

# Conception d'un banc d'essai pour génératrice d'éolienne de petite puissance.

Ing. A. LAMBERT  
Ir V. KELNER  
GRAMME – Liège

*Cet article présente la réalisation d'un banc d'essai permettant d'effectuer divers tests sur un prototype de génératrice à aimants permanents de 3 kW. Il est pensé pour que des conditions de vent réelles puissent être simulées au prototype et ce, en fonction des caractéristiques de l'éolienne. L'article met en évidence les concepts éoliens théoriques nécessaires à la conception mécanique et électrique du banc d'essai, les logiques de contrôle via un PLC et un variateur de fréquence et les premiers essais exécutés dans l'optique de vérifier les fonctionnalités du banc d'essai et d'apporter des pistes d'amélioration.*

*Mots-clefs : énergie renouvelable, éolienne, conception, banc d'essai, génératrice à aimants permanents, variateur de fréquence, PLC.*

*This paper presents the design of a cost-effective test bench able to apply different tests to an innovative 3 kW permanent magnet generator prototype. This test bench is designed to simulate real wind conditions testing applied to the prototype with regard to the wind turbine characteristics. The paper put emphasis on the theoretical wind concepts necessary for both mechanical and electrical design of the test bench, the control logic via a PLC and an inverter drive, and the first basic testing carried out in order to verify the test bench specifications and to bring up ideas for improvements.*

*Keywords : renewable energy, wind turbine, design, test bench, permanent magnet generator, inverter drive, PLC.*

## 1. Introduction

Afin d'élargir sa famille de produits, l'entreprise FuturEnergy Ltd. (Stratford-upon-Avon, UK), met actuellement au point une éolienne de 3kW. Dans ce but, l'entreprise développe un prototype innovant de génératrice à aimants permanents permettant une haute efficacité tout en réduisant les coûts de fabrication.

Le sujet du travail de fin d'études consiste en la conception et la construction d'un banc d'essai pour cette génératrice. Dans un premier temps, la solution choisie permettra la récupération et la vérification de la plupart des caractéristiques de performance de la génératrice. Ensuite, la solution devra permettre la simulation de conditions réelles de vent auxquelles la génératrice devra faire face une fois assemblée dans la future éolienne (comprenant un rotor et un système de contrôle adaptés).

Cet article offre une vision concise de l'approche suivie afin d'offrir une solution idéale, alliant économie et efficacité, au problème posé. Il s'articule en trois sections principales.

La première section fournit au lecteur quelques éléments théoriques et généraux concernant l'énergie éolienne et plus particulièrement les éoliennes de petite puissance. La deuxième section développe la démarche suivie en vue de la conception d'un banc d'essai tel que recommandé par un cahier des charges. Enfin, une troisième partie aborde brièvement les débuts d'étude d'un prototype de génératrice et répond à la nécessité de validation de la conception.

## 2. L'énergie éolienne

### 2.1. Aérodynamique

Une éolienne est le siège de deux types de transformation d'énergie : la première est celle de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et la seconde la conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique. La première transformation fait l'objet de cette section.

Les aspects aérodynamiques des éoliennes expliquent leur capacité à interagir avec la source d'énergie, le vent. Par conséquent, les performances d'une éolienne sont tributaires des interactions entre le vent et le rotor, le transformateur d'énergie.

La puissance extractible du vent peut être estimée grâce à la « théorie du disque actif ». Ci-après est développée une méthode simplifiée du modèle afin d'approcher la puissance théoriquement contenue dans le vent.

Soit une éolienne idéale balayant une surface  $S$  sous un vent de vitesse  $V_I$  et dont la densité de l'air vaut  $\rho$ . Pendant un temps infinitésimal  $dt$ , la masse d'air déplacée à une vitesse  $V_I$  passe à travers un cylindre de longueur  $V_I dt$  et de base  $S$ .

L'expression de la masse d'air est donc :

$$m = \rho S V_1 dt$$

L'énergie contenue dans cette masse d'air vaut :

$$E = \frac{1}{2} m V_1^2$$

Finalement, la puissance théorique disponible dans le cylindre est obtenue en combinant les deux équations précédentes :

$$P_{th} = \frac{E}{dt} = \frac{1}{2dt} \rho S V_1 dt V_1^2 = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (1)$$

## 2.2. La limite de Betz, $C_P$ et $\lambda$

Albert Betz démontra que la puissance mécanique qui peut être extraite d'un flux d'air est limitée à une fraction maximale de la puissance totale théoriquement contenue dans ce même flux. Cette portion, connue sous le nom de limite de Betz, a été déterminée à  $16/27$ , soit 59%.

En pratique, aucun système mécanique actuel ne peut extraire même 59% de la puissance théorique disponible dans le vent. Le coefficient de performance ou  $C_P$  définit l'efficacité d'une éolienne spécifique dans des conditions opérationnelles spécifiques. Typiquement, le  $C_P$  maximal qu'une éolienne moderne peut atteindre se situe entre 30 et 45% selon le type et la puissance.

En fait, dû à des phénomènes aérodynamiques, le  $C_P$  d'une éolienne d'aujourd'hui à axe horizontal est fonction du paramètre  $\lambda$ , appelé « *vitesse spécifique* ». Comme son nom l'indique en anglais<sup>1</sup>, ce paramètre est le rapport entre la vitesse linéaire du bout d'une pale et la vitesse du vent, c'est-à-dire :

$$\lambda = \frac{\omega * R}{v} \quad (2)$$

où

- $\omega$  = la vitesse de rotation de l'éolienne (rad/s),

---

<sup>1</sup>  $\lambda$  = Tip Speed Ratio

- $R$  = le rayon de la surface balayée (m), et
- $v$  = la vitesse du vent (m/s).

Le lien qui existe entre  $\lambda$  et  $C_P$  dépend entièrement de la conception du profil de pale. Ainsi, pour une éolienne donnée, il y a toujours une *vitesse spécifique*  $\lambda$  optimale pour laquelle le *coefficient de performance*  $C_P$  est maximal. Autrement dit, pour cette même éolienne et pour une vitesse de vent observée, il existe une vitesse de rotation déterminable qui permet d'atteindre un coefficient de performance maximal.

L'intérêt de la courbe  $C_P - \lambda$  réside également dans la limitation de puissance absorbée lorsque le vent souffle fort, ceci dans le but de protéger le générateur et le système de conversion contre des puissances électriques trop élevées qui leurs seraient fatales. Dans les grandes éoliennes, cette limitation est réalisée au moyen d'un contrôle de pitch des pales qui modifie leur angle d'attaque et donc leur efficacité.

### 2.3. Technologies des petites éoliennes

#### *Générateur*

Dans les éoliennes de petite puissance, on retrouve très généralement une génératrice à aimants permanents (PMG) pour ses multiples avantages. Tout d'abord, parce que le rotor est fait d'aimants qui produisent le champ magnétique, il n'y a pas de circuit d'excitation et donc pas de pertes joules au rotor.

Ensuite, une PMG ne nécessite pas de boîte de vitesse entre le rotor de l'éolienne et la génératrice. Dans le passé, il a été établi qu'environ 19% des temps d'arrêt des alternateurs d'éolienne étaient dus à un problème de boîte de vitesse [5]. Une éolienne avec une PMG offre donc une plus haute fiabilité, moins de temps d'arrêt et nécessite une maintenance réduite. En contrepartie, pour éliminer l'utilisation d'une boîte de vitesse, les PMG ont un plus grand nombre de pôles et sont donc physiquement plus grandes que leurs équivalents à boîte de vitesse. [2]

Les éoliennes à PMG fonctionnent généralement à vitesse variable. Cette technologie se distingue de celle des éoliennes traditionnelle à générateur asynchrone. Ce dernier type de générateur fût longtemps et est encore utilisé à vitesse fixe (ex : 1500 tr/min) afin d'être compatible avec un réseau de fréquence fixe (ex : 50 Hz). [2]

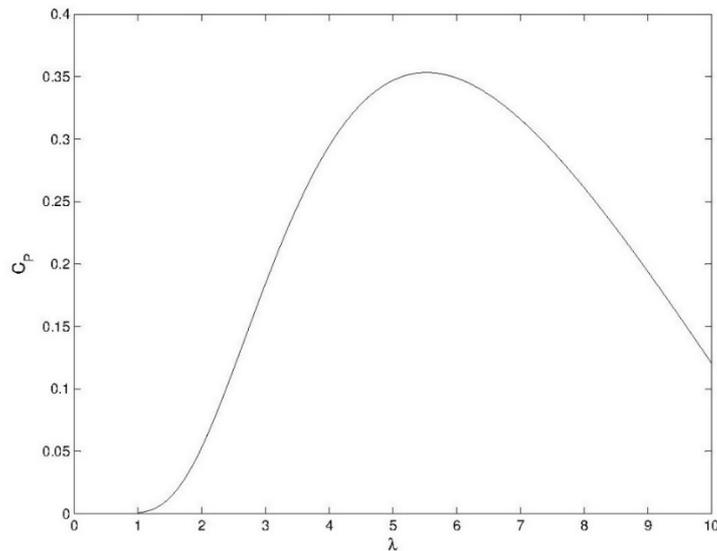
Lorsque que l'éolienne est dite à vitesse variable, comme celle à PMG, elle ne peut être directement connectée au réseau électrique. En effet, la PMG utilisée à vitesse variable produit une tension alternative variable à fréquence variable. Cet inconvénient est résolu en convertissant le courant alternatif en courant continu. La puissance peut alors être soit consommée par des charges DC (ex. chargement d'une batterie) soit, grâce au développement de l'électronique, reconvertie en courant alternatif mais cette fois de tension et fréquence fixes (ex. 230V – 50Hz). [1]

### ***Eolienne à régulation par décrochage aérodynamique***

Contrairement aux éoliennes de grande puissance, la régulation par pas variable des pales (pitch control) et la régulation par décrochage aérodynamique (stall control) sont toutes deux des stratégies utilisées dans le petit éolien [4]. La régulation par pas variable des pales trouve d'abord son utilité dans le maintien d'une vitesse de rotation fixe nécessaire au fonctionnement des éoliennes traditionnelles [3] et ensuite dans la limitation de puissance.

La régulation par décrochage est souvent rencontrée pour sa simplicité et robustesse. En effet, les pales ayant un pas fixe, cette technique ne requiert aucune articulation de pale qui est souvent source de panne. Son but est la limitation de puissance capturée lorsque l'excès de puissance contenue dans le vent serait dommageable au matériel électrique. En effet, la puissance du vent étant proportionnelle au cube de la vitesse, les puissances en jeu pour des vents forts augmentent très rapidement.

La régulation par décrochage aérodynamique fonctionne grâce au phénomène de réduction de la portance aérodynamique pour un grand angle d'attaque, ce qui a pour effet de diminuer le couple aérodynamique lorsque la vitesse du vent augmente. Pratiquement, cette régulation est réalisée en ajustant la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent afin d'atteindre une *vitesse spécifique*  $\lambda$  souhaitée. Par ce moyen, le point de fonctionnement de l'éolienne sur la courbe  $C_P$ - $\lambda$  (cf. fig. 1) est contrôlé de telle manière que la partie de puissance du vent capturée le soit aussi.



*Figure 1: Courbe du coefficient de performance  $C_P$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  pour une éolienne tripale; courbe utilisée pour les considérations de dimensionnement du banc d'essai*

L'avantage majeur de ce dernier type de régulation est l'assurance de fonctionner pratiquement toujours soit à coefficient de performance maximal soit à puissance maximale. L'inconvénient est qu'en réalité, l'inertie du rotor doit être prise en compte car elle modifie la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Lorsque le rotor accélère, une partie de la puissance aérodynamique est utilisée pour cette accélération et se retrouve sous forme d'énergie cinétique du rotor. Lors d'une décélération du rotor, cette énergie cinétique accumulée va être fournie en décalage à la génératrice. Ce phénomène est pris en compte en sur-dimensionnant légèrement la génératrice et le convertisseur.

### **3. Conception du banc d'essai**

#### **3.1. Objectifs et cahier des charges**

Pour rappeler au lecteur, le but ultime du banc d'essai est de soumettre un prototype de génératrice à aimants permanents à des conditions simulées de vent. Cependant, le premier objectif est d'exécuter des tests de base permettant la validation de conception de la génératrice et/ou l'amélioration de ses performances.

Le banc d'essai doit répondre aux recommandations principales du cahier des charges suivantes :

- il doit être réalisé au moyen d'un moteur électrique ;
- il doit être pratique et avoir un bon rapport qualité-prix ;
- il ne peut impliquer un capteur de couple (trop coûteux).

#### **3.2. Considérations préliminaires**

Afin de concevoir le système moteur qui appliquera soit une vitesse donnée, soit un couple donné à la génératrice, les caractéristiques de fonctionnement de cette dernière doivent être discutées. En effet, la question de départ de la démarche de raisonnement concerne la courbe de fonctionnement de la génératrice : quelle est-elle ? En d'autres termes, quelle est la puissance absorbée (espérée) par l'éolienne en opération pour chacune de ses vitesses de rotation ?

Tout d'abord, il est à noter quelques points concernant la future éolienne :

- l'éolienne aura une puissance nominale de 3kW pour un vent de 10m/s ;
- l'éolienne devra également fonctionner pour des vitesses de vent supérieures à 10m/s et ce, jusqu'à 20 m/s ;

- l'éolienne, à vitesse variable, sera réglée par décrochage et non par contrôle du calage des pales.

Ainsi, la caractéristique de l'éolienne peut déjà être donnée en fonction de la vitesse du vent par la figure 2 selon l'équation (1).

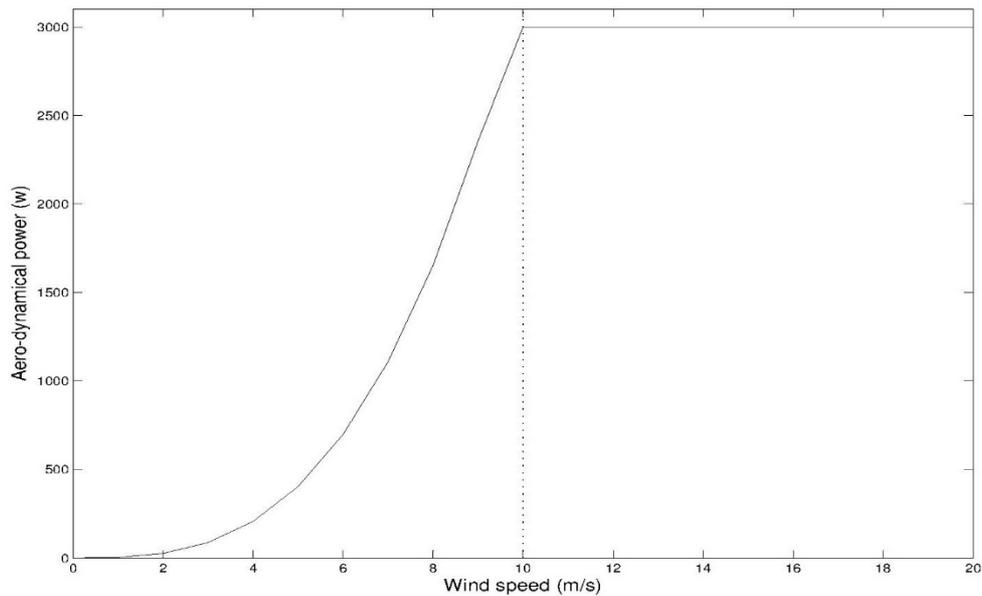


Figure 2: Puissance aérodynamique idéale extraite par une éolienne de 3kW en fonction de la vitesse du vent

De cette figure 2, deux zones de fonctionnement peuvent être distinguées. La première, appelée zone de fonctionnement à coefficient de performance maximal, est définie par des vitesses de vent entre 0 et 10 m/s. Comme son nom l'indique, l'éolienne fonctionne avec le coefficient de performance maximal afin de maximiser sa production d'énergie. Au-delà de 10 m/s, la puissance doit être limitée à 3kW afin de protéger l'éolienne et par conséquent, le  $C_P$  doit être adapté à ces fins. Cette zone est appelée zone à puissance constante ou encore zone de décrochage.

En vue d'obtenir la caractéristique de fonctionnement en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne et non de la vitesse du vent, quelques manipulations doivent être opérées. Celles-ci nécessitent la connaissance de la relation entre  $C_P$  et  $\lambda$  qui dépend du profil de pale. Dans un premier temps, une approche de cette courbe  $C_P$ - $\lambda$  est obtenue grâce à celui d'une éolienne sœur et de l'équation donnée dans [3]. Cette courbe affiche un point optimal de fonctionnement pour  $\lambda=5.5$  et  $C_P=35\%$ .

En connaissance de la courbe  $C_P$ - $\lambda$  (fig. 1) et de la caractéristique de puissance voulue en fonction de la vitesse du vent (figure 2) et, vu l'équation (2), une vitesse de

rotation de commande de l'éolienne peut être déterminée pour chaque vitesse de vent. Pour une gamme de vitesse du vent de 0 à 20 m/s, il en résulte la figure 3.

Finalement, la question initialement posée concernant la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne est résolue : la puissance aérodynamique peut être dessinée comme une « fonction » de la vitesse de rotation. Le résultat est affiché à la figure 4.

Le couple aérodynamique maximal que subira l'éolienne sera atteint lorsqu'elle fournira effectivement 3kW à une vitesse de rotation de 170 tr/min. Par la relation suivante, ce couple maximal est déterminé à 170 Nm.

$$C = \frac{P}{\omega}$$

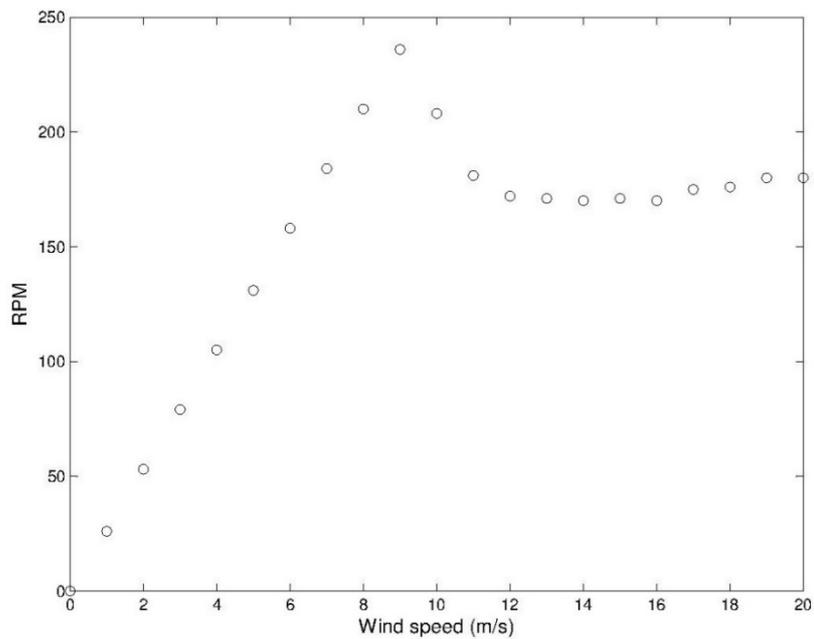


Figure 3 : Vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent pour une éolienne tripale de 3kW idéale régulée par décrochage aérodynamique

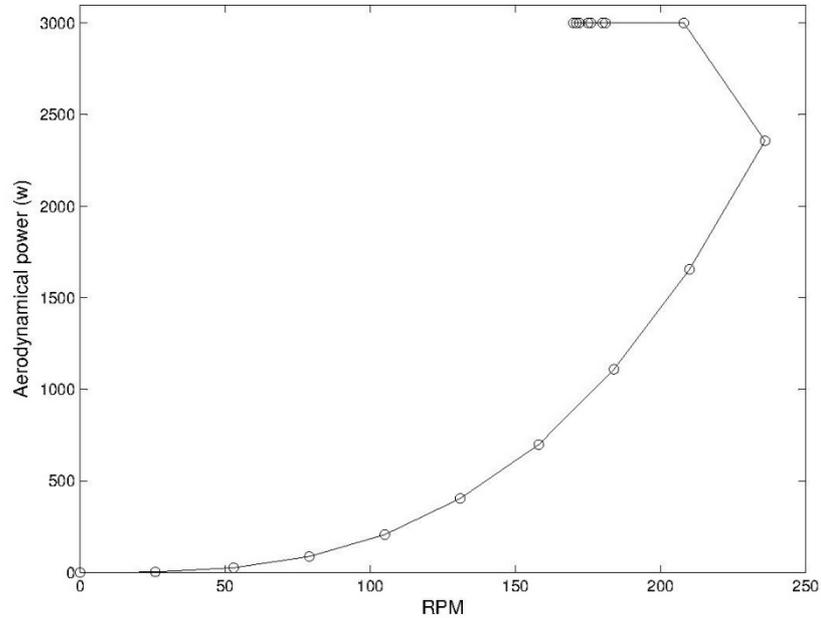


Figure 4 : Puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation pour une éolienne tripale de 3kW idéale régulée par décrochage aérodynamique

### 3.3. Dimensionnement du système moteur

Pour rappel, le moteur entraînant la génératrice doit pouvoir satisfaire aux conditions de tests, c'est-à-dire aux conditions de vitesse de rotation et de couple. Suite aux considérations préliminaires, le choix s'est porté sur le moteur à induction aux caractéristiques détaillées dans le tableau 1. Ce moteur commun a l'avantage d'être à la fois performant et économique.

Puissance	kW	7.5
Vitesse nominale	tr/min	1500
Couple nominal	Nm	49.1

Tableau 1: Caractéristiques principales du moteur à induction choisi

Afin de rentrer dans les conditions de fonctionnement de couple maximal (170 Nm à 170 tr/min), deux solutions simultanées peuvent convenir.

La première solution est l'accouplement du moteur à un système de réduction de vitesse constitué d'une courroie crantée et de deux poulies. La courroie crantée permet de garder une synchronisation entre le moteur et la génératrice tout en offrant un

gain de coût comparé à un réducteur. Ce choix se justifie par une économie d'un peu plus de £500.

La deuxième solution est l'utilisation d'un variateur de fréquence permettant le pilotage du moteur (soit en commande de vitesse, soit en commande de couple). En fait, ce pilotage a également pour effet la modification radicale de la courbe de fonctionnement du moteur : le moteur peut offrir un couple jusqu'à trois fois plus élevé que le couple nominal et ce, sur toute la plage de vitesse du moteur.

Une fois le système moteur choisi, la conception ainsi que le dimensionnement mécanique peuvent être réalisés afin de fournir un banc d'essai répondant au cahier des charges.

### **3.4. Conception de la partie de commande**

Deux modes de commande du banc d'essai différents ont été développés afin de permettre les différents types d'essais demandés par le cahier des charges : la commande de vitesse et la commande de couple du moteur. Alors que la commande de vitesse est utilisée pour la conduite de tests basiques, la commande de couple est nécessaire à la simulation des conditions de vent. Pour une vitesse de vent donnée, un couple correspondant est appliqué à la génératrice.

#### ***Commande de vitesse***

Dans ce mode, un redresseur est connecté entre la sortie de la génératrice triphasée et un banc de résistances de dissipation. Le variateur de fréquence utilise une régulation PID<sup>2</sup> interne afin de maintenir la vitesse demandée au moteur. La figure 5 illustre ce mode de fonctionnement.

---

<sup>2</sup> PID = Proportionnel, intégrateur, dérivateur

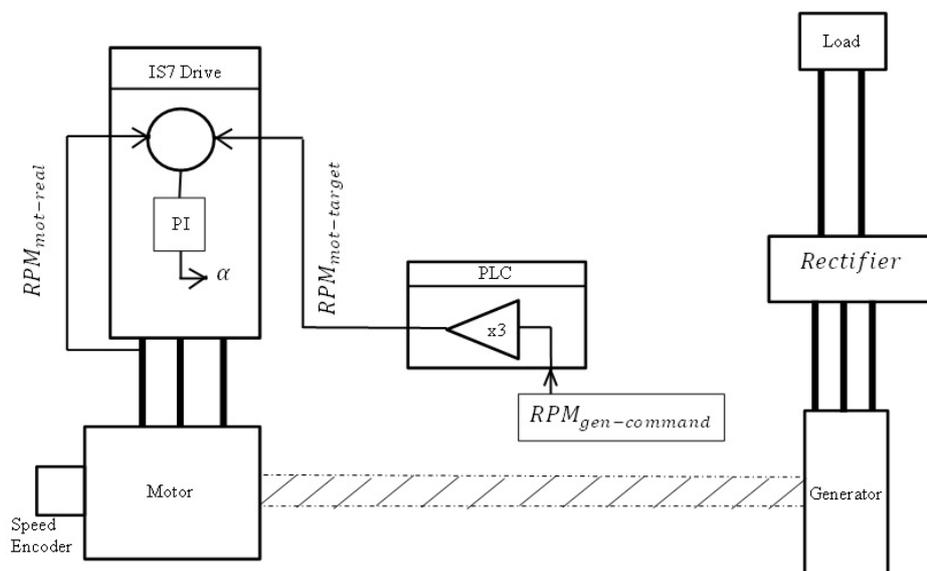


Figure 5 : Schéma de contrôle du banc d'essai en commande de vitesse

### Commande de couple

La figure 6 montre la logique de contrôle en mode commande de couple. Cette fois-ci, un système électronique réalisé par FuturEnergy Ltd, appelé convertisseur AC-DC-DC, est placé entre la sortie de la génératrice et le banc de résistances. Lorsque le moteur délivre un couple désiré, ce convertisseur AC-DC-DC permet le contrôle de la vitesse de rotation du rotor de la génératrice. Ce contrôle est rendu possible par la modulation du signal électrique de sortie de la génératrice.

Le convertisseur est piloté via un signal PWM<sup>3</sup> par un PLC<sup>4</sup> dans lequel une régulation PID est également programmée afin d'atteindre et de maintenir la vitesse de rotation de la génératrice désirée lorsque le couple exercé par le moteur est suffisant. Encore une fois, le variateur de fréquence utilise une régulation PID interne pour maintenir le couple moteur voulu.

<sup>3</sup> PWM = Pulse-Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion)

<sup>4</sup> PLC = Programmable Logic Controller (automate programmable industriel)

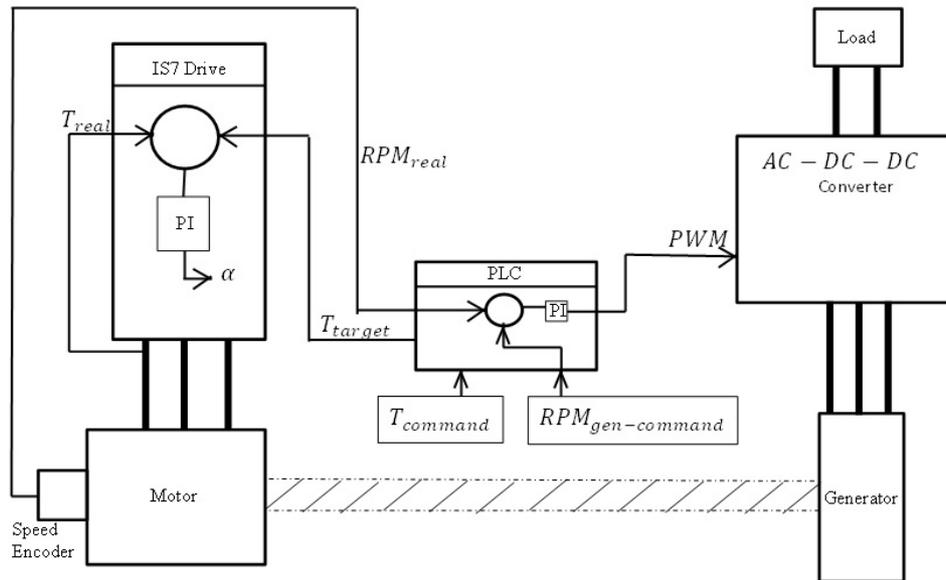


Figure 6: Schéma de contrôle du banc d'essai en commande de couple

### 3.5. Conception de la partie contrôle

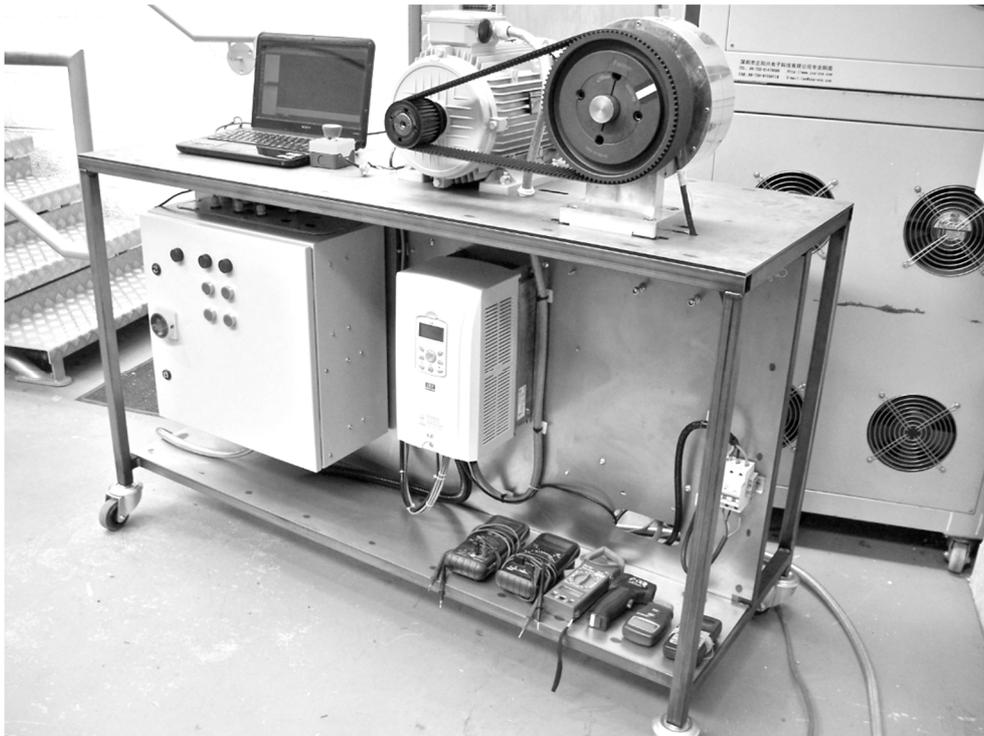
Afin de rendre possible le fonctionnement du banc d'essai, plusieurs équipements de contrôle outre un PLC et un variateur de fréquence sont utilisés. Peuvent être cités un encodeur de vitesse fixé sur l'arbre du moteur ainsi qu'un capteur thermocouple inséré dans le bobinage de la génératrice. Via un transmetteur de signaux, la température de la génératrice est suivie par le PLC sous la forme d'un signal 4-20mA.

Pour la commande de la vitesse ou du couple, deux moyens sont mis à la disposition de l'utilisateur. Le premier est l'utilisation d'un potentiomètre directement connecté au variateur de fréquence permettant un contrôle souple. Le second moyen est l'encodage de la valeur désirée via le PLC qui communique par un bus RS-485 selon le protocole Modbus RTU. C'est également via ce système de communication que les données acquises par le variateur de fréquence sont transmises au PLC. Ces données incluent par exemple les valeurs électriques de fonctionnement du moteur comme le courant, la tension et la puissance absorbés.

Bien que la récupération de toutes les données par le PLC se fasse par bus RS-485, la donnée de vitesse déterminée par l'encodeur et utilisée par la logique de régulation du variateur de fréquence est également transmise au PLC via un signal analogique. Ce choix est justifié par la rapidité de transmission de l'analogique. Son utilisation

permet une comparaison des données de vitesses acquises dans le but de meilleurs résultats.

Pour permettre une haute flexibilité des essais réalisables, l'utilisateur a le choix entre deux régulations PID pour le contrôle de la vitesse de la génératrice. La première, appelée autotuned PID, est une boucle dont les paramètres PID ont été préalablement déterminés lors d'un calibrage de vitesse. Pour la deuxième méthode de régulation, l'utilisateur peut définir lui-même les différents paramètres de la boucle.



*Figure 7 : Vue de face du banc d'essai - armoire de contrôle, variateur de fréquence, moteur, système de réduction de vitesse, génératrice*

#### **4. Etude d'un prototype de génératrice 3kW à aimants permanents**

Afin de valider le banc d'essai conçu (illustré à la figure 7), des essais sur un prototype d'une génératrice de 3kW à aimants permanents ont été réalisés. Ces tests ont permis de vérifier le fonctionnement du banc, de découvrir ses limites et d'imaginer

des solutions d'amélioration. Aussi, des observations de même type ont pu déjà être faites quant aux performances du prototype.

Etant donné que le banc ne dispose pas de capteur de couple, l'estimation de la puissance mécanique délivrée à la génératrice est réalisée en utilisant le bilan de puissance général du banc d'essai. Ainsi, on a

$$P_{\text{méc. génératrice}} = P_{\text{mot}} * \eta_{\text{moteur}} * \eta_{\text{courroie}}$$

Le rendement de la génératrice peut alors être approché par

$$\eta_{\text{génératrice}} = \frac{P_{\text{élec. génératrice}}}{P_{\text{méc. génératrice}}}$$

Pendant cette phase d'étude, il s'est avéré que la résolution de mesure (faite par le variateur de fréquence) de puissance électrique absorbée par le moteur n'est pas assez fine. De ce fait, l'approximation des performances de la génératrice est altérée. L'insertion d'un wattmètre en aval du variateur de fréquence semble être une bonne solution afin de connaître plus précisément le facteur de puissance du moteur et donc la puissance absorbée. Ceci permettra aussi de comparer ses performances aux fiches techniques fournies par le constructeur du moteur.

Une fois ce wattmètre installé, les tests basiques du banc et de la génératrice pourront être interprétés afin de déterminer en premier lieu les pertes au moteur et finalement d'évaluer les performances de la génératrice. Ces tests incluent un test à vide (sans charge), un test sans le bobinage et un test sans courroie. Ces tests permettront, entre autres, de déterminer la chute de tension à la génératrice due aux phénomènes de réaction d'induit et de flux de fuite, c'est-à-dire la chute de tension s'opérant à la *réactance synchrone* de la génératrice.

## 5. Conclusion

La conception mécanique et électrique réalisée fournit une solution pratique et flexible afin de réaliser différents essais sur une génératrice de petite puissance. Ainsi, l'utilisateur a le choix entre deux modes principaux de test : commande de vitesse ou commande de couple. Il peut opérer cette commande soit à l'aide d'un potentiomètre, soit en utilisant le programme PLC conçu pour le banc. Le réglage de différentes charges de dissipation et même de paramètres de régulation PID sont également proposés.

Afin d'obtenir de meilleurs résultats et analyses pour déterminer les performances d'une génératrice testée, le banc nécessite encore l'ajout d'un wattmètre. Aussi,

l'étude de la théorie nécessaire à la simulation de conditions réelles de vent a été réalisée et doit maintenant faire l'objet d'une traduction en code PLC.

Cependant, les premiers pas ont été faits dans un processus de développement « hardware-in-the-loop »<sup>5</sup>, nécessaire à la conception d'une génératrice et d'un rotor pour une même éolienne. En effet, la conception de ces deux éléments sont intimement liées. Cette corrélation, aussi en lien avec la méthode de contrôle de l'éolienne, détermine la performance générale de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique.

## 6. Sources

- [1] BOURLIS Dimitri, *A complete Control Scheme for Variable Speed Stall Regulated Wind Turbines*, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Carriveau Rupp (Ed.), InTech, 2011, pp. 309-338
- [2] CARRIVEAU Rupp et al., *Advances in Wind Power*, Rijeka, Croatie, InTech, 2012, 374 p.
- [3] HAU E. et VON RENOUARD H., *Wind Turbines: fundamentals, technologies, application, economics*, Berlin, Allemagne, Springer Science & Business Media, 2013, 879 p.
- [4] MANWELL J., MCGOWAN J. et ROGERS A., *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2009, 704 p.
- [5] QIAO WEI, YANG XU et GONG XIANG, *Wind speed and rotor position sensorless control for direct-drive pmg wind turbines*, Industry Applications, IEEE Transactions, 48(1), 2012, pp. 3-11

---

<sup>5</sup>« Matériel dans la boucle » : technique de développement alliant des composants réels (ici, la génératrice) et des composants simulés (ici, le rotor de l'éolienne) couramment utilisée en laboratoire.