



(51) Classification internationale des brevets :
H02J 3/01 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/DZ2019/050002

(22) Date de dépôt international :
04 mars 2019 (04.03.2019)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
DZ/P/2018/000151 14 mars 2018 (14.03.2018) DZ

(71) Déposant : UNITÉ DE RECHERCHE EN
ÉNERGIES RENOUVELABLES EN MILIEU SA-
HARIEN URERMS, CENTRE DE DÉVELOPPE-
MENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, CDER,

01000, ADRAR, ALGERIA [DZ/DZ] ; B.P. 478, Route de
Régane, Adrar 01000 (DZ).

(72) Inventeurs : **DAHBI, Abdeldjalil** ; Bloc 359 N 7 Te-
macine, Ouargla , 30230 (DZ). **REAMA, Abdellatif** ;
Département d'Ingenierie des Systèmes, Université de Pa-
ris-Est, ESIEE, Paris (FR). **NAIT SAID, Nasreddine** ; Uni-
versité de Batna 2, Département d'electrotechnique, LSP-
IE, 05000 Batna (DZ). **NAIT SAID, Mohamed Said** ;
Université de Batna 2, Département d'electrotechnique,
LSP-IE, 05000 Batna (DZ). **MAHDI, Adel** ; Département
d'Électrotechnique, Université de Constantine 25000 (DZ).
HAMOUDA, Messaoud ; Département de la Technologie,
Université d'Adrar 01000 (DZ).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,

(54) Title: CONTROL OF THE INJECTION OF CURRENT INTO THE POWER GRID WITHOUT A PHASE-LOCKED LOOP,
AND USE IN RELATION TO A WIND TURBINE SYSTEM

(54) Titre : COMMANDE DE L'INJECTION DES COURANTS AU RÉSEAU SANS LA BOUCLE DE VERROUILLAGE DE
PHASE, APPLICATION SUR UN SYSTÈME ÉOLIEN

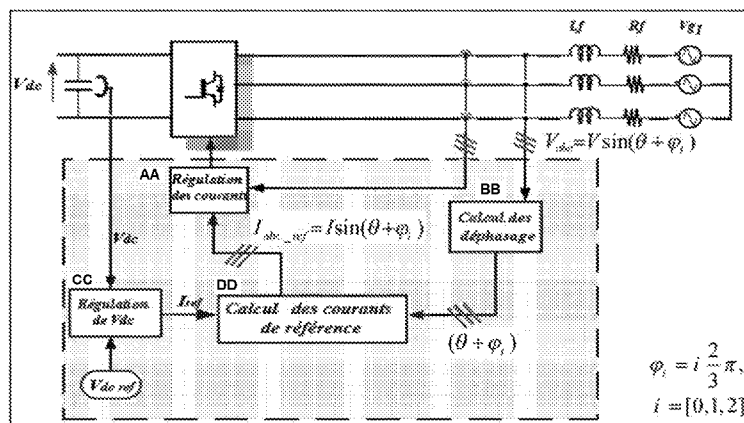


Figure -5-

AA Control of current
BB Phase shift calculation
CC Control of Vdc
DD Reference current calculation

(57) Abstract: The integration of an electrical power source into the power grid requires the voltages of the inverter to be synchronised with those of the grid. Despite the various controls, the literature is based on phase-locked loops (PLL) and also on the use of correctors (proportional-integral, PI). However, the latter present the problem of variations in parameters, which diminishes the reliability of the control and, consequently, the safety system disconnects the power grid source. In this context, a system has been developed that is equipped with a control strategy that is more effective without PLL and without any PI correctors, thereby improving the calculation speed and response time. This technique can be installed on any electrical power source connected to the power grid. This system has been implemented and tested in real time with a variable wind profile and with variations in the voltage values of the grid. The experimental results have been very good.

(57) Abrégé : L'intégration d'une source électrique au réseau nécessite la synchronisation des tensions de l'onduleur avec celles du

CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

- *relative à l'identité de l'inventeur (règle 4.17(i))*
- *relative au droit du déposant de demander et d'obtenir un brevet (règle 4.17(ii))*
- *relative au droit du déposant de revendiquer la priorité de la demande antérieure (règle 4.17(iii))*
- *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17(iv))*

Publiée:

- *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2(g))*
- *en noir et blanc ; la demande internationale telle que déposée était en couleur ou en échelle de gris et est disponible sur PATENTSCOPE pour téléchargement.*

réseau. Les littératures malgré les différentes commandes, se basent sur la boucle de verrouillage des phases (Phase Locked Loop, PLL), en plus sur l'utilisation des correcteurs (Proportionnel Intégral, PI). Néanmoins ces derniers présentent le problème de variation des paramètres, ce qui dégrade la robustesse de la commande, par conséquent, le système de sécurité découple la source de réseau. Dans ce contexte, on a développé un système équipé d'une stratégie de commande plus efficace sans PLL et sans aucun correcteurs PI; cela améliore la rapidité de calcul et le temps de réponse. Cette technique peut être installée sur n'importe quelle source électrique raccordée au réseau. Ce système a été réalisé et testé en temps réel sous un profil du vent variable et sous variations des tensions du réseau. Les résultats expérimentaux sont très satisfaisants.

« Commande de l'injection des courants au réseau sans la boucle de verrouillage de phase, application sur un système éolien »

5

Domaine technique auquel se rapporte l'invention

La présente invention concerne une stratégie de commande pour l'injection des courants d'un générateur au réseau électrique, plus particulièrement elle investit le domaine de la production de l'énergie électrique.

10 Cette stratégie de commande peut être utilisée pour les systèmes éoliens couplés au réseau électrique stable ou perturbé, ainsi que pour n'importe quelle source d'énergie électrique (photovoltaïque, turbine à gaz, groupe électrogène...) connectée au réseau électrique.

Etat de la technique antérieure

15 Le couplage d'une source d'énergie électrique au réseau n'est plus possible que si on assure les conditions de couplage. Il s'agit que les deux cotés (l'onduleur de la source d'énergie et le réseau électrique) doivent avoir : la même amplitude de tension, la même séquence des phases, la même fréquence de tension.

Afin d'assurer la synchronisation des tensions de sortie de l'onduleur avec celles du
20 réseau, les littératures, malgré la panoplie de commandes, se basent sur une boucle nommée boucle de verrouillage de phase (Phase Locked Loop, PLL). Pour la commande de connexion au réseau, on trouve des travaux qui ont utilisé la commande vectorielle (Field Oriented Control, FOC) dont l'un des problèmes est l'adaptation des paramètres des correcteurs (Proportionnel Intégrale, PI) due aux dérives
25 paramétriques, l'exemple de la variation de la résistance, et donc une réduction de l'immunité et par conséquent de la robustesse de la commande. Selon d'autres recherches, ce problème a été amélioré par la commande directe de la puissance (Direct Power Control, DPC) ainsi que par la commande à hystérésis. Néanmoins, la boucle PLL reste toujours utilisée, figure-3-, et même l'utilisation du correcteur PI
30 dans cette boucle aussi persiste avec des inconvénients influant sur la robustesse et le temps de calcul.

Dans ce contexte, on a développé une commande plus simple réduisant la complexité du système d'injection par élimination de facto de tous les correcteurs de type PI et sans PLL, figure-5-, ce qui ajoute un plus pour la robustesse par rapport
35 aux autres commandes.

But de l'invention

La présente invention vise donc à remédier aux inconvénients cités précédemment. Plus particulièrement, elle vise à prévoir une stratégie de commande de l'injection des courants au réseau sans l'utilisation de la boucle PLL, en améliorant la robustesse et le temps de réponse, ainsi que la dimension de l'électronique de commande et bien évidemment le coût.

Le but de l'invention consiste essentiellement à résoudre le problème de la déconnection des turbines éoliennes couplées au réseau électrique à cause des variations des paramètres et/ ou de la tension du réseau.

Grace à la robustesse de cette commande, elle peut être appliquée dans les fermes éoliennes, exemple celle installée à Kaberten (Adrar), ou la demande en énergie augmente surtout en été en raison des systèmes de climatisation, ce qui provoque des chutes de tension et des surtensions.

L'invention présente également une bonne solution environnementale qui a trait à la production d'une énergie verte, renouvelable, moins onéreuse et locale.

La production de l'énergie électrique par l'énergie éolienne à partir du gisement éolien disponible dans la région d'Adrar en fait une contribution à la conservation des réserves de pétrole, et donc une solution probante et économique et surtout pour les habitants dans les sites isolés.

Enoncé des figures

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée et les résultats de simulation et expérimentaux illustrés par les dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 représente le GSAP couplé avec un MCC.
- la figure 2 représente le schéma du banc d'essai de la chaîne éolienne réalisée.
- la figure 3 représente le schéma fonctionnel de la boucle de verrouillage de la phase (PLL).
- la figure 4 représente le résultat de simulation de la boucle de verrouillage de phase (PLL).
- la figure 5 représente le schéma de la commande du côté réseau sans (PLL).
- la figure 6 représente les résultats obtenus du côté turbine éolien.
- Fig.7 représente les résultats de simulation (à droite) et la validation expérimentale (à gauche) de la commande du côté réseau sans (PLL).

- Fig.8 représente les résultats expérimentaux coté réseau.

5 Présentation de l'essence de l'invention et son mode de réalisation

Les figures «1 et 2» et les photos dans l'annexe, représentent la réalisation de l'invention sur la plate-forme d'essais de la chaîne éolienne que nous avons mis en œuvre au laboratoire de l'ESSIE-Paris.

Les constituants principaux de la plate-forme sont comme suit:

- 10 ➤ Emulateur de la turbine éolienne réalisé à l'aide d'un moteur à courant continu commandé par un hacheur 12 branché à une alimentation continue¹³;
- Une machine synchrone à aimants permanents 2 utilisée en mode générateur (GSAP) ;
- Filtre triphasé (Resistances, inductances) ;
- 15 ➤ Réseau triphasé 11;
- Trois convertisseurs: hacheur 12, redresseur commandé 6 et un onduleur 7;
- Deux ordinateurs (4, 10) et deux cartes dSPACE DS1104 (8, 9);
- Des oscilloscopes pour visualiser les signaux et les résultats 14;
- Capteurs des courants, des tensions (3, 5) et de la vitesse.

20

Afin d'émuler le comportement réel de la turbine éolienne au laboratoire, un émulateur de la turbine éolienne a été réalisé à l'aide d'un moteur à courant continu commandé par un hacheur de façon à imposer un couple et une vitesse variables sur le GSAP suivant un profil du vent variable. Ce dernier est basé sur des mesures réelles de la vitesse du vent à Adrar. L'énergie produite par le GSAP passe par deux convertisseurs, transformateur et filtre, pour l'adapter aux grandeurs du réseau sur lequel la chaîne est connectée.

25

Mode de réalisation de l'invention

- 30 Dans le but de réaliser ce prototype on a passé par plusieurs étapes : l'identification des paramètres, la modélisation, la simulation, le dimensionnement, puis la réalisation. La première étape c'est la réalisation d'un émulateur éolien.

A. Réalisation de l'émulateur éolien

On a développé un émulateur de la turbine éolienne en temps réel pour remplacer la turbine éolienne réelle au laboratoire, tout en gardant le même comportement

lorsqu'elle reçoit le même profil de vent, dans un but de pouvoir tester n'importe quel cas. Dans ce prototype, l'émulateur est réalisé à l'aide d'un moteur à courant continu contrôlé par un hacheur à quatre quadrants.

B. Réalisation de montage et commande de la chaîne éolienne

5 L'émulateur éolien est couplé directement (attaque direct) au générateur synchrone à aimants permanents. Le banc d'essai est commandé et contrôlé par l'intermédiaire de deux cartes dSPACE connectées aux deux ordinateurs. Les cartes dSPACE DS1104, contiennent des processeurs qui jouent le rôle d'intermédiaire entre l'algorithme de commande implanté au PC et les équipements électriques. Afin
10 d'accomplir la commande, les capteurs sont connectés aux cartes permettant les mesures de position, de la vitesse, des courants et des tensions.

Le convertisseur coté machine joue le rôle d'un redresseur, il est utilisé pour commander la turbine éolienne et la vitesse du GSAP. Néanmoins, l'onduleur triphasé est commandé de façon à obtenir une tension continue stable au niveau du bus
15 continu, et en même temps, il assure les conditions de couplage au réseau. Afin d'adapter les tensions de l'onduleur à celles du réseau.

C. Couplage de la chaîne éolienne au réseau triphasé

Afin de découvrir l'importance et la robustesse de notre stratégie développée, on a associé une comparaison avec les commandes utilisant PLL.

20 La boucle PLL est utilisée pour assurer la synchronisation des tensions de sortie du l'onduleur avec celles du réseau. Elle impose que la tension en direct soit égale à zéro à l'aide d'un correcteur PI, ce qui permet le découplage des courants, figures « 3, 4 ».

Malgré que la PLL joue un rôle très important et elle est très nécessaire dans la commande vectorielle, et la commande par hystérésis ordinaire, ainsi que la
25 commande directe de puissance (DPC), la commande développée élimine tous les correcteurs PIs, et même la boucle (PLL), ce qui ajoute plus de robustesse par rapport aux autres commandes coté réseau.

D. Couplage de la chaîne éolienne au réseau triphasé sans la boucle PLL

Cette commande présente l'avantage d'être simple, robuste et avec un temps de
30 calcul réduit, puisque elle ne nécessite pas la boucle PLL, où cette dernière utilise un correcteur 'PI' qui peut causer la diminution de la robustesse et un retard de calcul et de synchronisation à cause de l'action intégrale. En addition, dans cette commande développée, les correcteur 'PI' du courant sont éliminés, ce qui augmente sa

robustesse, simplifie l'implantation et réduit le temps de calcul de l'algorithme. Le schéma de cette commande est représenté sur la figure.5.

Cette commande est caractérisée par une détection rapide et précise des angles réels des phases des tensions du réseau dans le repère triphasé, sans avoir besoin ni d'une estimation ni d'une transformation. Ces angles sont utilisés directement pour délivrer les courants de références. Ensuite, ces derniers sont imposés sur le système par une commande adéquate du convertisseur afin de réguler la tension du bus continu et assurer les conditions de couplage au réseau.

E. Validation expérimentale et résultats de simulation

Afin d'examiner la sensibilité et la validité de cette commande dans la chaîne éolienne, on a implanté la commande coté réseau sans la boucle de verrouillage de phase sur le banc d'essai réalisé en temps réel. En utilisant les mêmes paramètres réels, les résultats de simulation et la validation expérimentale de cette commande sont présentés dans les figures « 6 et 7 ».

• Analyse des résultats

La figure (6) montre que les deux commandes MPPT et la commande de l'angle de calage fonctionnent bien en temps réel malgré les différentes variations de la vitesse du vent. Quand la vitesse du vent est inférieure à celle nominale, la commande MPPT doit être appliquée, ce qu'est traduit par la valeur minimale de l'angle de calage, figure (6.b), et la valeur maximale du coefficient de puissance, figure (6.c). Mais, lorsque la vitesse du vent dépasse celle nominale, la valeur de l'angle de calage des pales augmente pour limiter la puissance à celle nominale. Par conséquent, la valeur du coefficient de puissance diminue.

La figure (7) montre bien que les résultats de simulation et ceux expérimentaux sont quasiment identiques, ce qui prouve la validité de la commande appliquée ainsi que l'appropriation du modèle mathématique et les méthodes d'identification des paramètres.

On remarque que les courants suivent bien leurs références, ce qui assure une bonne régulation de tension du bus continu et l'injection au réseau.

D'après les figures (7 : b.1 et b.2), malgré les différentes variations de vitesse du vent, il est clair que la tension du bus continu est stable et bien ajustée à sa valeur de référence, en plus, sa réponse est rapide et sans dépassement à 4.5s. Ce qui présente

une amélioration par rapport aux autres commandes. Cet avantage augmente la durée de vie des composants et la fiabilité du système.

Sur la figure (7.b.2), on observe un dépassement au début. Il est justifié par le premier chargement du condensateur, puisque il est initialement déchargé. Par contre, en pratique, ce n'est pas le cas.

Les figures (7, e.1, e.2) montrent que l'injection des courants au réseau est bien assurée avec des courants sinusoïdaux et en phase avec les tensions malgré les différentes variations de la vitesse du vent.

Tel que représenté sur les figures (7.c et d), les tensions du réseau sont sinusoïdales. Néanmoins, les tensions réelles présentent quelques harmoniques et des bruits de mesure, ce qui influe sur la qualité des courants injectés, quand même, la qualité des courants injectés demeure assez acceptable avec un facteur de distorsion THD de 4.39%.

Les résultats obtenus par simulation et par réalisation pratique confirment et assurent bien la validité et la robustesse de la commande développée sous une vitesse de vent variable.

F. Comportement de la chaîne éolienne vis-à-vis des variations de tension du réseau

Afin de confirmer d'avantage le bon fonctionnement et la robustesse de la nouvelle commande appliquée sur la chaîne éolienne, on a provoqué des surtensions et des crues de tension au niveau du réseau tout en gardant le couplage du système éolien sous le profil du vent variable. Les résultats sont montrés dans la figure (8) :

- **Interprétations et commentaires**

On remarque sur la figure (8.a) des grandes variations sont appliquées sur les tensions du réseau (entre 50V à 75V) sur toute la plage de temps (de 0 à 15s). La figure (8.c) montre bien que malgré toutes ces variations de tensions du réseau accompagnées simultanément par les variations de la vitesse du vent, la tension du bus continu reste stable et suit bien sa valeur de référence grâce à la commande développée. En outre, l'injection au réseau reste bien assurée et aussi avec un facteur de puissance unitaire et une bonne qualité du courant, figure (8.b). Par contre, dans le cas de la commande basée sur PLL, la commande du bus continu n'est pas robuste, ce qu'est montré sur la figure (8.d).

Les résultats expérimentaux vérifient et assurent bien la validité et l'efficacité de la commande développée avec plus de simplicité et des améliorations en temps de réponse et robustesse.

Manière dont l'invention est susceptible d'application

- 5 Cette stratégie de commande peut être installée et appliquée sur n'importe quelle source de production d'électricité connectée au réseau, plus particulièrement, dans le système de la ferme éolienne de Kaberten (Adrar), ainsi que dans les systèmes de champs photovoltaïques raccordés au réseau électrique (Adrar, El Hadjira...etc) ou avec une source conventionnelle ou hybride, afin de satisfaire les besoins des
- 10 habitants et éviter les coupures d'électricité. En addition, elle peut être appliquée sur les micro-réseaux dans les sites isolés ou l'approvisionnement par l'électricité revient trop cher.

REVENDICATIONS

1. L'invention est une commande de l'injection des courants au réseau caractérisée par rapport aux systèmes déjà utilisés par une nouvelle caractéristique technique consiste à injecter les courants au réseau sans l'utilisation de la boucle de verrouillage de phase, Figure.2 et Figure.3. Cette stratégie de commande peut être appliquée sur n'importe quel système de production d'électricité couplé au réseau électrique.
2. Commande de l'injection des courants au réseau caractérisée par une nouvelle stratégie du calcul des courants de référence dans le repère triphasé, donc il n'y a pas besoin d'aucune transformation biphasée-triphasée (de Park, Clarke ou Concordia), Figure.5.
3. Commande de l'injection des courants au réseau caractérisée par une stratégie de détection directe et rapide des angles de phases des courants à partir des tensions de réseau avec une haute précision.
4. Commande de l'injection des courants au réseau caractérisée par l'élimination de tous les correcteurs du type proportionnel intégral, ce qui augmente sa robustesse en cas d'un éventuel défaut ou fluctuations au réseau électrique surtout dans les heures de crête, ce qui garantit la continuité de production d'une énergie électrique propre sans coupures, Figure.8.
5. Commande de l'injection des courants au réseau caractérisée par rapport aux autres stratégies par la réduction du temps de calcul de l'algorithme grâce à l'élimination de la boucle de verrouillage de phase, ainsi que tous les correcteurs du type proportionnel intégral, ce qui améliore le temps de réponse et réduit le dimensionnement du circuit de commande, et par conséquent la réduction du coût et du volume avec l'amélioration des performances.

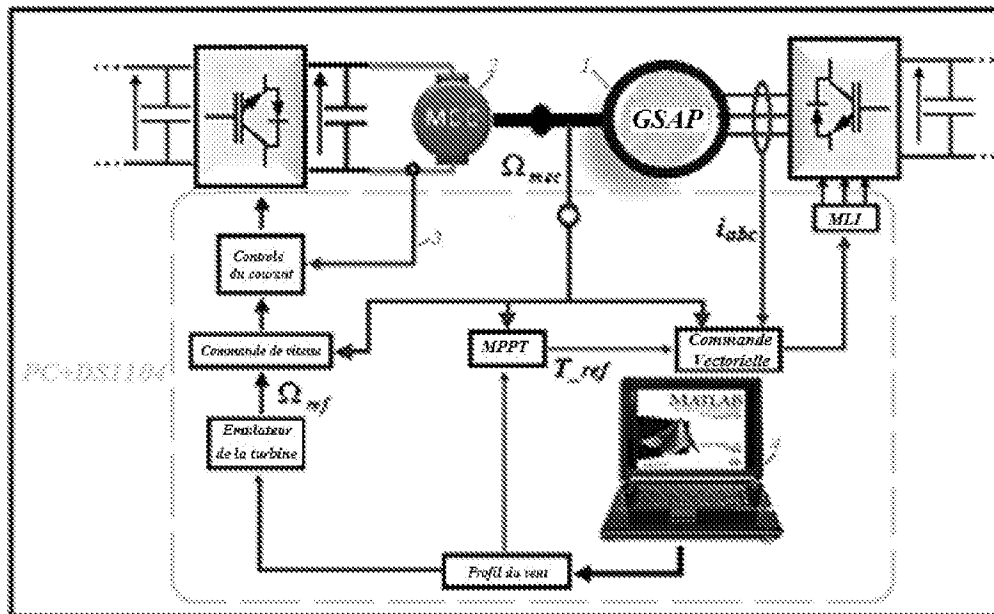


Figure -1-

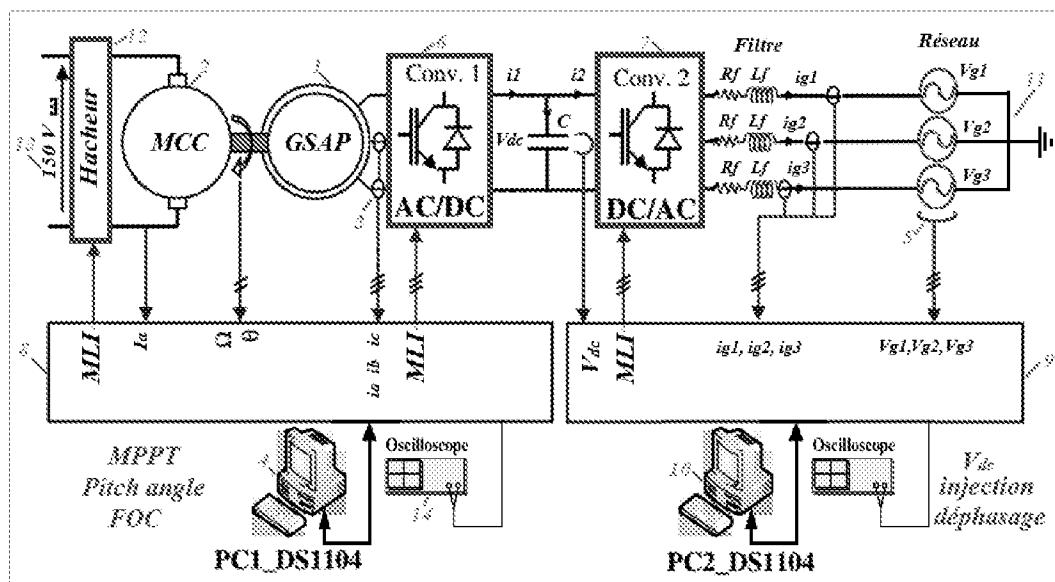


Figure- 2-

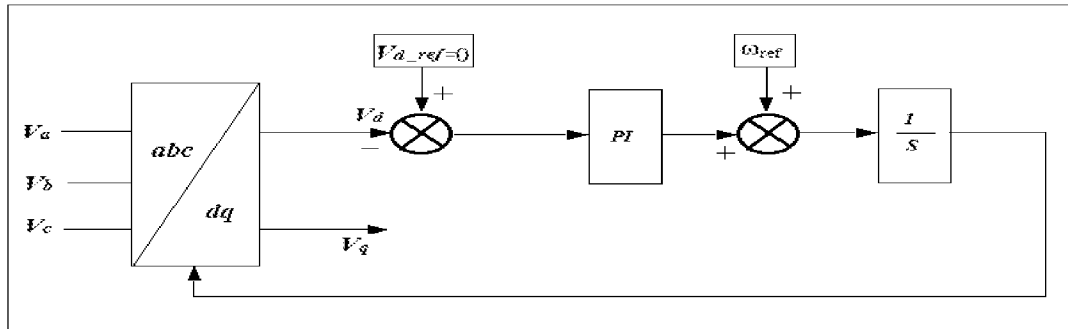


Figure-3-

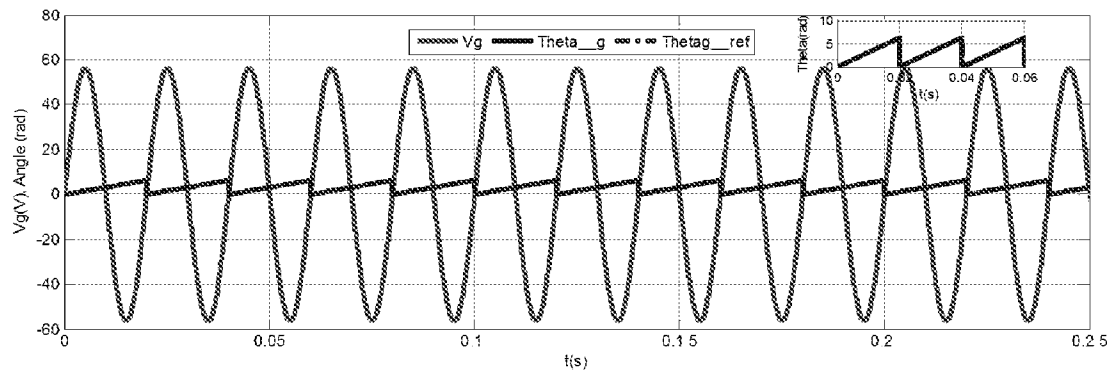


Figure -4-

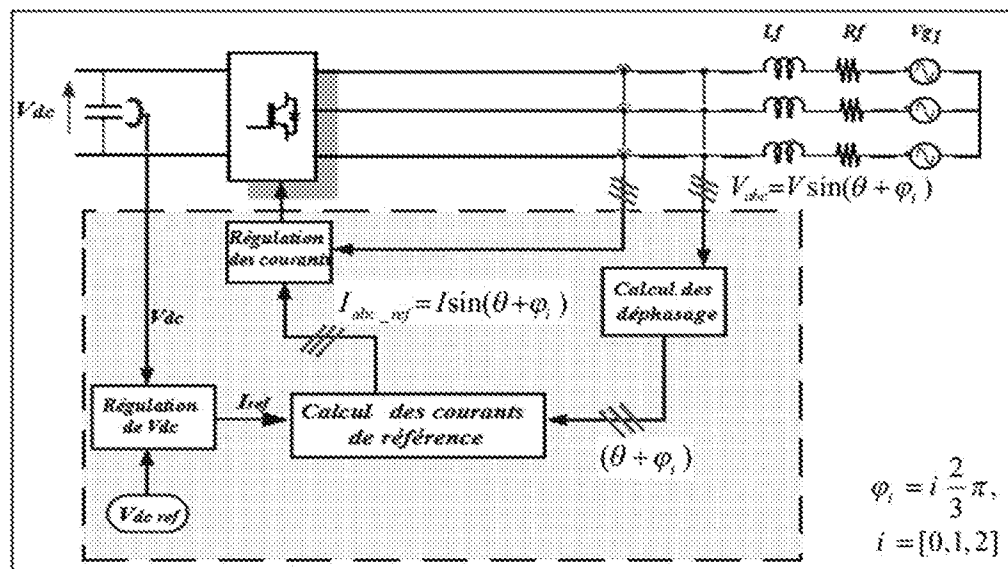
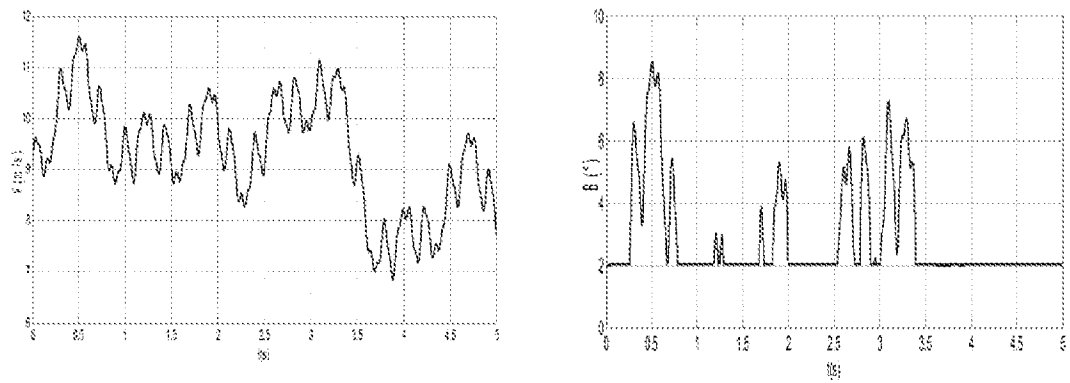
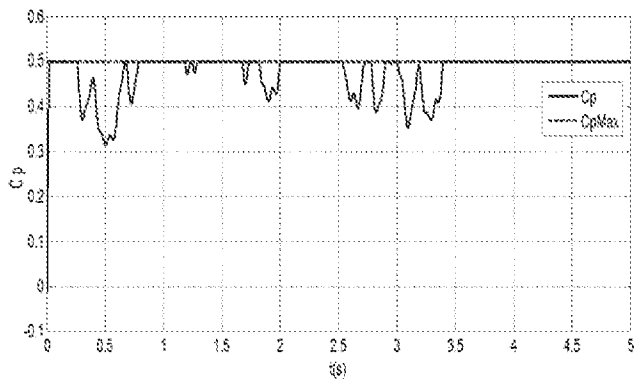


Figure -5-



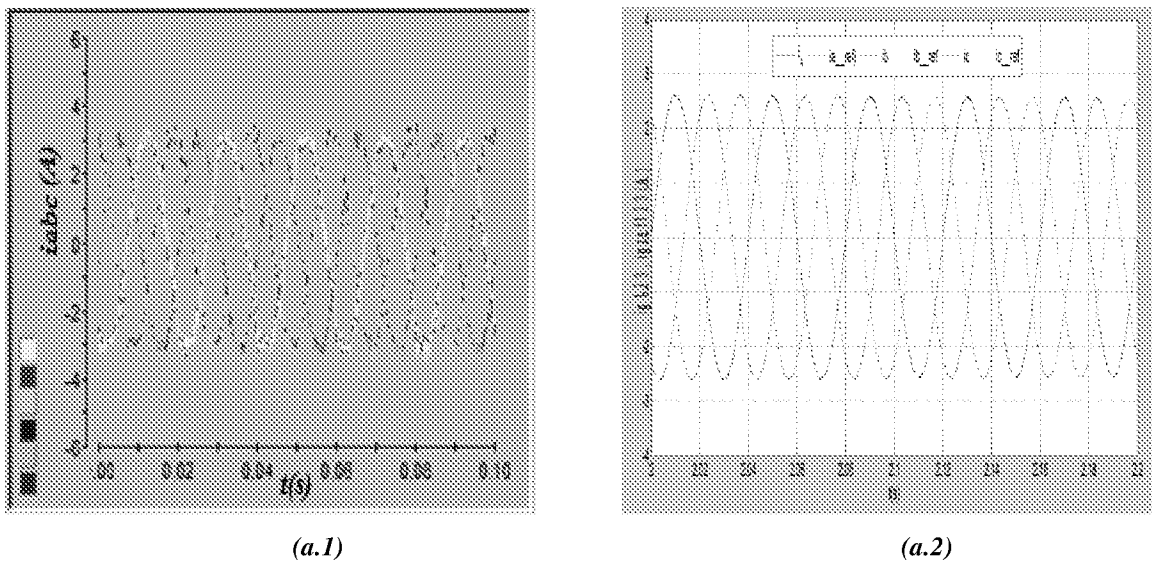
(a) Vitesse du vent

(b) Angle de calage



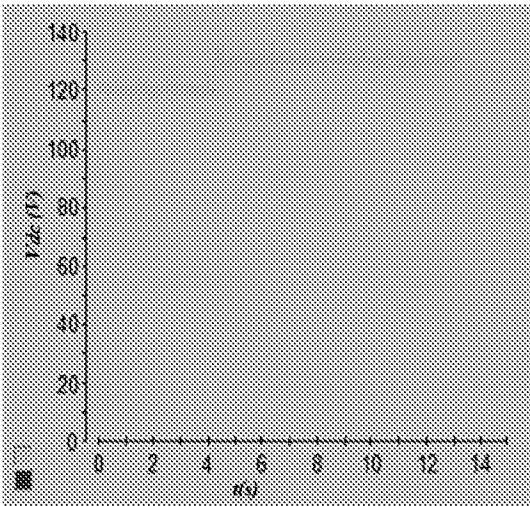
(c) Coefficient de puissance

Figure -6-

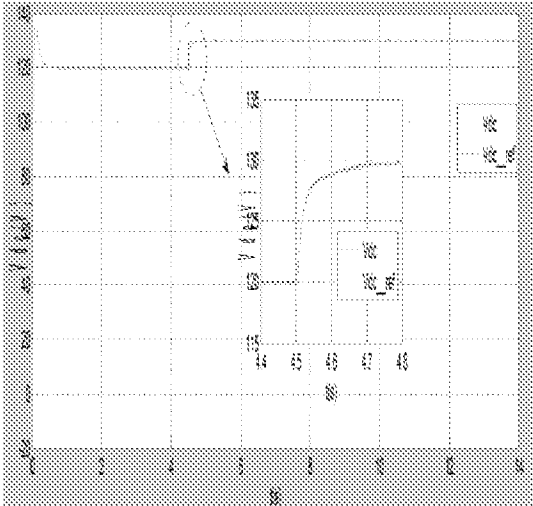


(a.1)

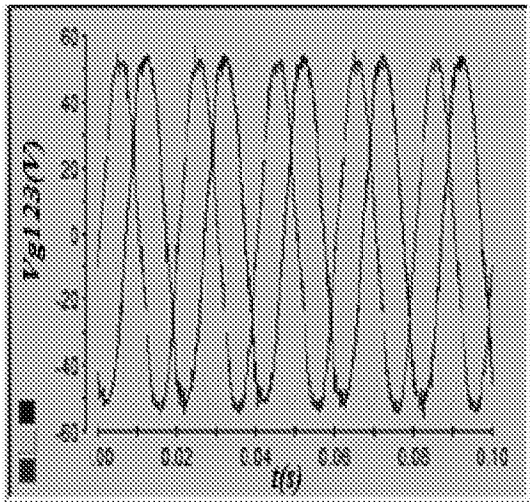
(a.2)



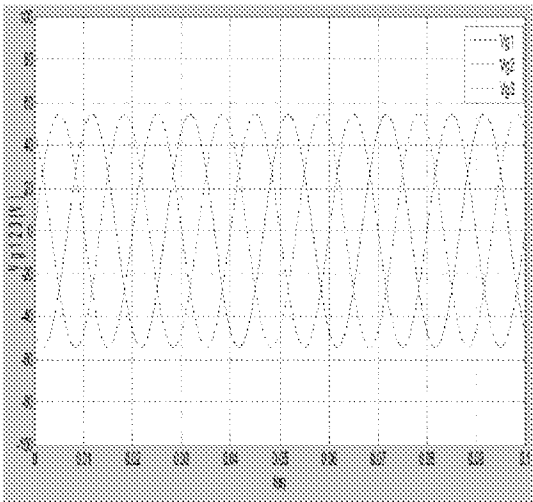
(b.1)



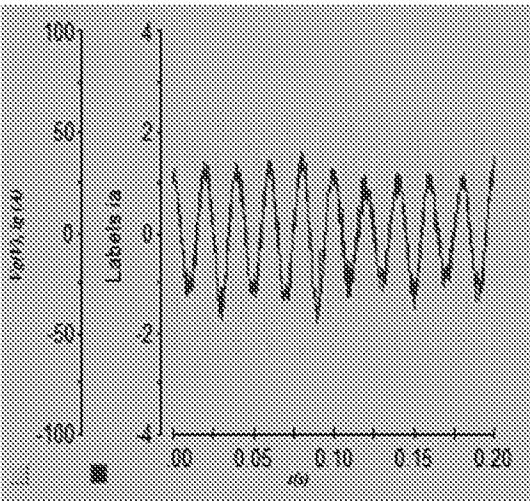
(b.2)



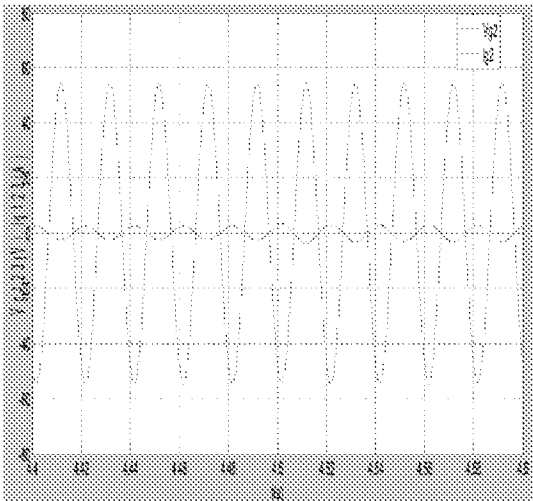
(c.1)



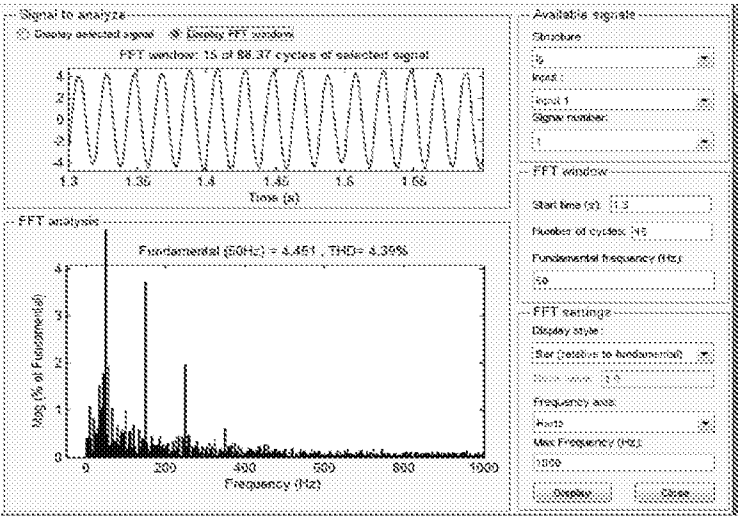
(c.2)



(d.1)

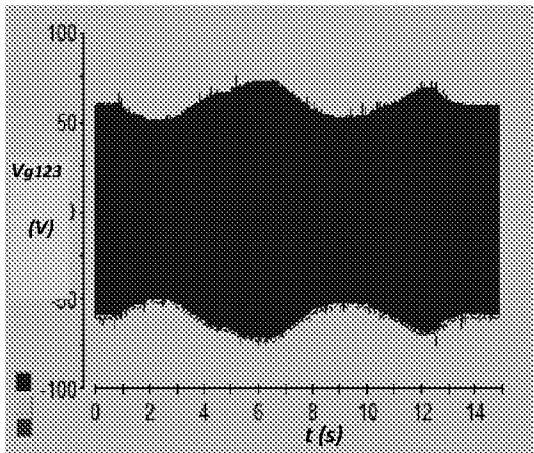


(d.2)

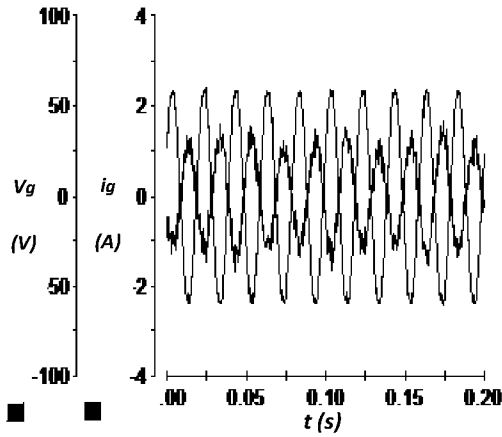


(e)

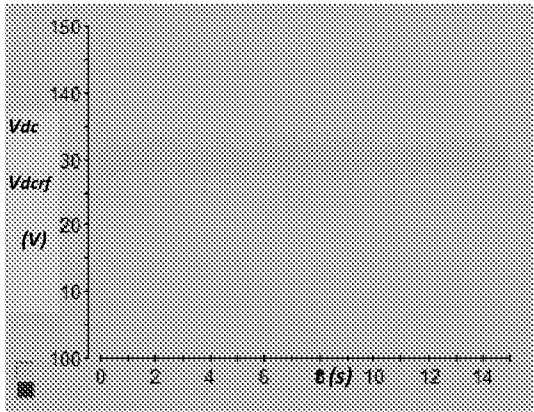
Figure -7-



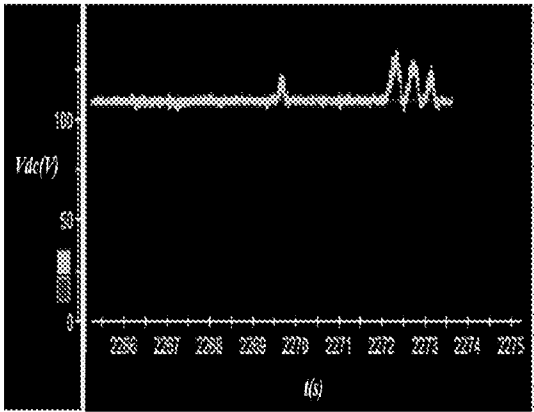
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure -8-