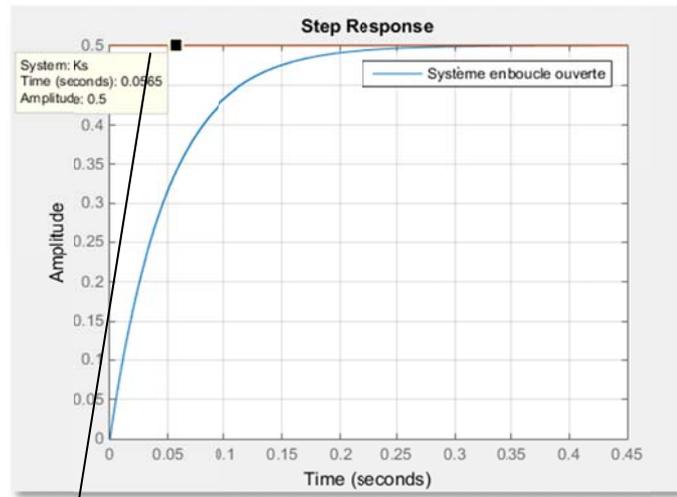


Figure 55 : Réponse indicielle du système en boucle ouverte

Le gain statique est de 0,5 comme attendu. La constante de temps est de 56,5ms.

	K	Ts
Mesure	0,5	49,7 ms
Simulation	0,5	56,5 ms
Erreur	0%	+12,4%

Tableau 8 : Comparatif des valeurs caractéristiques du système

On constate que le gain statique est le même mais que les constantes de temps diffèrent de 12,4%. Cela peut être dû à la précision du capteur de vitesse. Les résultats restent toutefois acceptables.

8.1.3 Dimensionnement du régulateur

Le système étant un système du premier ordre avec un comportement peu dynamique, il convient d'opter pour un régulateur PI. La fonction de transfert du régulateur PI est la suivante :

$$K_{REG}(s) = \frac{K_p(1 + s \cdot T_n)}{s \cdot T_n}$$

Il est maintenant possible d'insérer l'équation du régulateur et celle du système dans la fonction de transfert du système en boucle fermée. L'équation développée du système en boucle fermée est la suivante :

$$F_{CL}(s) = \frac{K_p \cdot K \cdot (1 + s \cdot T_n)}{s^2 \cdot (T_s \cdot T_n) + s \cdot (T_n + K_p \cdot K \cdot T_n - p \cdot K \cdot T_n) + K_p \cdot K}$$

Afin de dimensionner les gains du régulateur, celui-ci est comparé à un filtre objectif du deuxième ordre. Sa fonction de transfert est la suivante :

$$\frac{1}{1 + \frac{a_1}{w_g} \cdot s + \frac{b_1}{w_g^2} \cdot s^2}$$

Pour les coefficients du filtre, on choisira un comportement de type atténuation critique, à savoir $a_1 = 1,2872$ et $b_1 = 0,4142$. Le filtre passe-bas avec atténuation critique ne présente aucun dépassement de la consigne.

Il est nécessaire de normaliser la fonction de transfert du système en boucle fermée afin de pouvoir la comparer à au filtre.

$$F_{CL}(s) = \frac{1 + s \cdot T_n}{s^2 \cdot \left(\frac{T_s \cdot T_n}{K_p \cdot K}\right) + s \cdot \frac{T_n \cdot (1 + K_p \cdot K - p \cdot K)}{K_p \cdot K} + 1}$$

Les coefficients du dénominateur de la fonction de transfert du système en boucle fermée et de la fonction du filtre objectif du 2^{ème} ordre sont comparés.

$$\frac{b_1}{w_g} = \frac{T_s \cdot T_n}{K_p \cdot K}$$

$$\frac{a_1}{w_g^2} = \frac{T_n \cdot (1 + K_p \cdot K - p \cdot K)}{K_p \cdot K}$$

Sans compter la fréquence de coupure, il y a deux systèmes à deux inconnues. On peut déterminer algébriquement le gain **Kp** et la constante de temps d'intégration **Tn**.

$$K_p = \frac{a_1 \cdot w_g \cdot T_s - b_1 + b_1 \cdot p \cdot K}{b_1 \cdot K}$$

$$T_n = \frac{a_1 \cdot w_g \cdot T_s - b_1 + b_1 \cdot p \cdot K}{w_g^2 \cdot T_s}$$

Le système offre un degré de liberté, puisque la fréquence de coupure du système en boucle fermée **wg** n'est pas définie. L'inéquation suivante permet de fixer la fréquence de coupure minimale afin d'avoir des gains positifs :

$$K_p > 0, T_n > 0 \quad w_g \min = \frac{b_1 - b_1 \cdot p \cdot K}{a_1 \cdot T_s}$$

Le gain **Ki** peut maintenant être calculé :

$$K_i = \frac{K_p}{T_n}$$

L'application numérique a été réalisée sur Matlab afin de pouvoir facilement les refaire en changeant certaines valeurs. L'application numérique permet d'obtenir les résultats suivants :

Tn	Kp	Ki	wg min	wg choisi
255,9 ms	4,8286	1,2356	0	4

Tableau 9 : Tableau récapitulatif de l'application numérique du dimensionnement de la régulation de la commande U/f

Les résultats de la simulation sont les suivants :

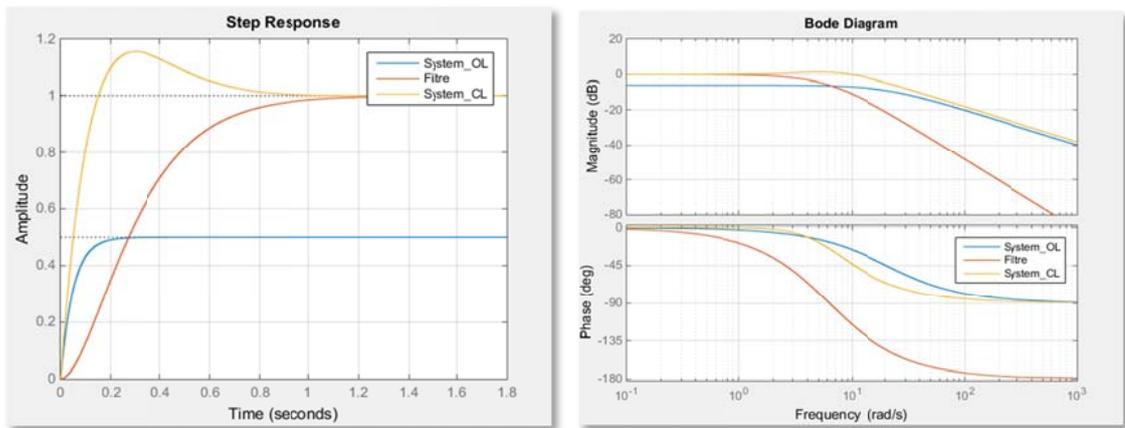


Figure 56 : Diagramme de Bode et réponse indicielle du système en boucle ouverte, en boucle fermée et du filtre

On constate que Le système en boucle fermée à un gain statique de 1 comme attendu mais qu'il présente un léger dépassement de la consigne contrairement au filtre. Le diagramme de Bode montre que le système en boucle fermée à un gain corrigé mais que l'atténuation n'est pas de 40dB/dec comme le filtre.

Afin d'amortir correctement le système en boucle-fermée, il est nécessaire de compenser les zéros. Cela se fait en inversant le numérateur de la fonction de transfert :

$$F_{comp}(s) = \frac{1}{1 + s \cdot T_n}$$

Cette fonction compensera le zéro du système en closed-loop. Le gain statique doit rester unitaire. En résolvant la fonction de transfert pour $s=0$, on obtient un gain statique égal à 1. Le gain statique n'a donc pas besoin d'être corrigé.

La fonction de transfert doit être discrétisée vu que la régulation est réalisée dans un DSP. Le code à implémenter est le suivant :

$$y = \beta \cdot y_{old} + \alpha \cdot u_{old} ;$$

$$y_{old} = y ; u_{old} = u ;$$

- Avec :
- y_{old} : La valeur de la sortie au point précédent d'échantillonnage
 - u_{old} : La valeur de la consigne au point précédent d'échantillonnage
 - $\beta = e^{-h/T_n}$: Coefficient
 - $\alpha = 1 - \beta$: Coefficient
 - h : La fréquence d'échantillonnage du système

Le système en boucle fermée avec compensation du zéro a été simulé et comparé au système en boucle fermée sans compensation du zéro ainsi qu'au filtre.

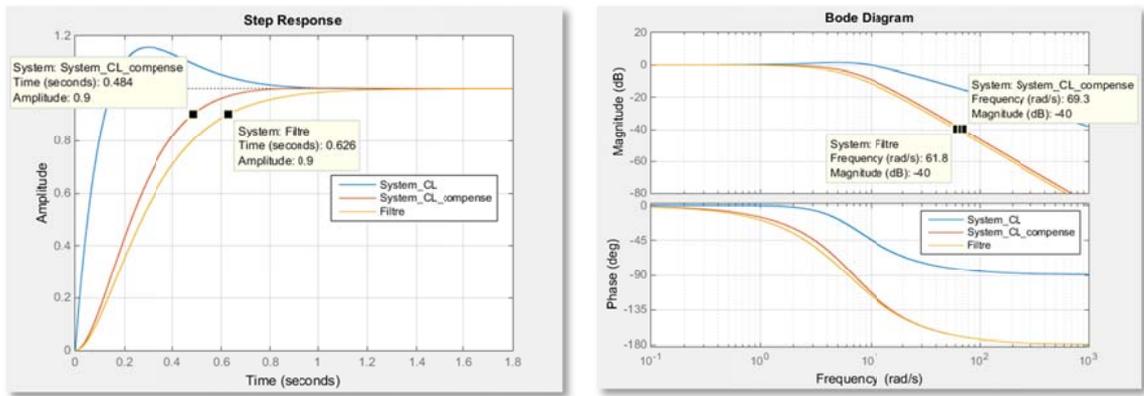


Figure 57 : Réponse indicielle et diagramme de Bode du système en boucle fermée sans compensation des zéros, avec compensation des zéros et du filtre

On constate sur la réponse indicielle que la compensation du zéro permet de supprimer le dépassement de la consigne. Toutefois, la courbe du système en boucle fermée avec compensation du zéro n'est pas superposée avec celle du filtre. La consigne est atteinte à 90% en 484 pour le système compensé et en 626ms pour le filtre. Cela correspond à une erreur de -22,68%. Cela ne pose pas de problème car le système est plus rapide que prévu et non l'inverse. Cela peut être dû à l'erreur sur la constante de temps obtenue lors de l'identification du système.

Le diagramme de Bode que le système compensé à une atténuation correcte de 40dB/dec. Toutefois, un léger décalage de 7,5 rad/s est constaté. Il est sûrement dû à l'identification du système comme pour la réponse indicielle. Cette erreur n'est pas importante et peut être négligée.

Cette régulation a été implémentée dans le DSP de la Boombox et un essai comparable à ceux réalisé en simulation a été effectué.

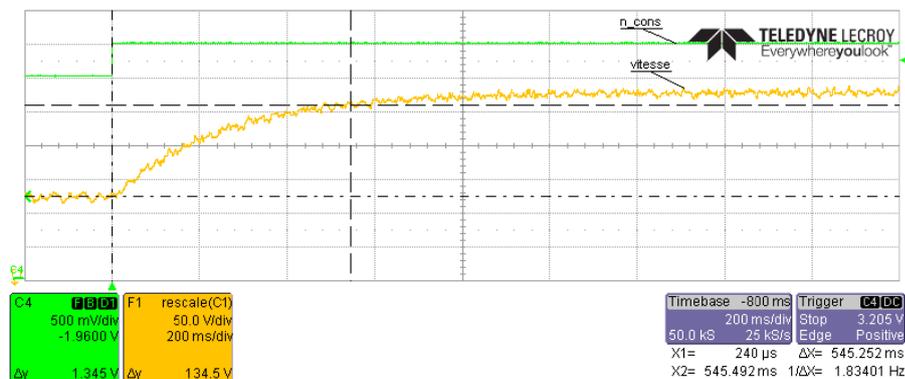


Figure 58 : Test de la régulation pour un saut de 900tr/min à 1050tr/min

La consigne est atteinte à 90% en 545ms. Cela correspond à une erreur de -12,9% par rapport au filtre. Cette erreur est en dessous de celle du système compensé simulé (-22,68%). Les résultats sont donc acceptés.

8.1.4 Mesure des courants

Les courants ont été mesurés à vitesse constante. À 900tr/min :

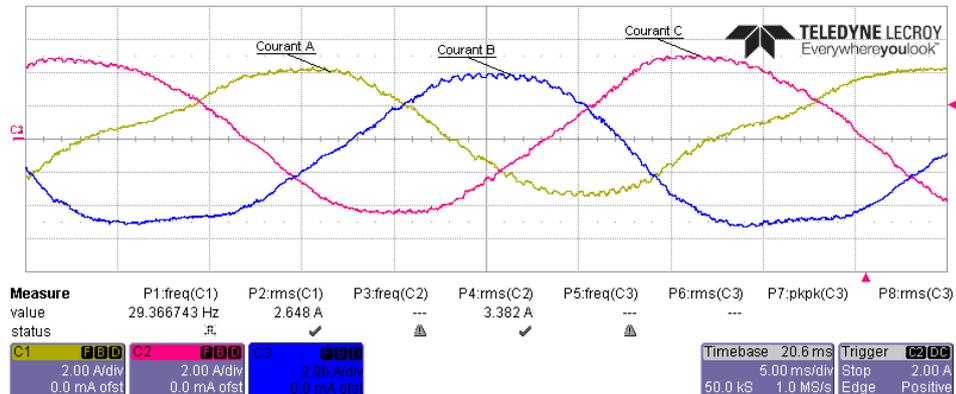


Figure 59 : Représentation des courants lorsque la MADA tourne à 900tr/min

La fréquence des courants à 900tr/min devrait être de 30Hz. On constate que la fréquence mesurée est de 29,37Hz. La fréquence est donc correcte.

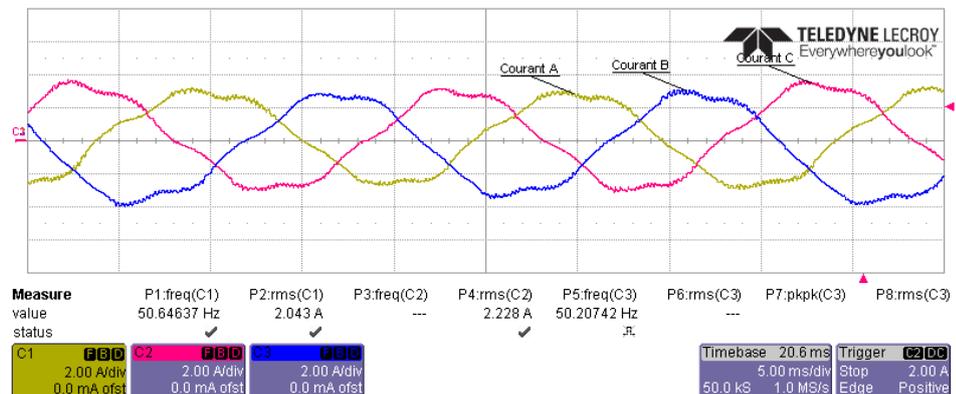


Figure 60 : Représentation des courants lorsque la MADA tourne à 1500tr/min

La fréquence des courants à 1500tr/min devrait être de 50Hz. On constate que la fréquence mesurée est de 50,64Hz. La fréquence est donc correcte.

8.1.5 Synchronisation

La synchronisation n'a pas pu être réalisée. À vitesse de synchronisme, il n'y a aucun courant au stator. Il est possible d'ouvrir le court-circuit mais il n'est pas possible d'ensuite synchroniser le réseau sur le stator. En effet, dans ce cas-là, la fréquence au stator serait de 50Hz et celle au rotor serait de 1500tr/min + 50Hz. Cela correspond à un glissement de 25Hz ; ce qui est beaucoup trop.

Après avoir ouvert le court-circuit au stator, il faudrait déconnecter l'alimentation du rotor puis ensuite synchroniser le stator et ensuite enclencher la régulation comme expliqué au chapitre 5.2. Toutefois, la régulation n'est pas encore terminée, cela est donc impossible.

Il serait possible de synchroniser le stator au réseau si le rotor est alimenté en courant continu comme une machine synchrone.

8.2 Mesure de la vitesse

La vitesse est calculée en fonction de la fréquence des sinus que fournit l'encodeur.

Une PLL permet de connaître la fréquence des signaux. Etant donné qu'il y en a 64 par tour, il faut diviser la fréquence que fournit la PLL par 64 pour connaître la fréquence du rotor en radians/seconde.

Le schéma selon lequel la PLL a été programmée est le suivant :

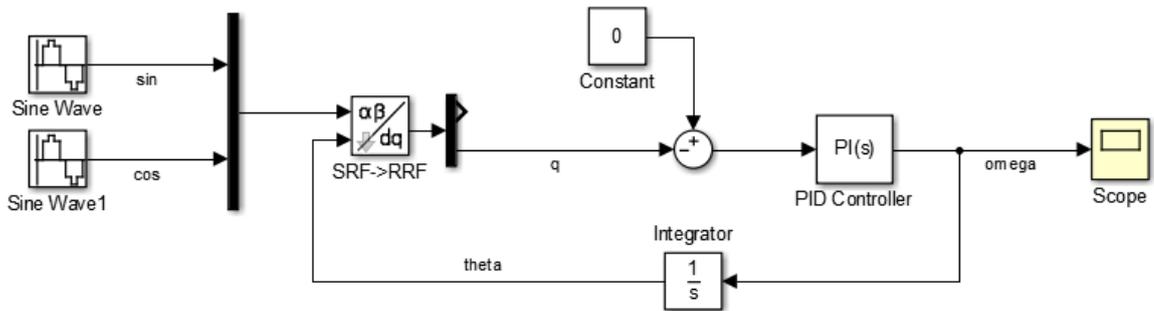


Figure 61 : Schéma du fonctionnement d'une PLL

Le paramétrage des gains du régulateur PI de la PLL a été fait expérimentalement.

- $K_p_pll = 2000$; $K_i_pll = 10$;

Les résultats des mesures de vitesses avec l'encodeur ont été comparés avec comme référence la vitesse affichée par le couplemètre Magtrol.

À vitesse nulle, on constate que la vitesse calculée n'est pas constante :



Figure 62 : Vitesse mesurée lorsque la MADA ne tourne pas

Des valeurs atteignant 0,135 tr/min sont mesurées. Cela est dû à la PLL. Ces résultats n'ont pas d'influence majeure sur le fonctionnement de la régulation, comme le montrent les tests réalisés par la suite.

Lorsque la consigne est une rampe de vitesse de 0 à 1500tr/min en 7,5 secondes, la courbe de la vitesse de consigne et celle de la vitesse mesurée sont quasiment superposées :

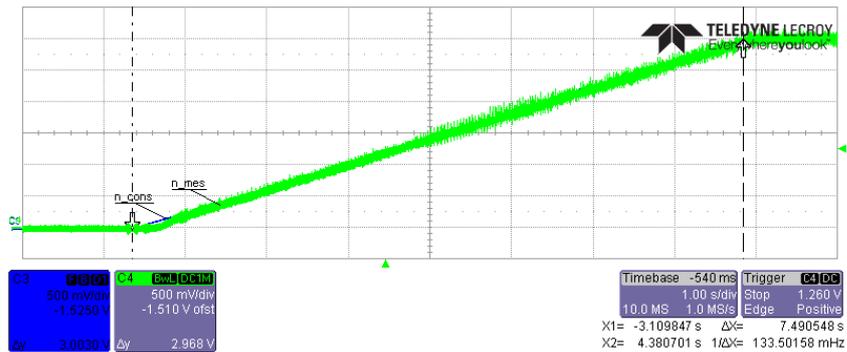


Figure 63 : Mesures de la vitesse de consigne et de la vitesse mesurée lors d'un démarrage en rampe en 7,5s

La décélération de 1500 à 0tr/min, en 3 secondes, ne montre qu'un léger retard entre la consigne et la mesure :

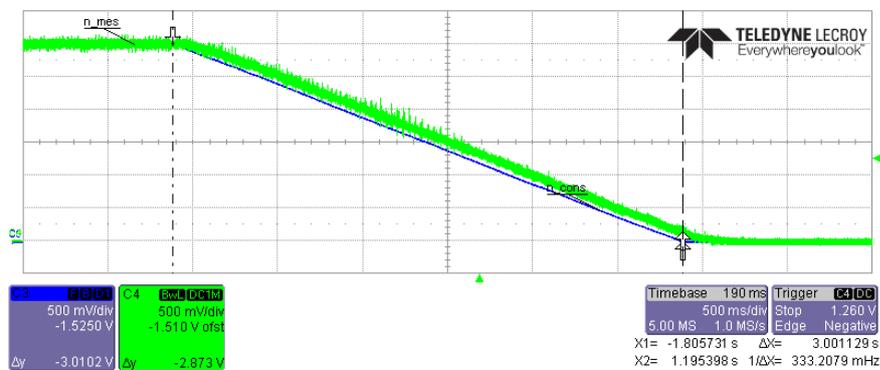


Figure 64 : Mesures de la vitesse de consigne et de la vitesse mesurée lors d'une décélération en 3 secondes

La régulation mise en place permet de changer le sens de rotation de la MADA comme le montre la figure suivante :

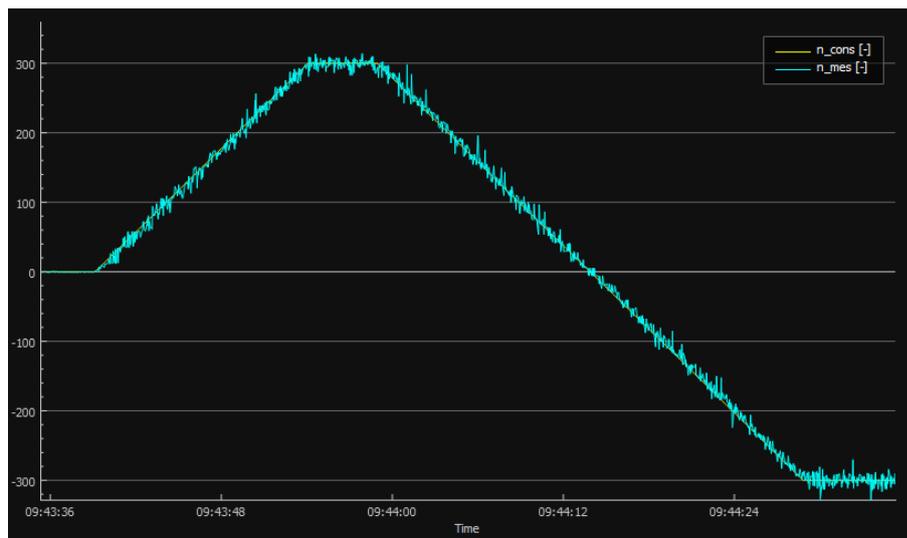


Figure 65 : Représentation d'un changement de vitesse de +300 à -300tr/min

On constate que les oscillations dues à la PLL sont toujours présentes.

8.3 Simulation de la régulation

Une simulation de la régulation de la MADA est nécessaire avant de faire les tests afin de confirmer la structure, les choix et les calculs réalisés.

8.3.1 Régulation d'une machine brushless

La structure de régulation que nous souhaitons réaliser a d'abord été implémentée sur une machine plus simple que la MADA, la machine brushless avec un convertisseur back-to-back. Une régulation de courant a été réalisée dans un système biphasé avec comme référentiel tournant la position du rotor. Les schémas de simulations Simulink ainsi que les résultats sont en annexe 10.

8.3.2 Transformation d,q

Une simulation est nécessaire afin de contrôler les valeurs obtenues lors de la transformation de Park sur le logiciel Matlab Simulink. Le système triphasé choisi est une source de tension triphasée comme le réseau. Le référentiel tournant est la fréquence du réseau. Afin de se conformer au référentiel choisi dans [15], la tension du réseau doit être sur l'axe direct. C'est-à-dire :

$$\hat{U}_{sd} = 325 \text{ V}$$

$$\hat{U}_{sq} = 0 \text{ V}$$

Le schéma Simulink utilisé pour tester cette transformation est le suivant :

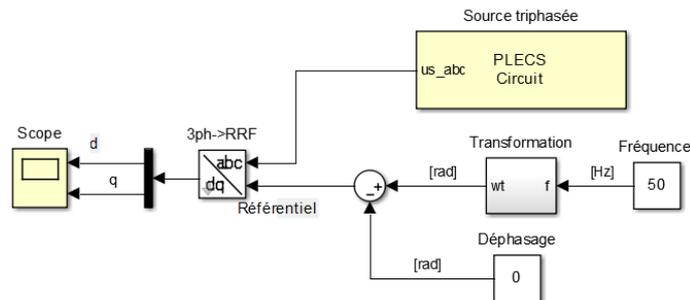


Figure 66 : Schéma Simulink du test de la transformation d,q

Il résulte du premier test effectué sans déphasage :



Il est donc nécessaire d'ajouter un déphasage de $-\pi/2$ afin de caler la tension sur l'axe d. Dans ce cas les résultats affichés sur le Scope sont les suivants :



8.3.3 Simulation de la régulation des courants au rotor

Avant de tester le schéma de régulation complet, une simulation avec uniquement la régulation des courants rotoriques a été réalisée. Vu qu'aucune régulation de vitesse n'est faite, la vitesse de la machine est maintenue à une vitesse constante par une source de vitesse.

Les tests ont montré qu'à 1400,1500 et 1600 tr/min la régulation se comporte comme attendu.

8.3.4 Simulation de la régulation complète

Le schéma complet de la régulation a été simulé. Le schéma montrant la structure de la simulation est en annexe 12.

Les conditions de test sont les suivantes :

- La vitesse initiale de la machine est la même que la vitesse demandée.
- La fréquence de commutation est de 1kHz afin que la simulation se réalise plus rapidement.
- Le bus DC est simulé par une source de tension continue de 100V.
- Les régulateurs ont été dimensionnés en per unit. Les mesures et les consignes doivent donc être normalisées. Les références de transformation sont les suivantes :
 - $U_N = 400 \text{ V}$
 - $I_N = 3,5 \text{ A}$
 - $S_N = 2300 \text{ VA}$
 - $f_N = 50 \text{ Hz}$

Il est possible de confirmer le fonctionnement de bon nombre d'éléments de la simulation :

- Les résultats des conversions DQ ont été testés.
- L'angle statorique Θ_s est calculé par une PLL depuis la tension du réseau. Les résultats varient entre 0 et 2π avec une fréquence de 50Hz comme le réseau. Les résultats sont donc bons.
- L'angle mécanique est la position du rotor.
- Les régulateurs ont le fonctionnement attendu.
- Le calcul de la puissance réactive a été testé et montre les résultats attendus.

Plusieurs éléments ne montrent pas les résultats attendus :

- Quelle que soit la vitesse demandée, le système se stabilise à la vitesse de synchronisme de la machine c'est-à-dire 1500tr/min. Les courants au rotor sont alors constants comme pour une machine synchrone.
- Les courants au rotor atteignent la consigne mais celle-ci est en saturation.
- Les courants au stator n'atteignent pas la consigne.

La figure ci-dessous représente les résultats d'un test de cette simulation avec comme consigne une puissance réactive de 0Var et une vitesse de 1550tr/min.

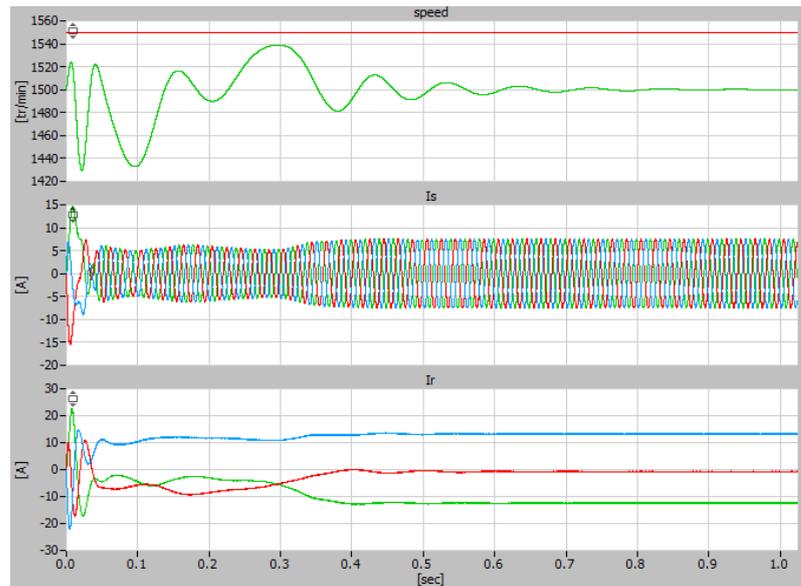


Figure 67 : Résultats de la simulation de la régulation pour une consigne de vitesse de 1550tr/min et de puissance réactive 0Var

On constate que, comme énoncé plus tôt, la machine se stabilise à 1500tr/min avec des courants continus au rotor.

Les tests suivants ont été réalisés afin de trouver les dysfonctionnements :

- La fréquence de commutation a été augmentée jusqu'à 20kHz.
- La machine a été stabilisée avec un couple résistant avant d'enclencher la régulation.
- La vitesse a été imposée par une source de vitesse. Les courants rotoriques atteignent la saturation. Les courants statoriques n'atteignent pas la consigne.

Les options suivantes peuvent être suivies afin de trouver les problèmes possibles :

- Les saturations des régulateurs ont été, pour le moment, choisies arbitrairement. Il faudrait les choisir avec des valeurs précises.
- Un calcul de toutes les valeurs dans un cas spécifique permettrait de contrôler les valeurs obtenues.

9 CONCLUSION

La machine asynchrone à double alimentation dans les installations de pompage-turbinage présente l'avantage de pouvoir fonctionner à vitesse variable. Un des avantages est que l'électronique de puissance ne voit qu'une fraction de la puissance nominale de la machine ce qui permet d'avoir un meilleur rendement et un coût plus faible en matériel.

La machine a été complètement caractérisée. Le bilan des puissances a ensuite pu déterminer la puissance du convertisseur SPRS nécessaire en fonction de la puissance désirée au stator et du glissement.

Le démarrage tension/fréquence fonctionne et a permis de prendre en main le matériel utilisé.

La structure de la régulation est en place malgré certains dysfonctionnements. Il est nécessaire qu'elle fonctionne complètement avant de passer à la vérification pratique.

La suite du projet consistera à terminer la simulation de régulation, mettre en place la synchronisation au réseau, développer le démarrage en mode turbine et créer la maquette du démonstrateur.

Sion, le 15 juillet 2016

Adrien Mottiez

10 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Wikipédia – Energie solaire photovoltaïque, consulté le 29 avril 2016
- [2] Shadya Gabathuler, Davide Pavanello et Cécile Münch, « Le pompage-turbinage : Figure 4, 5
- [3] Yves Pannatier, « Optimisation des stratégies de réglage d'une installation de pompage-turbinage à vitesse variable »
Thèse pour l'obtention du grade de docteur des sciences, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2010
- [4] Hans-Peter Biner, Dominique Roggo / Cours 18. Electronique industrielle et énergies renouvelables / 2013
- [5] François Avellan, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, Institut de génie mécanique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- [6] Le Monde, *La Belgique veut créer une île pour stocker l'énergie éolienne*, 2013.
<http://ecologie.blog.lemonde.fr/2013/01/24/la-belgique-veut-creer-une-ile-pour-stocker-lenergie-eolienne/> (Consulté le 14 mars 2016)
- [7] Lemonde.fr
- [8] Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Marko Schmidt, 2009
- [9] Fascicule FMHL : L'Hongrin : Balades hydroélectriques, www.fmhl.ch, Alpiq 2014
- [10] Panneau d'information de la nouvelle centrale de Veytaux, Alpiq.com
- [11] T.J.E Miller, « Theory of the Doubly-Fed Induction Machine in the Steady State » XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010, Rome, 2010
- [12] Xibo Yuan, « A converter-based starting method and speed control of doubly fed induction machine with centrifugal loads »
- [13] Y. Pannatier, B. Kawkabani, C. Nicolet, A. Schwery, J.-J. Simond, « Start-up and synchronization of a variable speed pump-turbine in pumping mode »
- [14] Hansruedi Bühler, Réglage de systems d'électronique de puissance – Volume 2 : Entraînements réglés
- [15] André Hodder, « Double-fed asynchronous motor-generator equipped with a 3-level vsi cascade », Thèse EPFL, 2004
- [16] Jean Chatelin, « Traité d'électricité, Volume X, Machines électriques » Ecole polytechnique de Lausanne publié sous la direction de Jacques Neiryck.
- [17] Impérix, Boombox – User manual
- [18] Regatron, Manual – TopCon TC.GSS
- [19] Zenone Elettronica Automazione Strumentazione, DC Power Sup-

plies AL3000 series User's manual

- [20] P. Barrade, « Electronique de puissance, méthodologie et convertisseurs élémentaires », Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 2006.
- [21] Baumer, Le fonctionnement et la construction des détecteurs ferromagnétiques
- [22] Baumer, Datasheet du capteur « Baumer_ITD49H00_DS_EN »
- [23] Recom-Power, Datasheet du convertisseur DC/DC « recom r-785.0-1.0 »
- [24] Impérix, Datasheet du capteur « IX-Modulink400V – isolated Voltage sensor module »
- [25] Impérix, Datasheet du capteur « IX-ModuLink15A - isolated Current sensor module »

Annexe 1 :
Installation existante
à Veytaux

4 groupes ternaires de 65 MW

Vitesse : 600min⁻¹

Rendement installation : 75%

La machine est une machine synchrone datant de l'année 1969.

Machine :

75'000kVA

9'500V

4'560 A

Fonctionnement générateur

Fonctionnement moteur :

Cosφ : 0,8 inductif

Cosφ : 0,925 capacitif

N emb. : 1100 t/min

N emb. : 760 t/min

Iexcitation : 860 A

Iexcitation : 770 A

La pompe est dite « pompe d'accumulation ». C'est une pompe à 5 étages. Elle dispose d'une petite turbine d'entraînement Pelton.

Pompe d'accumulation :

- *Fabriquant : Sulzer*
- *Débit : 6,05 - 7,02 m³/s*
- *Puissance absorbée : 57'890 - 60'470 kW*
- *Hauteur man. : 875,5 - 785,5 m*
- *Rendement : 90,95%*

Les groupes sont au-dessus du lac Léman. Une pompe de mise en charge est donc nécessaire à les alimenter avant l'enclenchement de la pompe d'accumulation afin d'avoir la pression nécessaire à l'ouverture de la vanne de sortie.

Pompe de mise en charge :

- *Fabriquant : Sulzer*
- *Type : Kaplan*
- *Débit : 6,05 - 7,02 m³/s*
- *Hauteur man, : 22,5 m*
- *Vitesse : 480 - 520 min⁻¹*
- *Puissance absorbée : 1'483 - 1'723 kW*

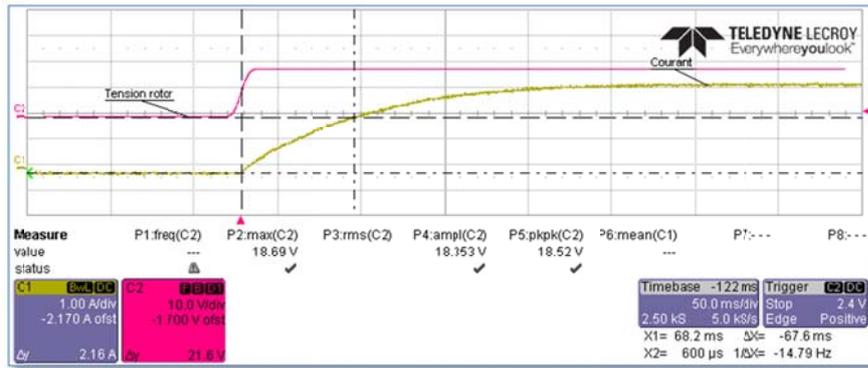
La turbine est une turbine Pelton composées de 2 roues disposant chacune de 2 jets. La hauteur de chute varie en fonction du lac ce qui fait varier la puissance. Celle-ci est donc ajustée grâce aux injecteurs de la turbine.

Turbine : Pelton

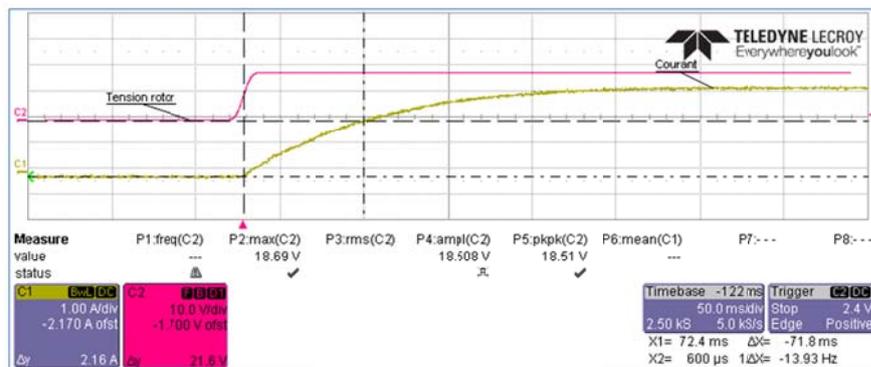
- *Fabriquant : ACMV*
- *Rendement : 89,5%*
- *Puissance : 60 MW*

Annexe 2 :

**Mesures de la
constante de temps
électrique du stator**

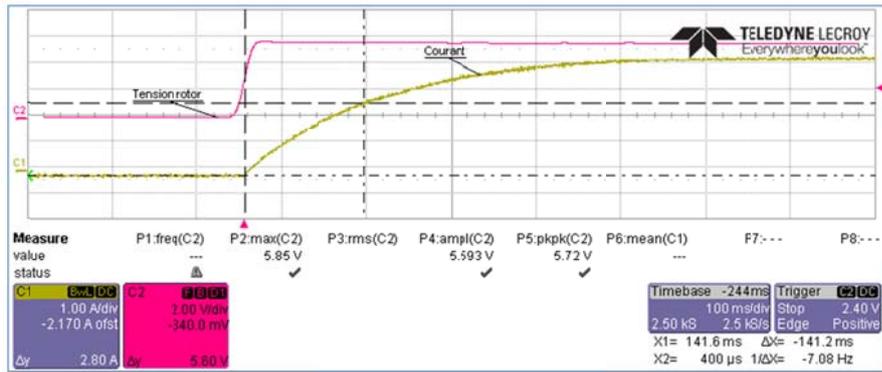


Mesure de la constante de temps électrique de la bobine V1-V2

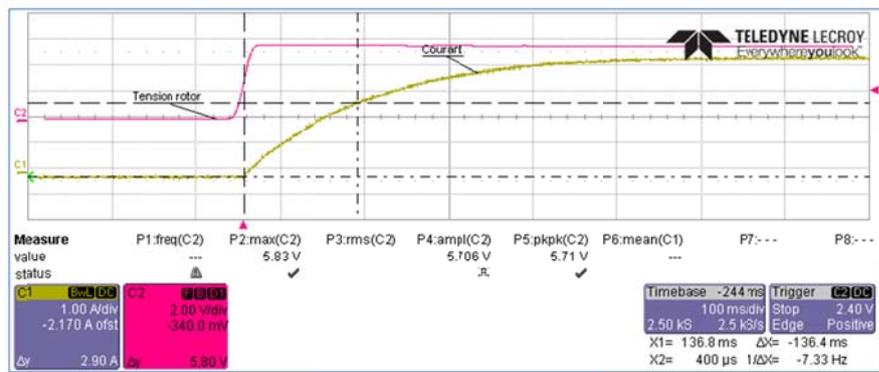


Mesure de la constante de temps électrique de la bobine W1-W2

Annexe 3 :
Mesures de la
constante de temps
électrique du rotor



Mesure de la constante de temps électrique de la bobine V-N



Mesure de la constante de temps électrique de la bobine W-N

Annexe 4 :
Mesures en essai à
vide

Pfr [W]
43

Mesures					Calculs					
Us [V]	n [tr/min]	Ptot [W]	Qtot[var]	Is0[A]	Pcu [W]	Ptot-Pcu [W]	Pfer [W]	Rfer [Ω]	Xh [Ω]	Lh [mH]
50	1384	50.9	129.71	0.64	7.9	43.0	0.04	70 071.4	19.27	61.4
75	1453	49.3	42	0.65	8.1	41.2	-1.81	-3 104.5	133.94	426.3
100	1476	48	64	0.47	4.2	43.8	0.76	13 180.9	156.26	497.4
125	1485	49	95	0.4	3.1	45.9	2.93	5 336.7	164.48	523.6
150	1490	56	136	0.6	6.9	49.1	6.09	3 696.0	165.45	526.6
175	1493	61.8	185	0.67	8.6	53.2	10.18	3 008.2	165.55	527.0
200	1495	65	240	0.75	10.8	54.2	11.20	3 571.6	166.68	530.5
225	1495	72	304	0.85	13.9	58.1	15.13	3 346.6	166.54	530.1
250	1496	77	382	0.93	16.6	60.4	17.39	3 593.4	163.62	520.8
275	1496	83	461	1.02	20.0	63.0	20.02	3 776.9	164.06	522.2
300	1497	90	555	1.16	25.8	64.2	21.16	4 252.7	162.17	516.2
325	1497	97	669	1.21	28.1	68.9	25.89	4 080.1	157.89	502.6
350	1497	107	781	1.32	33.5	73.5	30.55	4 010.6	156.86	499.3
375	1498	120	917	1.4	37.6	82.4	39.37	3 572.3	153.36	488.2
400	1498	130	1065	1.57	47.3	82.7	39.67	4 033.1	150.24	478.20

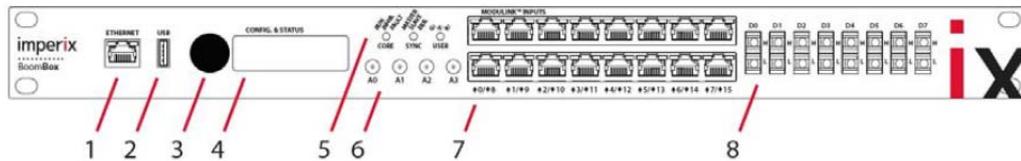
Annexe 5 :
Mesures de la tension
à vide

	n [tr/min]	\hat{U}_r [V]	fr mesuré [Hz]	s [-]	fr théorique [Hz]	U_r' [V]	\ddot{u} [-]	
ns [tr/min]	1300	25.3	6.7	0.13	6.67	139.5	1.65	
	1500	23.8	6.04	0.12	6.00	140.2	1.64	
Us [V]	1340	21.4	5.34	0.11	5.33	141.9	1.62	
	1360	18.8	4.6	0.09	4.67	142.4	1.61	
	230	1380	16.4	4	0.08	4.00	145.0	1.59
fs [Hz]	1400	14	3.33	0.07	3.33	148.5	1.55	
	1420	11.5	2.6	0.05	2.67	152.5	1.51	
	50	1440	7.9	1.95	0.04	2.00	139.7	1.65
	1460	5.1	1.31	0.03	1.33	135.2	1.70	
	1480	2	0.639	0.01	0.67	106.1	2.17	
	1500	1.2	-	0.00	-	-	-	
	1520	1.5	0.687	0.01	0.67	79.5	2.89	
	1540	3	1.35	0.03	1.33	79.5	2.89	
	1560	5.2	2.01	0.04	2.00	91.9	2.50	
	1580	10.5	2.6	0.05	2.67	139.2	1.65	
	1600	12.9	3.32	0.07	3.33	136.8	1.68	
	1620	15.68	4	0.08	4.00	138.6	1.66	
	1640	17.2	4.645	0.09	4.67	130.3	1.77	
	1660	18.65	5.3	0.11	5.33	123.6	1.86	
1680	21.5	6	0.12	6.00	126.7	1.82		
1700	25.22	6.65	0.13	6.67	133.7	1.72		

Annexe 6 :
Prise en main de la
Boombox

PANNEAU FRONTAL

Le panneau frontal de la Boombox est le suivant :

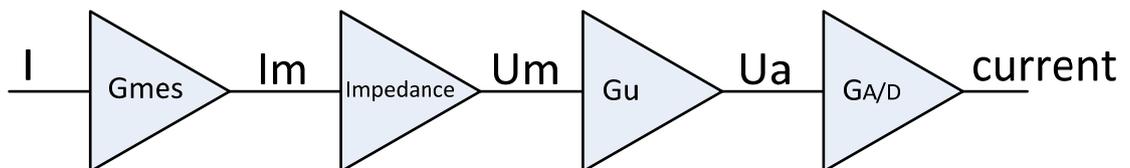


1. Port Ethernet
2. Port USB
3. Bouton rotatif et poussoir
4. Ecran LCD
5. LEDs système et utilisateur
6. 4 sorties analogiques de débogage
7. 16 entrées analogiques
8. Sorties PWMs analogiques (fibre optique)

CONFIGURATION DES ENTREES ANALOGIQUES

La première étape consiste à configurer les entrées analogiques sur lesquelles les capteurs sont connectés

La figure suivante présente la cascade de gain à compenser lors de la connexion d'une entrée analogique pour une mesure de courant par exemple.



G_{mes} : Gain du capteur de mesure

Impedance : Gain de l'impédance d'entrée de la Boombox

G_u : Gain de précision

$G_{A/D}$: Gain du convertisseur analogique/digitale

Deux configurations d'entrée analogique sont possibles. L'utilisateur a le choix entre une impédance d'entrée de 100 Ω ou 3k Ω . L'impédance de 100 Ω est à choisir lorsque le capteur délivre une mesure sous forme de courant. Elle permet d'obtenir une grandeur d'entrée en tension. L'impédance de 3k Ω est à choisir lorsque la mesure délivrée par le capteur est une tension.

- **Low impedance : YES/NO** si le paramètre est défini par YES l'impédance est de 100 Ω , si le paramètre est défini par NO l'impédance est de 3k Ω

Le gain de précision permet d'amplifier la valeur mesurée afin qu'elle soit la plus précise en fonction de la plage de mesure ($\pm 10V$). Le gain peut être de 1x, 2x, 4x ou 8x.

➤ $U_a = \text{gain} \cdot U_m$

Le gain du convertisseur analogique/digitale est de 32767/10 pour une plage de mesure de $\pm 10V$.

L'utilisateur peut définir deux limites de sécurité par canal de mesure : une limite haute et une limite basse. Lorsqu'une de ces deux limites est dépassée, un signal de défaut hardware apparaît et bloque l'application entière. Les deux paramètres à configurer sont :

- **Limit high** définit la limite haute de U_a
- **Limit low** définit la limite basse de U_a

STRUCTURE DU PROJET SOFTWARE

Le template du projet contient plusieurs dossiers. Ils sont organisés de la manière suivante :

- **API** contient des routines pré-écrites très utiles pour l'électronique de puissance. Ce dossier contient les fonctions PLLs, les régulateurs et les transformations de coordonnées.
- **Lib** contient le système d'opération précompilé de la Boombox.
 - **Includes** est un sous répertoire qui contient les prototypes des fonctions accessibles à l'utilisateur.
- **Linker_scripts** contient les fichiers dédiés au stockage mémoire. Ces fichiers ne doivent, en principe, pas être modifiés.
- **My_functions** contient 3 fichiers :
 - **User.h** contient les prototypes des fonctions prédéfinies pour l'utilisateur.
 - **User.cpp** est le fichier principal. Il contient la régulation et le paramétrage des PWMs.
 - La fonction **UserInit** n'est appelée qu'une fois au démarrage. C'est ici que sont configurés les régulateurs, les PWMs et les interruptions.
 - **UserInterrupt1** est l'interruption qui a la plus haute priorité. L'élément déclencheur doit être un des générateurs de fonctions configuré dans **UserInit**. C'est dans cette interruption que la routine de régulation est programmée. Le rapport cyclique des PWMs doit y être calculé. Une machine d'état est implémentée. Elle permet de faire fonctionner la Boombox dans différents modes. L'utilisateur peut, par le logiciel de commande, changer de mode.

CONFIGURATION DES PWMS

La Boombox permet de configurer 8 paires de signaux PWMs complémentaires.

Chaque paire de signaux PWM complémentaires possède sont propre modulateur PWM. Ils doivent être configurés en deux étapes :

- Configuration du générateur de fréquence

4 générateurs de fréquences sont disponibles et configurables. La période désirée est nommée **SWITCHING_PERIOD**.

```
SetFreqGenPeriod(0, (int)(SWITCHING_PERIOD/FPGA_CLK_PERIOD));
```

Le premier argument de la fonction est le générateur configuré (dans ce cas le #0). Le second argument est la période. Elle dépend du nombre de coups d'horloge correspondants sur une base de temps de 30Mhz. **FPGA_CLK_PERIOD** est une constante de précompilation (**#define**) définies dans **user.h**.

- Configuration du modulateur PWM

La ligne de code suivante permet de configurer la PWM avec le générateur de fréquence voulu, avec un signal de porteuse de forme triangulaire et avec un temps d'anti-chevauchement entre signaux de 300ns.

```
ConfigPWMChannel(0, 0, TRIANGLE, (int)(300e-9/FPGA_CLK_PERIOD));
```

L'instruction suivante permet d'activer les sorties PWMs correspondantes.

```
ActivatePWMChannel(0);
```

L'instruction suivante permet de désactiver les sorties PWMs correspondantes.

```
DeactivatePWMChannel(0);
```

DECOUPLAGE DES MESURES

Les transformations de Park se font grâce à une méthode disponible dans la librairie **transformations.cpp**.

La structure de la méthode faisant une transformation de Park est la suivante :

```
void abc2DQ0(SpaceVector *rotating, const TimeDomain *physical, const float theta)
```

La structure de la méthode faisant une transformation de Park inverse est la suivante :

```
void DQ02abc(TimeDomain *physical, const SpaceVector *rotating, const float theta)
```

REGULATEURS

Une fonction de régulateur PID est pré-écrite. Afin d'utiliser un régulateur, il faut d'abord le créer.

```
PIDController RotorCurrentActiveControl,
```

Le régulateur doit ensuite être paramétré. La méthode **ConfigPIDController** a comme arguments les gains, la période d'échantillonnage ainsi qu'une saturation.

```
ConfigPIDController(&RotorCurrentActiveControl, Kpr, Kir, 0, 10, -10, SAMPLING_PERIOD, 0);
```

Un appel de la fonction **RunIController** lance la routine d'un régulateur intégrateur ; **RunPIController** pour un régulateur PI et **RunPIDController** pour un PID.

```
float32 RunIController(PIDController* me, float32 error)
```

DEROULEMENT DE L'INTERRUPTION PRINCIPALE

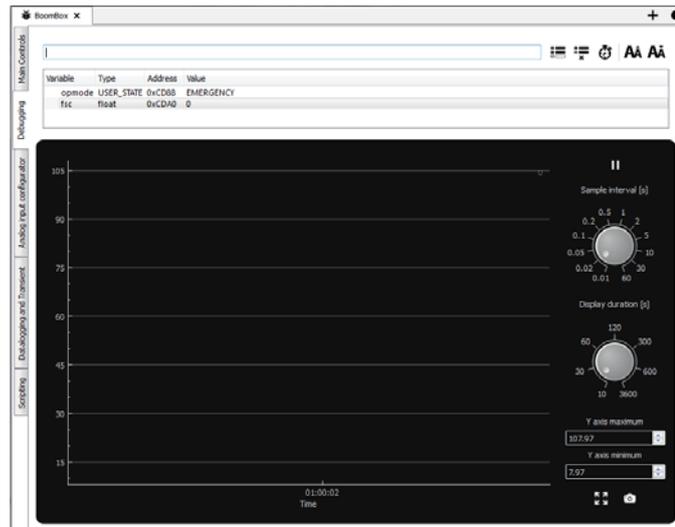
- 1) Récupération des mesures
- 2) Exécution des PLL
- 3) Switch en fonction du mode de fonctionnement désiré.
 - a. Standby :
 - b. Startup
 - c. Normal
 - i. Transformation de Park
 - ii. Exécution des algorithmes de réglage
 - iii. Transformation de Park inverse
 - iv. Calcul et mise à jour de la modulation
 - d. Shutdown
 - e. Emergency
- 4) Envoi des instructions de modulation aux modulateurs

UTILISATION DU LOGICIEL DE COMMANDE PAR L'UTILISATEUR

Le logiciel « Boombox Control » permet de contrôler la Boombox. Il affiche les informations fournies par la Bombox et offre les commandes principales de control :

- Enable/disable
- Arrêt d'urgence

Un pannel de débogage est disponible. Il est possible d'afficher les valeurs des variables sur un affichage analogique. Il est aussi possible de forcer la valeur des variables.



Le logiciel permet de configurer les entrées analogiques de la Boombox. La configuration peut ensuite être enregistrée sur une clé USB. Il faut ensuite connecter la clé USB sur la Boombox et sélectionner le menu « RestoreConfig ».

Ce logiciel est encore en phase bêta. Des erreurs peuvent intervenir.

DEFINITION D'UNE COMMANDE POUR L'UTILISATEUR

L'accès en ligne de commande offert par la Boombox au travers du logiciel Teraterm permet à l'utilisateur de passer des commandes indépendamment de l'interface de debug présente dans Code Composer Studio.

En plus du blocage/déblocage de la Boombox (commandes **enable/disable**), de nombreuses fonctions peuvent être définies librement par l'utilisateur. La définition des actions accessibles par la ligne de commande s'effectue dans le fichier **cli_commands.c**.

Un test effectué a été de définir la valeur d'une variable du programme. Cette fonction permet à l'utilisateur de définir la vitesse de consigne du système.

La configuration de cette commande se déroule comme suit.

La première étape est de récupérer la variable à modifier dans le fichier **cli_commands.c**.

```
extern float Speed_ref;
```

Il est ensuite nécessaire de prototyper la fonction choisie qui sera invoquer par la ligne de commande.

```
void SetSpeed(unsigned int argc, char *argv[]);
```

Associer les commandes avec les fonctions correspondantes. C'est-à-dire « inscrire » les fonctions définies ci-dessus parmi celles accessibles par ligne de commande. Pour ce faire, il est nécessaire d'ajouter dans la fonction LoadCLIUserFunctions() la ligne suivante :

```
fs_mkcmd_user("setspeed", SetSpeed);
```

Définir le contenu exact de la fonction. C'est-à-dire l'action qu'elle va effectuer. Dans notre cas, assigner à la variable speed la vitesse désirée.

```
void SetSpeed(unsigned int argc, char *argv[])
{
    if(*argv[1]=='?'){
        printf("\nSet the speed value (n).");
        printf("\nExample : setspeed 1500.0");
        return;
    }
    Speed_ref = atof(argv[1]);;
}
```

Il est ensuite possible d'utiliser la fonction depuis le logiciel de ligne de commande comme suit depuis le répertoire user.

```
user@boombox / >
user@boombox / > user
user@boombox /user > setspeed 1600.0
```

Annexe 7 :
Test des cartes
Impérix

Configuration

Le schéma de principe des mesures réalisées est le suivant :

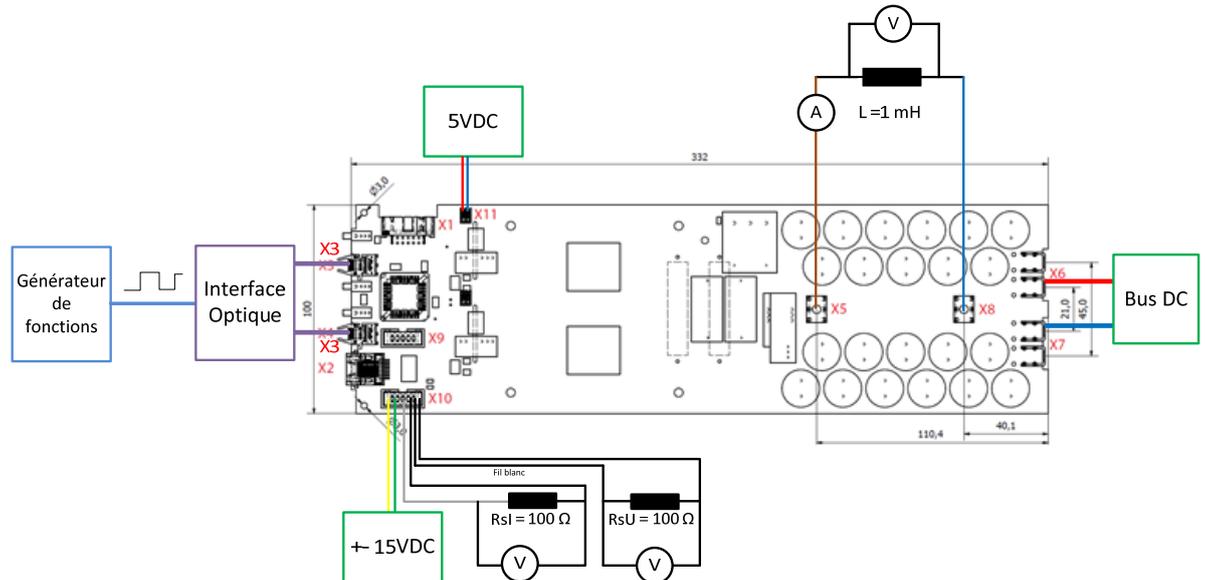


Schéma de principe du test d'un bras d'onduleur

Les connecteurs suivants ont été raccordés :

- X3 : Interrupteur supérieur du demi-pont (optique)
- X4 : Interrupteur inférieur du demi-pont (optique)
- X5 : Alimentation de sortie AC
- X6 : Alimentation DC+
- X7 : Alimentation DC-
- X8 : Point milieu du bus DC
- X10 : Pin1 : -15V
Pin2 : +15V
Pin3 : GND
Pin5 : Mesure de tension du bus DC
Pin6 : Mesure de courant
- X11 : Alimentation +5V et GND

Ventilateur

Un ventilateur est installé sur chaque carte. Il est de la marque Dynatron et c'est le modèle DB1270155BU-B. Il est alimenté par 4 fils :

- Jaune : VCC 12V
- Noir : Gnd
- Bleu : PWM
- Vert : Mesure de vitesse

Capteurs

Le modèle du capteur de courant est un LEM LAH50-P.

La mesure de courant se fait grâce à un rapport entre la tension mesurée sur une résistance de shunt R_{shuntI} et le courant que le capteur mesure selon le schéma suivant :

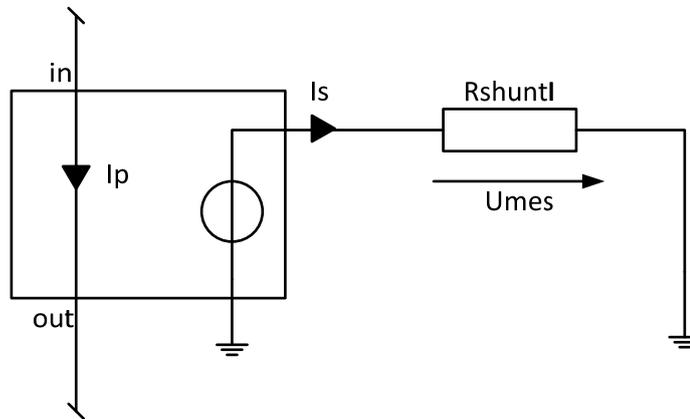


Schéma de mesure du capteur de courant LEM

Le rapport de transformation du capteur est $K_N = 1 : 2000$. La résistance de Shunt choisie selon le Datasheet est de 100Ω . On peut calculer le rapport de mesure :

$$\begin{cases} I_s = I_p \cdot K \\ U_{mes} = R_{shuntI} \cdot I_s \end{cases}$$

On obtient :

$$\frac{U_{mes}}{I_p} = R_{shuntI} \cdot K = 100'000 \cdot \frac{1}{2000} = 20$$

Le modèle du capteur de tension est un LEM LV25-P.

La mesure de tension se fait par un rapport entre la tension mesurée sur la résistance de shunt et la tension à mesurer, dans notre cas la tension du bus DC, selon le schéma suivant :

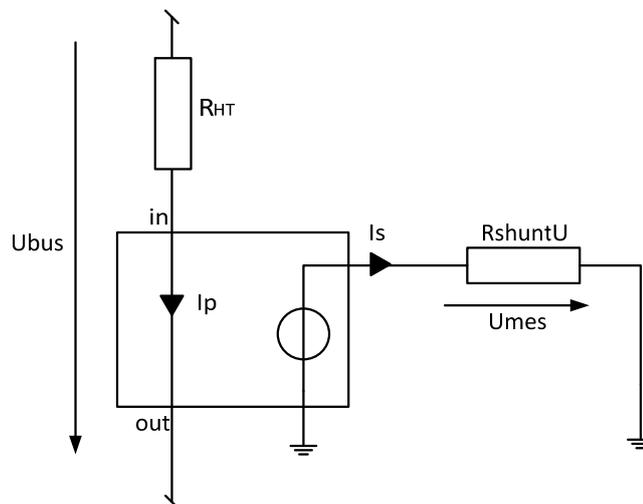


Schéma de mesure du capteur de tension LEM

Le rapport de transformation entre le courant mesuré et le courant fourni est $K_N = 2,5 : 1$. La résistance Shunt choisie et conseillée par le Datasheet est de 100Ω . On peut maintenant calculer le gain à régler sur l'oscilloscope :

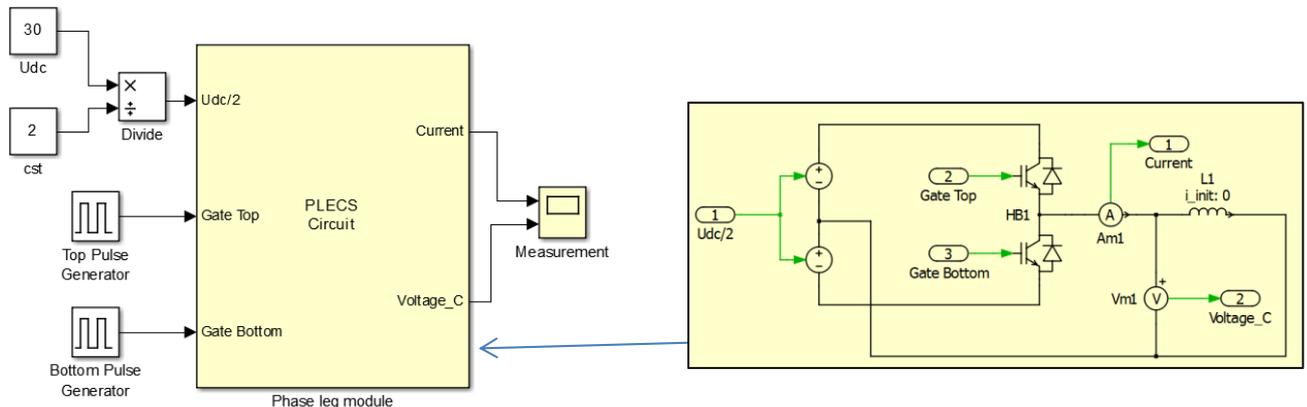
$$\left\{ \begin{array}{l} I_p = \frac{V_{Bus}}{R_{HT}} \\ I_s = I_p \cdot K \\ U_{mes} = R_{shuntU} \cdot I_s \end{array} \right.$$

On obtient :

$$\frac{U_{mes}}{U_{Bus}} = \frac{R_{shuntU} \cdot K}{R_{HT}} = \frac{100 \cdot 2,5}{100k} = 2,5 \cdot 10^{-3}$$

Simulation

La simulation sur Simulink qui a été mise en place est la suivante :



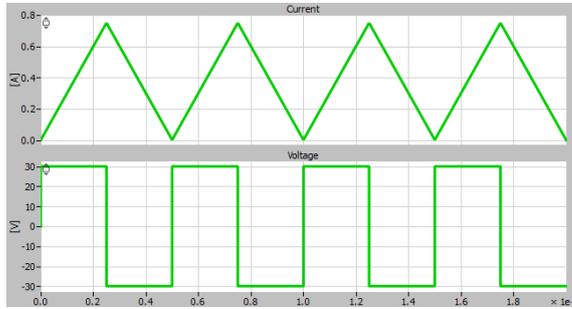
6 tests ont été réalisés :

- $F = 5\text{kHz}$, $U_{DC} = 60\text{V}$
- $F = 10\text{kHz}$, $U_{DC} = 60\text{V}$
- $F = 15\text{kHz}$, $U_{DC} = 60\text{V}$
- $F = 20\text{kHz}$, $U_{DC} = 60\text{V}$
- $F = 20\text{kHz}$, $U_{DC} = 50\text{V}$
- $F = 20\text{kHz}$, $U_{DC} = 40\text{V}$

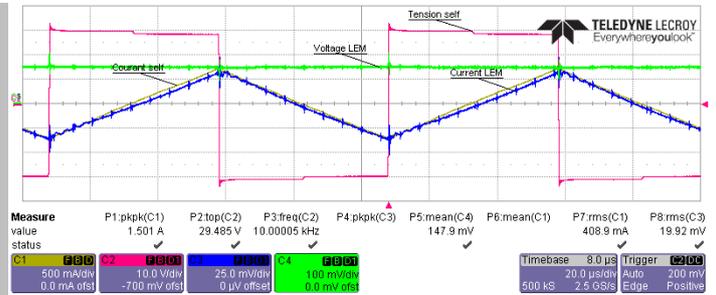
La forme des signaux mesurés est la même que pour la simulation. La seule différence est que le courant initial de la self dans la simulation est de 0A . Il n'oscille donc pas autour de 0A comme dans les mesures. Toutefois l'amplitude est correcte. Les mesures sont donc confirmées.

Conditions			Mesures							
F [kHz]	UDC [V]	F [kHz]	Tension Self [V]	Voltage LEM [mV]	Udcmes [V]	Erreur [%]	Courant Self [mA]	Current LEM [mV]	ImesLEM [mA]	Erreur [%]
5	60	4.999	59.596	147.7	59.08	-0.866	812.3	39.45	789	-2.868
10	60	10	58.97	147.9	59.16	0.322	408.9	19.92	398.4	-2.568
15	60	14.999	58.898	147.4	58.96	0.105	273.1	13.24	264.8	-3.039
20	60	20.001	58.652	147.7	59.08	0.730	204.6	9.71	194.2	-5.083
20	50	19.998	49.212	123.2	49.28	0.138	170.4	8.04	160.8	-5.634
20	40	19.949	39.898	100.4	40.16	0.657	136.1	6.98	139.6	2.572

Les courants mesurés sont des valeurs RMS.



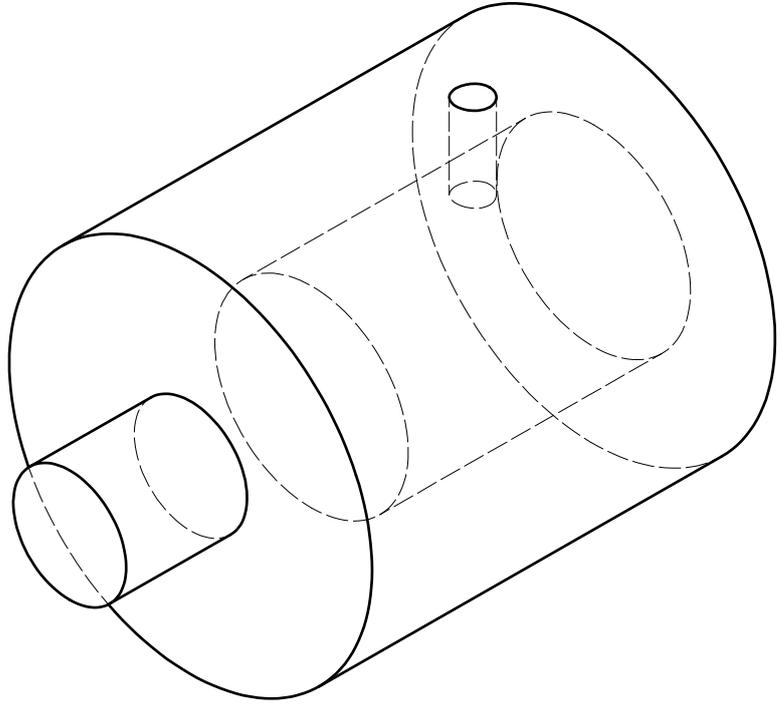
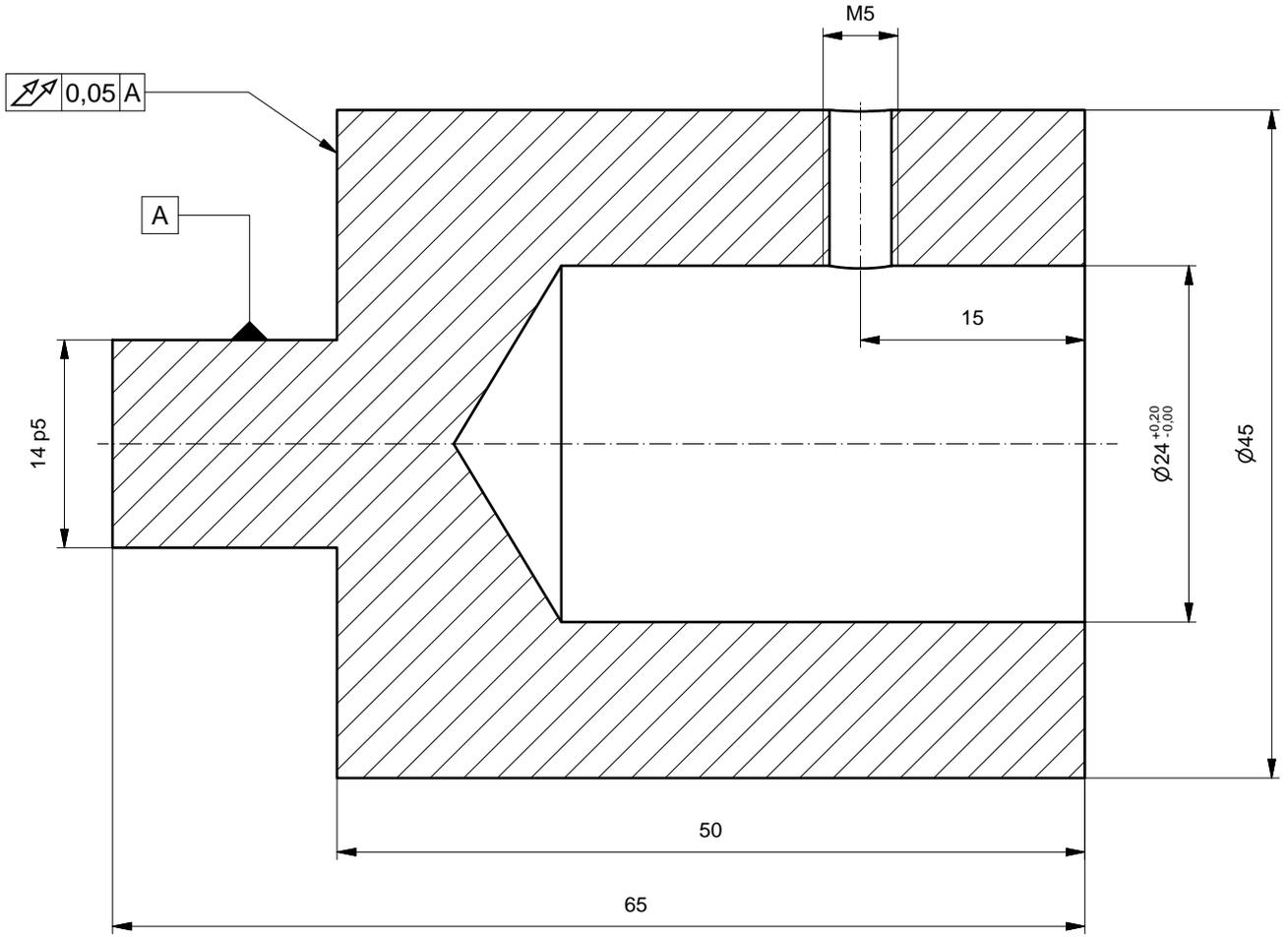
Résultats de la simulation pour F=20kHz et $U_{DC}=60V$



Capture d'écran de l'oscilloscope lors du test du bras d'onduleur F=10kHz, $U_{DC}=60V$

Annexe 8 :

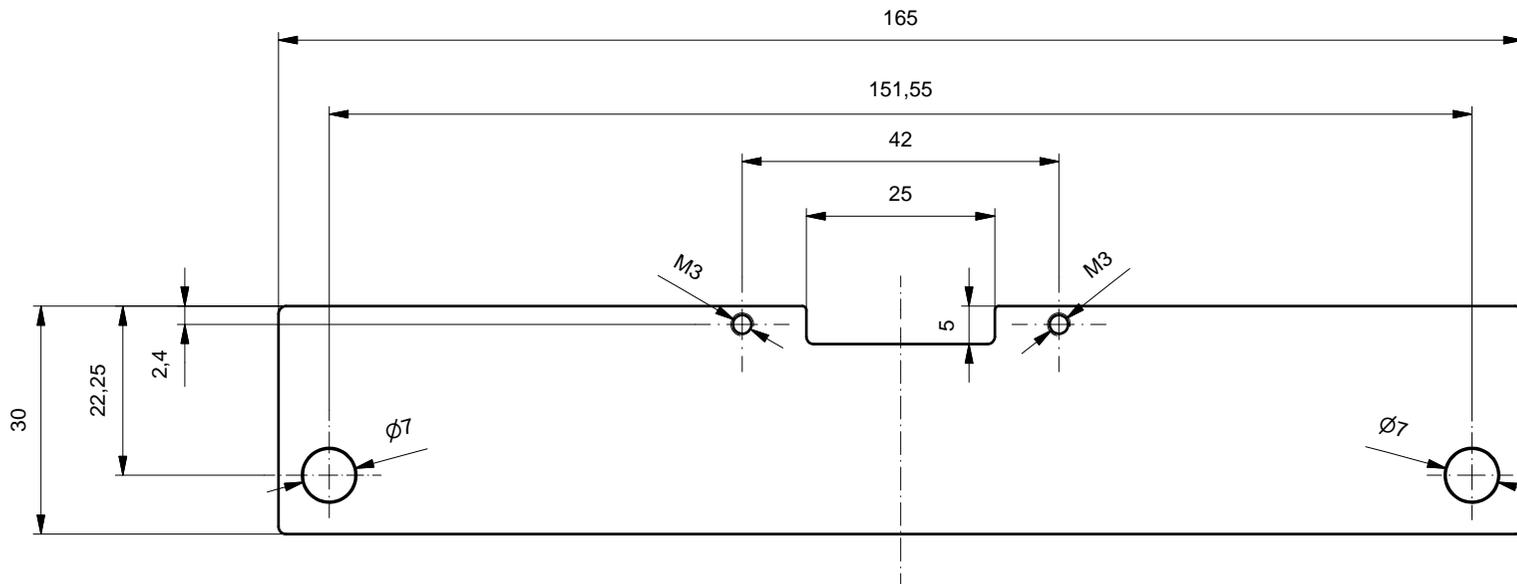
Pièces mécaniques



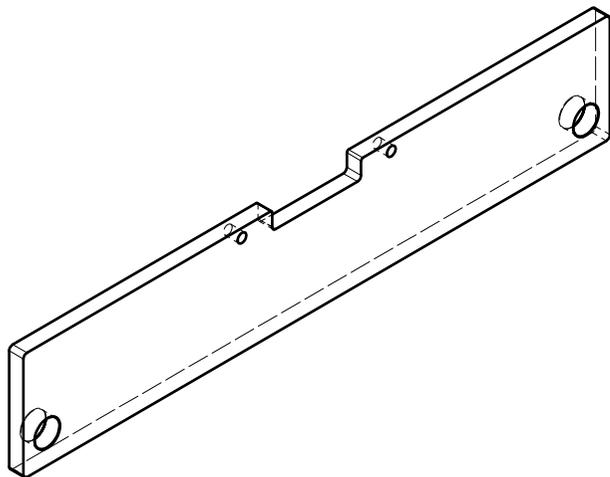
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale
1	1	Aluminium	

Accouplement pour encodeur de position Accouplement	Dessiné Gezeichnet	Mottiez Adrien	18.03.2016	Echelle Massstab 2:1
	Contrôlé Geprüft			

Fichier Y:\adrien.mottiez\PrS\Accouplement.idw
Datei



Epaisseur 4mm



1	1	Aluminium			
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale		
Support capteur de position Baumer			Dessiné Gezeichnet	uadmin	04.07.2016
Support pour Baumer ITD49H00			Contrôlé Geprüft		Echelle Massstab 1:1
Fichier Datei Y:\adrien.mottiez\PrS\Support.idw					
Hes-so VALAIS WALLIS				Pièce numéro 2	

Annexe 9 :

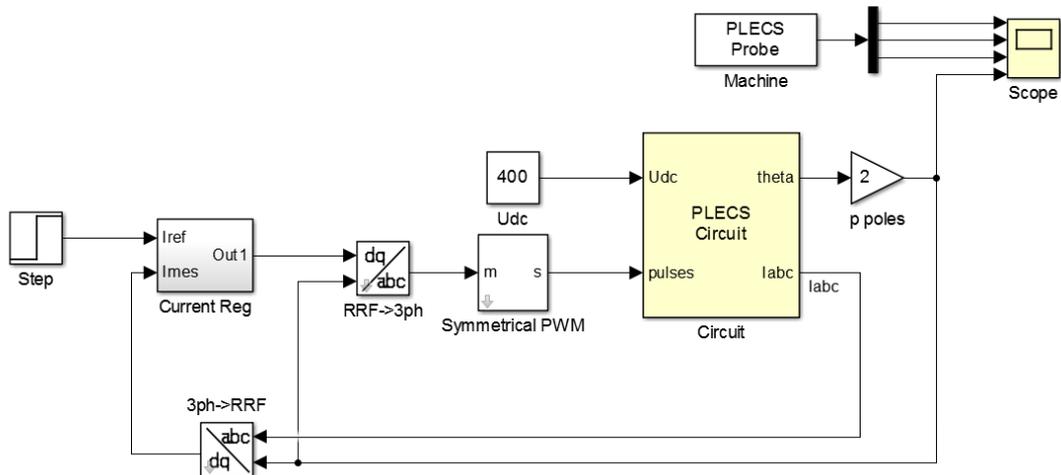
**Configuration des
entrées analogiques**

Analog Input	Name	Sensor	Gmes	Impedance	Gu	ADC gain
0	Bus DC carte A	LEM LV25-P	2.5/100000	100Ω	4	3.0519E-02
1	Courant rotor A	ACS709-1515007	7.08E-02	3kΩ	8	5.3880E-04
2	Courant rotor B	ACS709-1515008	7.08E-02	3kΩ	8	5.3880E-04
3	Courant rotor C	ACS709-1515009	7.07E-02	3kΩ	8	5.3956E-04
4	Courant stator A	ACS709-1515010	7.09E-02	3kΩ	8	5.3804E-04
5	Courant stator B	ACS709-1515011	7.20E-02	3kΩ	8	5.2982E-04
6	Courant stator C	ACS709-1515012	7.21E-02	3kΩ	8	5.2908E-04
7	Tension stator A	AMC1200-40015012	4.91E-03	3kΩ	8	7.7700E-03
8	Tension stator B	AMC1200-40015019	4.92E-03	3kΩ	8	7.7500E-03
9	Tension stator C	AMC1200-40015020	4.90E-03	3kΩ	8	7.7900E-03
10	Sin encodeur	Baumer ITD49H00	1.00E+00	3kΩ	4	7.6296E-05
11	Cos encodeur	Baumer ITD49H00	1.00E+00	3kΩ	4	7.6296E-05
12						
13						
14						
15						

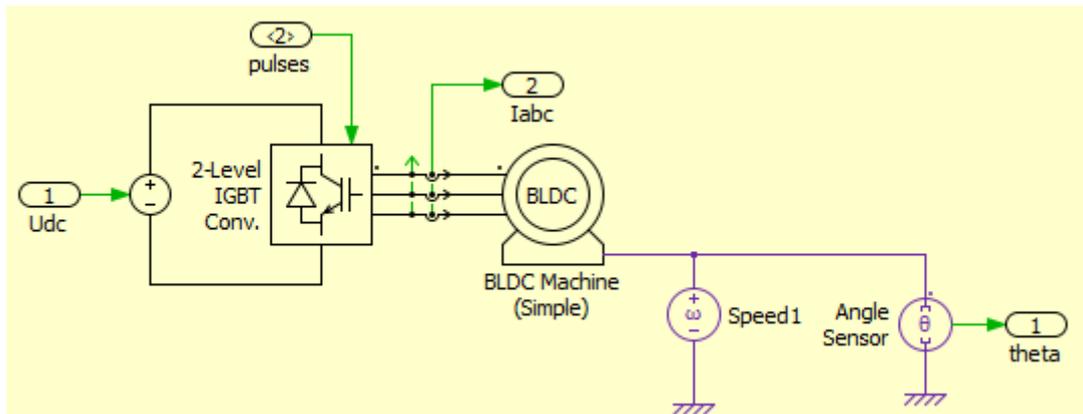
$$\text{ADC gain} = 1/(\text{Gmes} * \text{Impedance} * \text{Gu} * 3276/10)$$

Annexe 10 :
Régulation machine
brushless

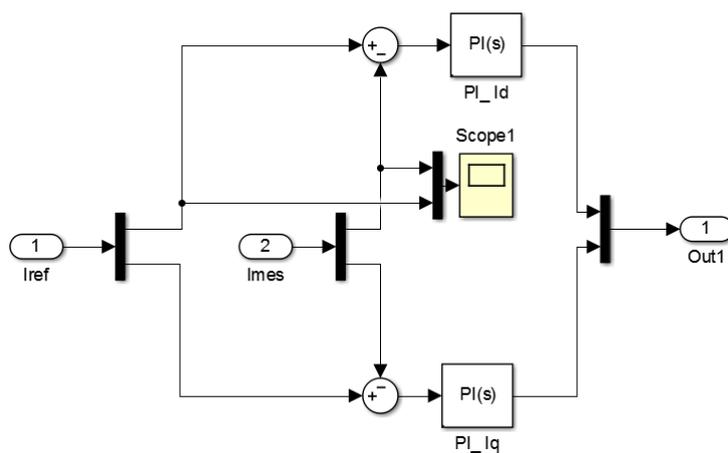
Le schéma de simulation de la régulation des courants d'une machine brushless contrôlée par un onduleur est le suivant :



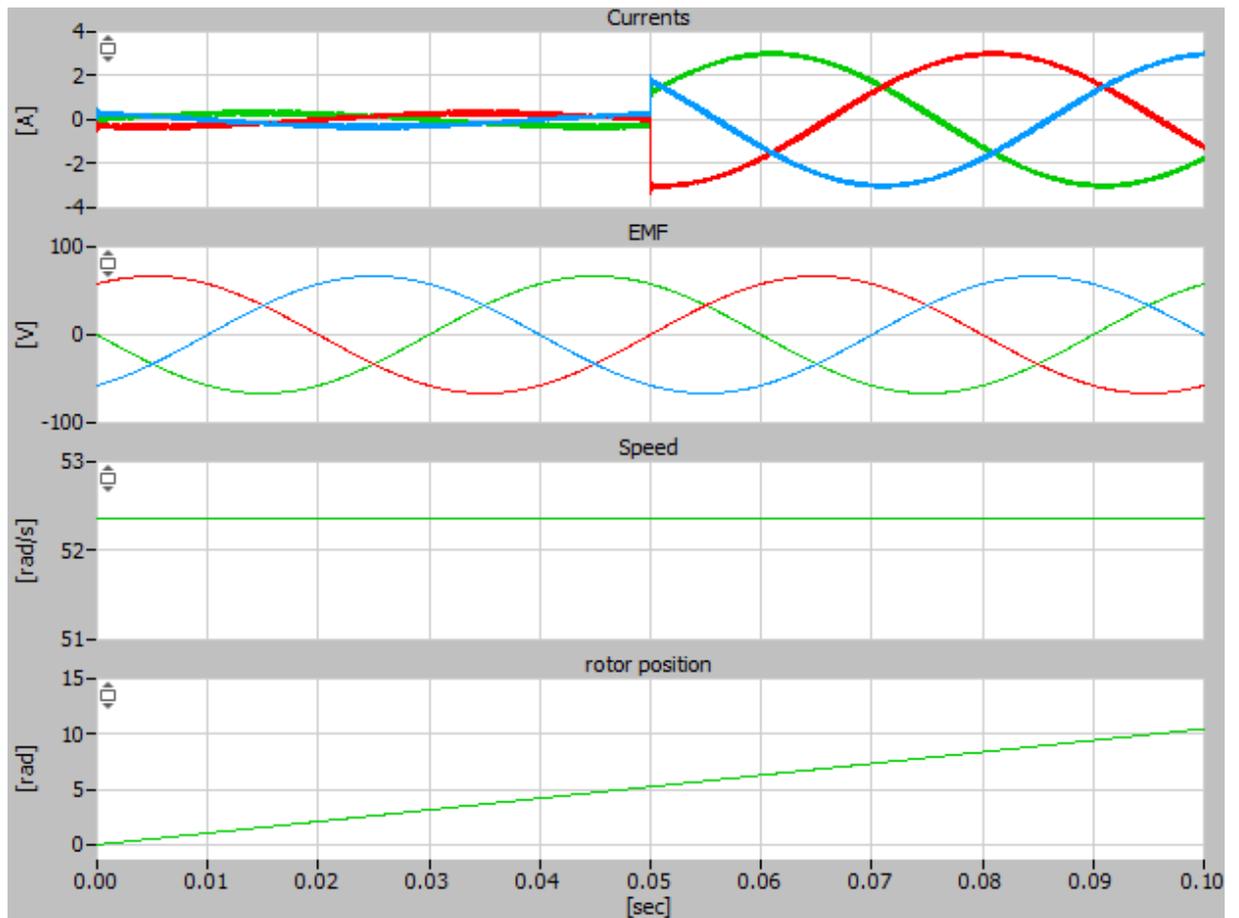
Le circuit régulé est le suivant :



Le régulateur est composé de deux PIs :



Lors des tests la vitesse est imposée par une source de vitesse. La consigne de courant est d'abord de 0A avant de passer à 3A après 0,05s. La figure suivante représente la mesure des courants, des tensions, de la vitesse et de la position du rotor de la machine brushless :

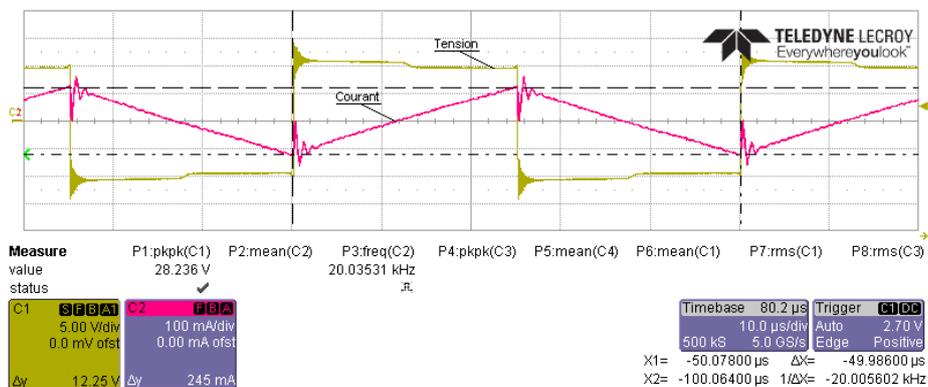


ALIMENTATION A RAPPORT CYCLIQUE FIXE D'UNE SELF

Un test réalisé a été d'alimenter une self avec une seule carte demi-pont d'onduleur commandée par la Boombbox. Les essais ont été confirmés avec une simulation sur Matlab Simulink

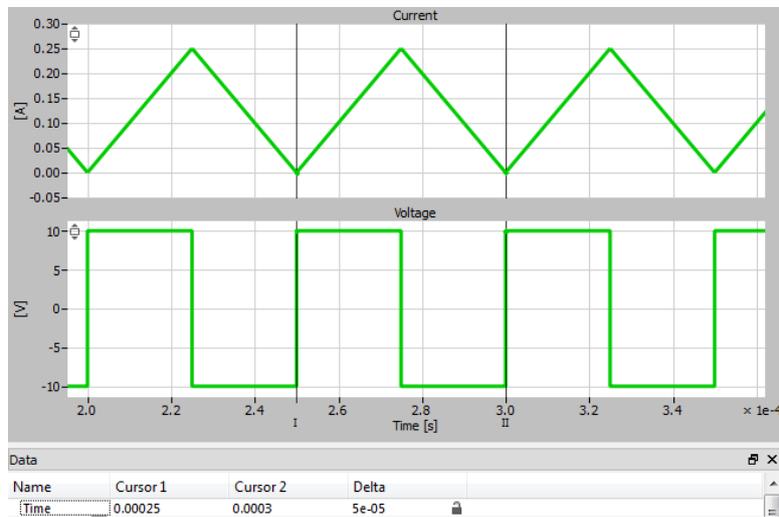
La tension du bus DC est de 20V et l'inductance a une valeur de 1mH. Le rapport cyclique imposé est constant et est de 0,5.

La figure suivante présente les mesures réalisées avec une sonde de courant et une sonde de tension différentielle sur la self.



On constate que la fréquence est de 20.03531kHz comme voulu. Le rapport cyclique est respecté et la tension est de $\pm 10V$ comme attendu.

La simulation a été réalisée avec le programme décrit lors du test de l'onduleur. Les résultats sont les suivants.



Les résultats de la simulation confirment les mesures.

Annexe 11 :

Code du DSP pour le

démarrage U/f de la

MADA

```
/*
 * @title    User-level main file: To be continued
 * @author   Adrien Mottiez
 * @file     user.c
 * @comment  Core functions require that this file implements at least these functions :
 *          USER_SAFE UserInit(void)
 *          void UserError(int code);
 */

#include "Driver/peripherals.h" // Available DSP peripherals
#include "Core/interrupts.h" // Interrupt-related routines
#include "user.h" // This file's header.
#include <cmath>
#include "../API/controllers.h" // The regulators
#include "../API/transformations.h" // The park transformations
#include "../API/PLLs.h" // The PLL
#include "math.h" // The maths operations
/**
 * Global variables
 */
USER_STATE opmode = STANDBY;
USER_STATE next_opmode = STANDBY;

bool start_ramp = false;
float G_ramp = 100.0; // Gain of the ramp of acceleration and deceleration

// Initials value for the regulation
float fsc = 0.0; // Frequency of the stator
float frc = 0.0; // Frequency of the rotor
float Angle_sc = 0.0; // Angle of the phase
float Urc=0.0; // Voltage of the rotor phase

float y_old = 0.0;
float n_cons_old = 0.0;

float n_cons = 0.0; // Speed consigne
float n_cons_ramp = 0.0; // Speed consigne for the ramp
float n_mes= 0.0; // Spead measure

float Duty_A = 0.0; // Duty cycle of the phase A
float Duty_B = 0.0; // Duty cycle of the phase B
float Duty_C = 0.0; // Duty cycle of the phase C

float Uphase1 = 0.0;
float Uphase2 = 0.0;
float Uphase3 = 0.0;

// initialisation of the variables for the measures
float Udc = 0.0; // Voltage of the bus DC
float Ira = 0.0; //Current of the phase A of the rotor
float Irb = 0.0; // Current of the phase B of the rotor
float IRC = 0.0; //Current of the phasee C of the rotor

float A_enc, B_enc; // Channels of Encoder
// variables for the PLL
float omega=0.0;
float theta=0.0;
```

```

float Kp_pll = 2000.0;
float Ki_pll = 10.0;
float Uenc_d = 0.0;
float Uenc_q = 0.0;

// Variables for the regulators
PIDController Regulateur; // Regulator of the constant Volt/Hertz control

USER_SAFE UserInit(void)
{
    // 1 kHz switching frequency on frequency generator #0:
    SetFreqGenPeriod(0, (int)(SWITCHING_PERIOD/FPGA_CLK_PERIOD));

    // Channel #0 is mapped to frequency generator #0 with a triangular carrier and a 300 ns
    deadtime:
    ConfigPWMChannel(0, 0, TRIANGLE, (int)(300e-9/FPGA_CLK_PERIOD)); // To define duty on
    first pair
    ConfigPWMChannel(1, 0, TRIANGLE, (int)(300e-9/FPGA_CLK_PERIOD)); // To define
    duty on second pair
    ConfigPWMChannel(2, 0, TRIANGLE, (int)(300e-9/FPGA_CLK_PERIOD)); // To define
    duty on second pair

    // Channel #0 is configured with a phase of zero with respect to the frequency generator:
    SetPWMPhase(0, 0.0); // For the Buck converter
    SetPWMPhase(1, 0.33); // For the pre-charge circuit
    SetPWMPhase(2, 0.66); // For the pre-charge circuit

    // Per defaults, all PWM channels are deactivated:
    DeactivatePWMChannel(0); // Rotor A
    DeactivatePWMChannel(1); // Rotor B
    DeactivatePWMChannel(2); // Rotor C

    /*****
    * Configuration of the ADC channels
    * -----
    * - The full-span resolution is 16bits corresponding to [-10V;+10V]
    * - Software gains and offset adjustments can be applied using the function
    * SetADCAdjustments(channel, gain, offset) for calibration purposes.
    *****/

    // Analog input #0 with default gain and offset
    SetADCAdjustments(0, 0.030519, 0.0); // For DC Bus
    SetADCAdjustments(1, 538.8e-6, 0.0); // Current rotor A
    SetADCAdjustments(2, 538.8e-6, 0.0); // Current rotor B
    SetADCAdjustments(3, 539.56e-6, 0.0); // Current rotor C
    //SetADCAdjustments(4, 538.04e-6, 0.0); // Current stator A
    //SetADCAdjustments(5, 529.82e-6, 0.0); // Current stator B
    //SetADCAdjustments(6, 529.08e-6, 0.0); // Current stator C
    //SetADCAdjustments(7, 7.77e-3, 0.0); // Voltage stator A
    //SetADCAdjustments(8, 7.75e-3, 0.0); // Voltage stator B
    //SetADCAdjustments(9, 7.79e-3, 0.0); // Voltage stator C
    SetADCAdjustments(10, 7.6296e-5, 0.0); // A channel encoder
    SetADCAdjustments(11, 7.6296e-5, 0.0); // B channel encoder

    // Configure UserInt1 on the PWM channel #0
    RegisterExt1Interrupt(&UserInterrupt1, 0, 0.0, 0);

```

```

// The sampling is configured in the middle of the switching period of channel #0:
ConfigSampling(0, 0.5);
// Configure the controllers
ConfigPIDController(&Regulateur, Kp, Ki, 0.0, 1.0, -1.0, SAMPLING_PERIOD,0);

/*****
 * User-defined initialization routines
 *****/
opmode = STANDBY;           // Initialize the application to its STANDBY state
return SAFE;               // Return 0 if no error
}

/**
 * First user-level interrupt service routine.
 */
USER_SAFE UserInterrupt1(void)
{
    // Local variables
    float err; // error of the regulator
    float y;
    float omega_prev; // for the PLL

    static float erreur = 0.0;

    // Get the measurement
    Udc = GetADC(0);           // Voltage of main DC bus
    Ira = GetADC(1);           // Rotor current of the phase A
    Irb = GetADC(2);           // Rotor current of the phase B
    IRC = GetADC(3);           // Rotor current of the phase C
    A_enc = GetADC(10);        // Sin encoder
    B_enc = GetADC(11);        // Cos encoder

    // Speed calculation with a PLL
    erreur = erreur + Ki_pll*Uenc_q;
    if (erreur>=20000.0)
        erreur = 20000.0;
    if (erreur<=-20000.0)
        erreur = -20000.0;
    omega_prev = omega;
    omega = Kp_pll*Uenc_q+erreur;

    theta = theta+SAMPLING_PERIOD/2.0*(omega_prev+omega);
    if (theta>=2.0*PI)
        theta = theta-2.0*PI;

    Uenc_d = A_enc*cos(theta)+B_enc*sin(theta);
    Uenc_q = -A_enc*sin(theta)+B_enc*cos(theta);

    n_mes = omega/2.0/PI/64.0*60.0;           // Speed in [tr/min]

    // Calcul the angle of the phases
    Angle_sc = Angle_sc+2.0*PI*frc/SWITCHING_FREQUENCY;
    if (Angle_sc>=(2.0*PI))
        Angle_sc = Angle_sc-2.0*PI;

    // Switch depending on the operation mode (state machine)
    switch (opmode){

```

```

case STANDBY: // Typ: used as long as the user doesn't start the converter
    DeactivatePWMChannel(0);
    DeactivatePWMChannel(1) ;
    DeactivatePWMChannel(2);
    next_opmode = STANDBY;
break;

case STARTUP: // Typ: used to progressively energize the application

    next_opmode = STARTUP;
break;

case NORMAL: // Typ: used during normal operation
    ActivatePWMChannel(0);
    ActivatePWMChannel(1);
    ActivatePWMChannel(2);

if(start_ramp == true){
    if(n_cons < n_cons_ramp){
        n_cons = n_cons + SWITCHING_PERIOD*G_ramp;
    }
    if(n_cons > n_cons_ramp){
        n_cons = n_cons - SWITCHING_PERIOD*G_ramp;
    }
    if(n_cons == n_cons_ramp){
        n_cons = n_cons_ramp;
    }
}

// Zero compensation
y = beta*y_old + alpha * n_cons_old;
n_cons_old = n_cons/60.0 ;
y_old = y ;

err= y - n_mes/60.0;
// Regulator
fsc = RunPIController(&Regulateur,err);
frc = fsc + n_mes/60.0*p ;
Urc = frc * 230.0/50.0;
Uphase1 = Urc *sin(Angle_sc);
Uphase2 = Urc *sin(Angle_sc - 2.0*PI/3.0);
Uphase3 = Urc *sin(Angle_sc - 4.0*PI/3.0);

//Saturations
if (Udc>=2.0)
{
    Duty_A = 0.5+Uphase1/Udc;
    Duty_B = 0.5+Uphase2/Udc;
    Duty_C = 0.5+Uphase3/Udc;
}
else
{
    Duty_A = 0.5+Uphase1/2.0;
    Duty_B = 0.5+Uphase2/2.0;
    Duty_C = 0.5+Uphase3/2.0;
}

```

```

    if (Duty_A>=0.98)
        Duty_A = 0.98;
    if(Duty_A<= 0.02)
        Duty_A = 0.02;

    if (Duty_B>=0.98)
        Duty_B = 0.98;
    if(Duty_B<= 0.02)
        Duty_B = 0.02;

    if (Duty_C>=0.98)
        Duty_C = 0.98;
    if(Duty_C<= 0.02)
        Duty_C = 0.02;

    // Update the PWMs
    SetPWMDutyCycle(0, Duty_A);
    SetPWMDutyCycle(1, Duty_B);
    SetPWMDutyCycle(2, Duty_C);

    next_opmode = NORMAL;
    break;

case SHUTDOWN: // Typ: used to properly de-energize the application (safe shutdown)
    next_opmode = SHUTDOWN;
    break;

case EMERGENCY: // Typ: used during emergency shut down
    DeactivatePWMChannel(0);
    DeactivatePWMChannel(1);
    DeactivatePWMChannel(2);
    next_opmode = EMERGENCY;
    break;
}

//Update the modulators :
UpdatePWMData();

SetOpMode(next_opmode); // Switch to the next state
return SAFE; // Return a SAFE status (or UNSAFE otherwise)
}

/**
 * First user-level interrupt service routine.
 */
USER_SAFE UserInterrupt2(void)
{
    return SAFE;
}

/*
 * This routine aims to handle critical errors by requesting an appropriate answer at the
 * user level.
 * Typically, the application should be blocked and the core will wait for manual clearing
 * of the error.
 */

```

```
void UserError(ERROR_SOURCE source)
{
    opmode = EMERGENCY;           // Typically used to de-energize the application
}

/*
 * This routine is responsible for changing the mode of operation, when possible and
 * applicable
 */
void SetOpMode(USER_STATE newmode)
{
    if (1){                       // If the transition is allowed (may not always be the case)
        opmode = newmode;
    }
}
```

```
#ifndef USER_H_
#define USER_H_

#include "DSP28x_Project.h"           // Headers for C28346
#include "extern_user.h"             // Corresponding pre-compiled header

#define beta 0.9996
#define alpha 0.0004
#define p 2 // nombre de paire de poles
#define Kp 1.2356
#define Ki 4.8286

/**
 * Pre-computed general constants
 */
#define PI (3.141592654)
#define TWOPI (2*PI)

/**
 * Readability helpers
 */
#define FREQGEN0 (0)
#define FREQGEN1 (1)
#define FREQGEN2 (2)
#define FREQGEN3 (3)

#define BBOX0 (0)
#define BBOX1 (1)
#define BBOX2 (2)

/**
 * Time-related definitions
 */
#define SWITCHING_FREQUENCY (20e3) // Apparent switching frequency
#define SWITCHING_PERIOD (1/SWITCHING_FREQUENCY) // Switching period
#define SAMPLING_PERIOD (1/SWITCHING_FREQUENCY) // Sampling and control period (dsp)
#define SAMPLING_PERIOD_US (1/SWITCHING_FREQUENCY*1e6) // Same thing in microseconds...
#define FPGA_CLK_PERIOD (33.33e-9) // 30Mhz -> 33.3ns

/**
 * Modes of operation for the user-level application
 * These definitions apply to the user state machine
 */
typedef enum {
    STANDBY =0,
    STARTUP =1,
    NORMAL =2,
    SHUTDOWN =3,
    EMERGENCY =4
} USER_STATE ;
```

```
/**
 * First user-level interrupt service routine.
 * Remember that it has the highest level of priority when mapped to Ext1, intermediate when
 * mapped to Ext2 and lowest when mapped to the CPU Timer.
 * @param void no parameters
 * @return SAFE or UNSAFE depending on whether the user wants to trigger the blocking
 of the application or not
 */
USER_SAFE UserInterrupt1(void);

/**
 * First user-level interrupt service routine.
 * Remember that it has the highest level of priority when mapped to Ext1, intermediate when
 * mapped to Ext2 and lowest when mapped to the CPU Timer.
 * @param void no parameters
 * @return SAFE or UNSAFE depending on whether the user wants to trigger the blocking
 of the application or not
 */
USER_SAFE UserInterrupt2(void);

/**
 * Routine to change the operation mode of the application
 * It is highly recommended to personalize this routine to comply with application-related
 needs
 * @param opmode the new mode of operation
 * @return void
 */
void SetOpMode(USER_STATE opmode);

/**
 * The following prototypes are already defined in the pre-compiled library (extern_user.h)
 * They do not need to be specified here
 */
// USER_SAFE UserInit(void)
// void UserError(int code);

#endif /* USER_H_ */
```

Annexe 12 :
Simulation de la
régulation

