

# Amélioration des rendements des énergies nouvelles. Contrôle & Protection des Eoliennes modernes



## Applications

- **Contrôle de l'orientation des pales, du rotor et de la nacelle**
  - Contrôle du courant dans les variateurs de vitesse électriques de faible puissance
- **Générateur à induction à double enroulement (machine asynchrone)**
  - Détection précise et rapide des courants dans les convertisseurs à IGBTs à modulation de largeur d'impulsions (redresseur et onduleur) pour contrôler la puissance pour le réseau
  - Protection en court-circuit pour les semi-conducteurs de puissance dans les convertisseurs
- **Générateurs synchrones**
  - Contrôle du courant dans les convertisseurs à impulsions (redresseur et onduleur) afin de transmettre la pleine puissance aux réseaux principaux
  - Protection en court-circuit pour les semi-conducteurs de puissance dans les convertisseurs

## Particularités

- Mesure de courant bipolaire AC & DC de 50 à 2000 Aeff nominal
- Alimentation bipolaire de 12 à 24 V (en fonction des modèles)
- Temps de réponse @ 90 % de  $I_{PN}$  : < 1  $\mu$ s
- Large bande passante du DC jusqu'à plusieurs centaines de kHz
- Signal de sortie précis en courant ( $\pm 0.3$  à  $0.65$  % de  $I_{PN}$  typiquement @ +25°C)
- Isolation galvanique
- Différents encombrements compacts à montages multiples (mécaniques ou sur circuit imprimé)
- Versions moulées pour les environnements difficiles
- Bon comportement en mode commun
- Conformité EN 50178
- Marquage CE
- Garantie 5 ans

Les combustibles fossiles sont historiquement et restent la première source d'énergie dans la production d'électricité. On s'efforce cependant d'accroître le rôle des énergies renouvelables afin d'assurer la continuité de la production d'électricité après l'épuisement des combustibles fossiles et, conformément aux accords internationaux, de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, le gaz à effet de serre résultant de leur combustion.

La construction d'éoliennes modernes d'une puissance nominale pouvant atteindre 5 MW (actuellement en phase d'essai) n'est possible qu'avec l'usage de matériaux de pointe résistant à des contraintes très sévères et le concours de systèmes de contrôle et d'une électronique de puissance modernes capables de transférer l'énergie produite dans le réseau. La commande des convertisseurs intégrés aux éoliennes nécessite l'utilisation de capteurs de courant de différents calibres, ces derniers jouant un rôle essentiel sur la performance de l'ensemble.

Depuis des temps immémoriaux, l'humanité exploite le vent comme source d'énergie. Dans les moulins à vent, l'énergie éolienne est transformée en énergie mécanique utilisée pour moulin le grain ou pomper l'eau.

Les grands principes théoriques de la physique et de la construction des éoliennes modernes ont été découverts au début du XX<sup>e</sup> siècle. Il

revient à l'ingénieur allemand Albert Betz d'avoir calculé et publié en 1926 que le rendement maximum théorique d'une éolienne idéale est d'environ 59,3%. Dans les années 40, fort d'un riche savoir en aéronautique, Ulrich Hütter développait les règles générales de conception des systèmes de conversion d'énergie éolienne modernes, à deux ou trois pales et pour les hautes vitesses.

COMPACT AC/DC CURRENT TRANSDUCERS : **LA** and **LF** Series



[www.lem.com](http://www.lem.com)



Fig. 1 : Moulins à vent dans le port de Rhodes, en Grèce – le tissu formant les ailes a été enroulé.

Fig. 2 : Station de pompage côtière commandée par le vent située à Lobbe (sur l'île allemande de Rügen dans la mer Baltique).

Fig. 3 : Centrale éolienne sur l'île Grande Canarie en Espagne.

Mais il faut attendre le début des années 1990 pour que, dans différents pays, les pouvoirs publics subventionnent les énergies renouvelables et encouragent le développement commercial des éoliennes. Les éoliennes, isolées ou en parc, se sont multipliées et l'on teste actuellement les nouveaux modèles allant jusqu'à une puissance de 4,5 à 5 MW. La puissance installée mondiale est de 47,317 MW. Avec 16,929 MW, l'Allemagne prend la tête, devant l'Espagne, les Etats-Unis, et le Danemark.

### La commande des éoliennes

Le vent, déplacement de masses d'air, est dû aux différences de température locales ou plus globales résultant du rayonnement solaire. Les obstacles (forêts, montagnes, bâtiments...) provoquent des turbulences qui en modifient sans cesse la vitesse. Le rotor des éoliennes transforme l'énergie cinétique du vent en énergie cinétique rotative pouvant entraîner un générateur d'électricité.

La puissance du vent, et donc la portion qui peut en être extraite, est proportionnelle au cube de sa vitesse. L'énergie exploitable est par ailleurs proportionnelle à la surface balayée par le rotor. Quand le vent dépasse un certain seuil, il devient nécessaire de régler la puissance des éoliennes afin d'éviter les surcharges mécaniques et électriques. La puissance nominale du générateur est généralement l'un des

paramètres à respecter.

Mais il existe une autre raison de contrôler la puissance. Il est essentiel que le générateur fonctionne à son régime optimum, indépendamment des incessantes fluctuations du vent, cela afin de fournir une puissance électrique environ constante au réseau.

Il existe différentes manières de contrôler la puissance d'une éolienne. Le réglage passif ou actif des pales en est une. La limitation passive peut-être obtenue par un profil étudié des pales. Lorsque le vent atteint une certaine vitesse, les filets d'air qui entraînent le rotor se brisent (point de décrochage) et le rotor s'arrête (contrôle par décrochage).

Dans les grandes éoliennes actuelles, on recourt à la commande active de l'angle d'attaque des pales selon leur axe longitudinal («pitch control»). Cette modification de l'orientation des pales par rapport au plan du rotor permet d'une part de contrôler la puissance du générateur, et, d'autre part, d'orienter les pales de manière que le rotor s'arrête lorsque la vitesse du vent est trop élevée. Pour cela, on recourt généralement à des servomoteurs de faible puissance dont les convertisseurs utilisent des capteurs de courant compacts et montables sur circuit imprimé (modèles LEM LA 55-P, LA 100-P, LA 125-P, LA 200-P). Faisant partie de la boucle de rétroaction, ces capteurs doivent réagir rapidement et on préférera alors les technologies les plus performantes.

Lorsqu'ils sont utilisés conjointement avec la commande intelligente de puissance des générateurs, il est assuré que les éoliennes, après avoir démarrées, fournissent une puissance constante au réseau malgré les importantes fluctuations du vent et que, par vent trop violent, elles se mettent en berne.

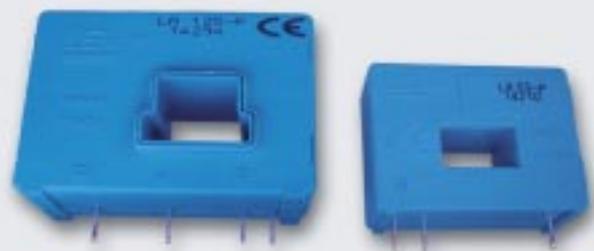
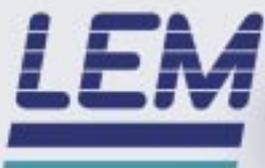


Fig. 4: Capteurs de courant LEM de 50 à 200 Aeff nominal à montage sur circuit imprimé.



www.lem.com

COMPACT AC/DC CURRENT TRANSDUCERS : **LA** and **LF** Series

## Commande de l'orientation

Il est important que le rotor soit toujours orienté perpendiculairement au vent, d'une part pour que le flux d'air traverse l'aire maximale balayée par les pales, d'autre part pour éviter qu'une asymétrie de charge ne fléchisse et ne relâche les pales à chaque révolution.

Les grandes éoliennes commerciales sont généralement du type face au vent, c'est-à-dire avec le rotor côté vent du mât. Cette configuration étant instable, le rotor et la nacelle doivent être orientés activement («Yaw» control) à l'aide de moteurs électriques. Des freins permettent d'éviter que la nacelle ne change sans cesse de cap sous les faibles et soudains changements de direction du vent.

Pour le réglage permanent de la position angulaire de l'ensemble, les capteurs des différents convertisseurs mesurent le courant en continu, et la précision et le temps de réaction de la commande en courant dépendent de manière décisive de la conception et des performances des capteurs de courant. Dans ce cas, on utilise de préférence des capteurs performants à boucle fermée, généralement pour des courants nominaux plutôt faibles (quelques

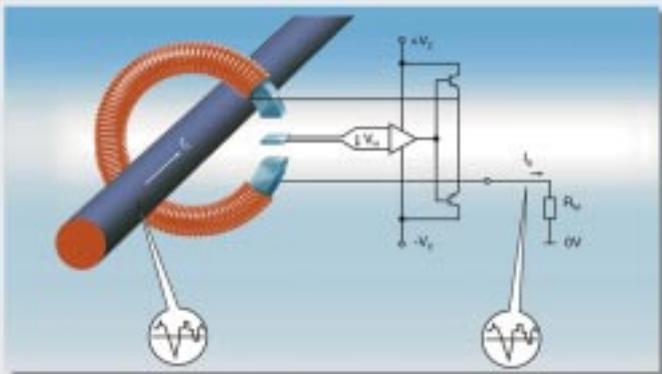


Fig. 5: Principe de fonctionnement d'un capteur de courant à effet Hall à boucle fermée.

centaines d'ampères. Modèle LEM LF 205-S). Ces capteurs se distinguent par leur large bande passante alliée à un temps de réponse minime, une très bonne linéarité et donc une haute précision.

Après avoir réglé la position mécanique des pâles et de l'éolienne dans son ensemble, il s'agit encore de convertir l'énergie éolienne en énergie électrique, puis d'injecter cette dernière dans le réseau. Pour cela, les fabricants proposent deux solutions, basées soit sur des générateurs synchrones, soit sur des générateurs asynchrones.

## Générateurs asynchrones et raccordement au réseau

Le «concept danois» classique comprend un rotor tripale à orientation des pâles réglable, une boîte de vitesse (multiplicateur), un générateur asynchrone à cage d'écureuil et à commutation de pôles, couplé directement au réseau. Le couplage direct impose un système à «vitesse constante», aux variations de vitesses près dans la zone de glissement super-synchrone.

La vitesse du rotor peut être ajustée dans une fourchette très étroite par le réglage du glissement et, dans une fourchette plus large, en commutant les pôles du générateur. La vitesse est multipliée par une boîte à vitesse à engrenages qui assure un régime convenable au générateur. La machine prélève du réseau l'énergie réactive nécessaire à la création de son champ tournant. Afin de limiter les trop forts appels de courant lors du couplage au réseau, des modules de démarrage («soft start») insérés entre le réseau et le générateur agissent en phase de démarrage. Finalement, pour les toutes grandes éoliennes, on ne recourt plus au couplage direct au réseau qui présente certains inconvénients (p.ex. processus de synchronisation lors du raccord au réseau).

## Générateur à induction à double enroulement

La majorité des grandes éoliennes actuelles recourent à un «concept danois» modifié, dans lequel une machine asynchrone à double enroulement sert de générateur.

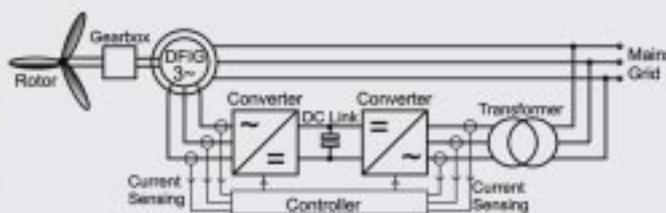


Fig. 6: Schéma de branchement pour un générateur asynchrone à double enroulement.

Le bobinage statorique est directement couplé en tension et fréquence au réseau, alors que le rotor à bagues glissant l'est par l'intermédiaire d'un onduleur dédié, bidirectionnel, capable de transmettre de l'énergie vers la machine comme vers le réseau. Cet onduleur est dimensionné en fonction de la puissance rotorique de glissement, laquelle se limite en général à 20% de la puissance nominale du générateur. Ce concept élégant permet ainsi de régler un flux de puissance important en ne contrôlant qu'une faible proportion.

Une éolienne de ce type est donc un système à vitesse variable, travaillant alternativement dans la zone sous-synchrone ou super-synchrone en jouant sur le réglage du glissement. Le convertisseur se compose en général de deux onduleurs identiques, reliés par un bus DC, généralement à IGBTs commandés par modulation de largeur d'impulsions. Que l'énergie soit transportée dans un sens ou dans l'autre, l'un d'eux fonctionne en redresseur et l'autre en onduleur. Une détection de courant rapide et précise est nécessaire de sorte à contrôler le flux de puissance au réseau, ainsi que la tension du bus DC. LEM fournit des capteurs de courant à boucle fermée compacts, à courant nominal moyen très bien adaptés à cette tâche et disponibles avec différents types de fixation (Modèles LEM LF 305-S, LF 505-S). Egalement, des capteurs de tension LEM peuvent être utilisés afin de surveiller et contrôler la tension du bus DC.



Fig. 7: Stator d'un moteur synchrone à aimants permanents.  
Picture by courtesy of ETEL-Switzerland

### Générateurs synchrones et couplage réseau

Les deux conceptions décrites auparavant recourent à une boîte à vitesses qui adapte le faible régime de l'hélice à celui, plus élevé, nécessaire au générateur. Une autre conception qui gagne du terrain sur le marché, se base sur un générateur synchrone à entraînement direct, directement couplé au rotor de l'hélice dont la vitesse est variable. Cette solution permet d'éliminer les inconvénients des boîtes à vitesses (p. ex. les pertes mécaniques et les importants frais d'entretien) et augmente le rendement global, au prix d'une augmentation du volume de la partie motorisation. Au vu de la faible vitesse de l'arbre du rotor, la fréquence de sortie du générateur doit être adaptée à celle du réseau.

Le dimensionnement du générateur électrique synchrone à entraînement direct sera conditionné par la puissance mécanique d'entrée, mais également par le fait que cette dernière est le résultat de la combinaison d'une faible vitesse et d'un couple élevé. Dans ce cas, on a avantage à concevoir des moteurs couples de grand diamètre et avec un nombre de pôles élevé. La Fig. 7 est un exemple de stator de moteur couple synchrone à aimants permanents, utilisé jusqu'à

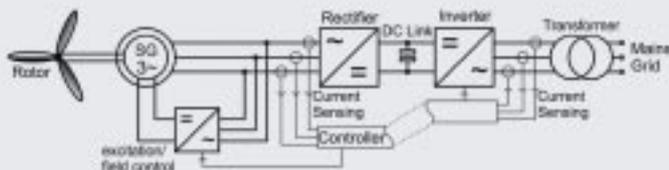


Fig. 8: Schéma de branchement pour un générateur synchrone

quelques centaines de kW. Pour des puissances supérieures, on utilisera de préférence des générateurs multipolaires synchrones avec un rotor bobiné.

Les générateurs synchrones combinés à un convertisseur adapté (Fig. 8) présentent l'avantage de pouvoir produire une puissance réactive inductive ou capacitive, voire nulle en fonction du contrôle du champ/excitation. Le couplage réseau est effectué par des convertisseurs à modulation de largeur d'impulsions qui doivent dans ce cas être dimensionnés pour la pleine puissance à transmettre.

Dans cette application, des capteurs de courant LEM à boucle fermée (modèles LF 1005-S, LF 2005-S) peuvent avantageusement être utilisés que ce soit dans le redresseur ou l'onduleur. Des versions à boîtier étanche existent pour



Fig. 9: La famille des capteurs LF mesure les courants de 100 A à 2000 Aeff.

les milieux plus agressifs. Tous les capteurs de courant de la famille LF conviennent à ces applications et présentent en particulier un bon comportement en mode commun (paramètre souvent critique) et une très bonne précision (de l'ordre de 0,3% au régime nominal et à température ambiante). Leur principe en boucle fermée permet, en sus d'une mesure de courant précise, de réaliser des capteurs rapides, assurant la protection des semi-conducteurs de puissance des onduleurs contre les courts-circuits, ce qui constitue un avantage inestimable pour les éoliennes en mer dont la maintenance est difficile et coûteuse.

Les capteurs de courant sont des composants indispensables aux éoliennes modernes. LEM, qui développe des capteurs depuis plus de trente ans, jouit en la matière d'une expertise sans pareil et fournit déjà les solutions requises dans ces applications. Pour les autres applications, LEM développe et fabrique les solutions satisfaisant les exigences de ses clients.