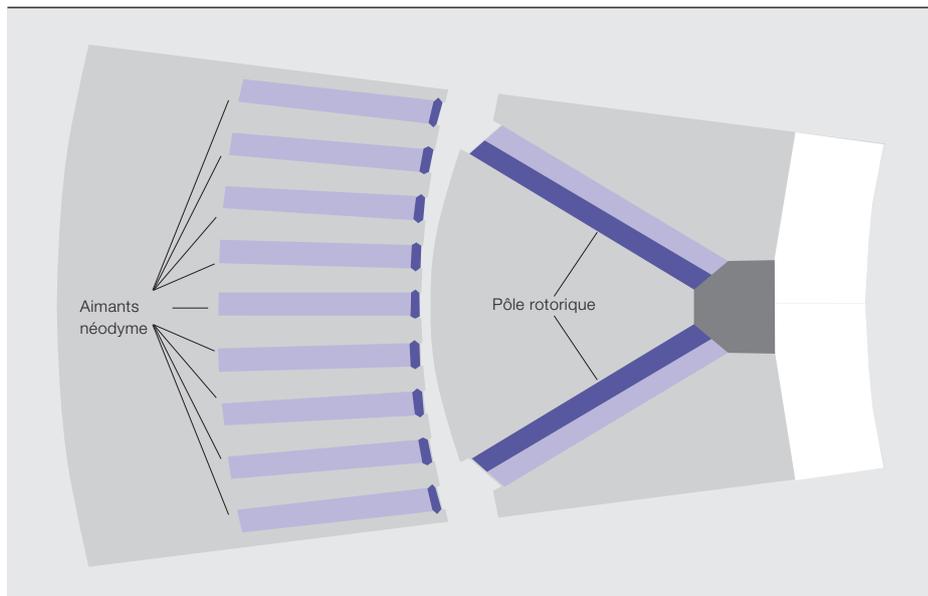




# Le vent tourne

Conception et essai d'un système aéro-générateur de 7 mégawatts

ERKO LEPA, TOBIAS THURNHERR, ALEXANDER FAULSTICH – Partout dans le monde fleurissent les éoliennes... Ces lourds investissements obligent à choisir le meilleur de la technologie! Si le marché des aéro-générateurs a jusqu'ici été dominé par les machines asynchrones à double alimentation (MADA), les solutions intégrant des convertisseurs de puissance gagnent du terrain. Sur ce créneau, la moyenne tension (MT) et la moyenne vitesse (MV) offrent les meilleures caractéristiques pour les exploitations éoliennes de grande envergure: les systèmes MT constituent en effet une solution à faible courant qui minimise les pertes Joule, facilite la conception de la génératrice et permet d'exploiter un convertisseur MT robuste à haute disponibilité, quand la moyenne vitesse surclasse toutes les autres solutions aux rangs de la compacité, de la légèreté et du rendement énergétique. Concevoir soigneusement les composants d'un aéro-générateur est économiquement avantageux, comme l'illustrent ici la réalisation et les essais d'intégration d'une unité de 7 mégawatts (MW).



Les solutions à double alimentation et à convertisseur électronique de puissance ont le vent en poupe dans le grand éolien. Elles se distinguent principalement par le type et la taille de la génératrice, ainsi que par la fonction du convertisseur. Longtemps dominante, la première se voit grignoter des parts de marché par la seconde. Plusieurs facteurs expliquent cette évolution, dont les nouvelles règles de couplage au réseau (*grid code*) et l'optimisation de la puissance prélevée à faibles vitesses de vent.

Dans la solution à électronique de puissance, le convertisseur découple la génératrice et la transmission mécanique du réseau; toute la puissance produite est injectée dans le réseau par l'intermédiaire du convertisseur qui régule la génératrice en couple et en vitesse.

Trois techniques de conversion de puissance sont aujourd'hui utilisées, chacune avec un ensemble multiplicateur-génératrice différent: à basse vitesse

(encore appelée « attaque » ou « entraînement » direct), à moyenne vitesse et à haute vitesse. Toutes trois privilégient deux grandes familles de génératrices: les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) et les machines asynchrones à cage d'écureuil (MACE).

#### Conversion basse vitesse

Cette technologie à entraînement direct, sans multiplicateur, exploite des génératrices de grand diamètre (machines synchrones à aimants ou à excitation séparée avec un seul palier) tournant à la vitesse maximale de 30 tours par minute (tr/min).

#### Conversion moyenne vitesse

On utilise ici un multiplicateur à un ou deux étages accouplé à une MSAP compacte tournant à la vitesse nominale de 100 à 500 tr/min. Vitesse réduite et multiplicateur intégré ménagent la mécanique et limitent l'encombrement.

#### Conversion haute vitesse

Cette solution à environ 1000–2000 tr/min, mécaniquement similaire à la double alimentation, met en œuvre un multiplicateur traditionnel à trois étages. À son faible encombrement s'ajoutent les avantages de la légèreté.

#### Choix de la topologie

Chaque solution résultant d'un compromis masse/taille/maintenance, la chaîne de conversion doit être judicieusement choisie en tenant compte de toutes les contraintes de l'aérogénérateur, des exi-

gences de certification et des règles de couplage au réseau.

#### Dimensionnement en tension

Ce n'est pas le choix de la vitesse qui détermine la tension réseau mais le niveau de puissance requis. Les génératrices débitant jusqu'à 3 MW fonctionnent généralement en basse tension (690 V, par exemple). Au-delà, la moyenne tension (3,3 kV, par exemple) a du bon, en particulier pour réduire le courant du convertisseur et minimiser ainsi les pertes Joule. La construction et l'approvisionnement en pièces de l'aérogénérateur s'en trouvent également simplifiés.

#### Vitesse de rotation de la génératrice

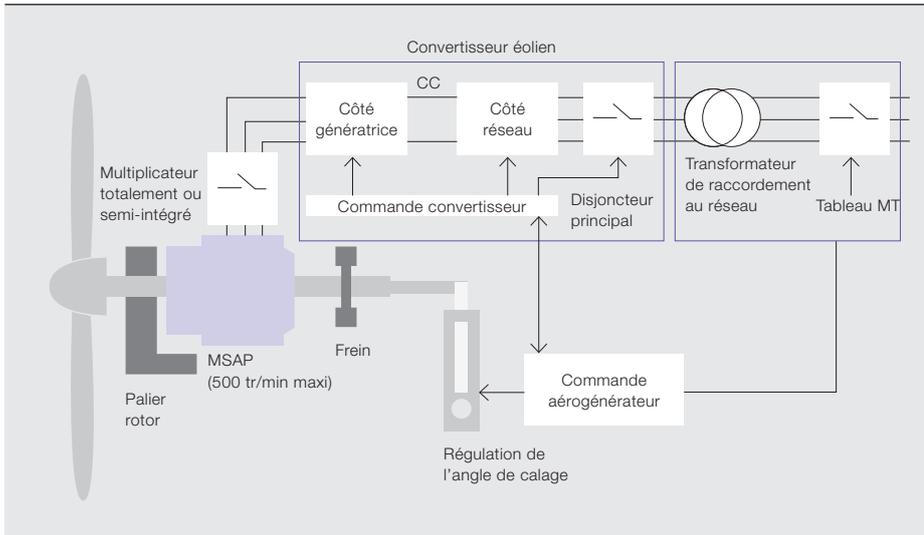
Le choix de la vitesse dépend des caractéristiques de la chaîne électromécanique (multiplicateur, génératrice, convertisseur et transformateur, par exemple).

#### Questions d'investissement...

Selon l'exécution et la puissance de l'aérogénérateur mais aussi les exigences du réseau et le prix des matériaux, la solution haute vitesse est celle qui demande habituellement le moins d'investissement. La basse vitesse à entraînement direct est d'ordinaire la plus onéreuse, et la moyenne vitesse légèrement plus chère que la haute vitesse. Néanmoins, les coûts de maintenance, la disponibilité et la distribution annuelle des vents contribuant également au coût global du système, seule une analyse de tous ces facteurs peut déterminer la solution la plus avantageuse.

#### Photo p. 24

Choisir LE bon système aérogénérateur, comme cette génératrice à aimants permanents tournant à moyenne vitesse et refroidie à l'eau, procure bien des avantages sur la durée de vie d'une éolienne. Mais quels sont les choix de conception décisifs ?



## Les machines synchrones à aimants permanents affichent un rendement record de plus de 98 %.

### ... et de rendement

Les calculs montrent que le duo MV-MSAP affiche un rendement record au point nominal : plus de 98 %. Ce rendement est également élevé sous charges partielles et vent faible, autorisant la plus haute production annuelle d'énergie en kilowattheures. Sans compter que les multiplicateurs sont facilement intégrables pour réaliser une solution compacte et que la plus faible vitesse de rotation diminue l'usure des organes de transmission.

### Type de génératrice

Le facteur de puissance d'une machine asynchrone (MAS) décroît à mesure que le nombre de pôles augmente et que le pas polaire diminue. Les MAS à faible nombre de pôles concurrencent donc les machines synchrones (MS) dans les applications HV. En moyenne vitesse, le rendement des MAS est nettement inférieur. En général, les performances de la génératrice sont proportionnelles à son diamètre. Les MS pouvant avoir un plus grand nombre de pôles, il est possible d'augmenter le diamètre de l'entrefer et

de disposer de plus de liberté dans le dimensionnement de la fréquence nominale.

Les machines synchrones à excitation bobinée rapide ou par aimants permanents se réservent le domaine de la basse vitesse. Leur rendement est excellent jusqu'à des vitesses de vent de 8 m/s, soit environ 0 à 40 % de la puissance nominale de l'aérogénérateur ; au-delà, elles sont fortement concurrencées par d'autres solutions.

Les MSAP cumulent les avantages d'un rotor plus léger, d'un meilleur rendement et d'une plus petite taille en l'absence de système d'excitation : l'idéal pour l'entraînement direct.

### Le créneau de la moyenne vitesse

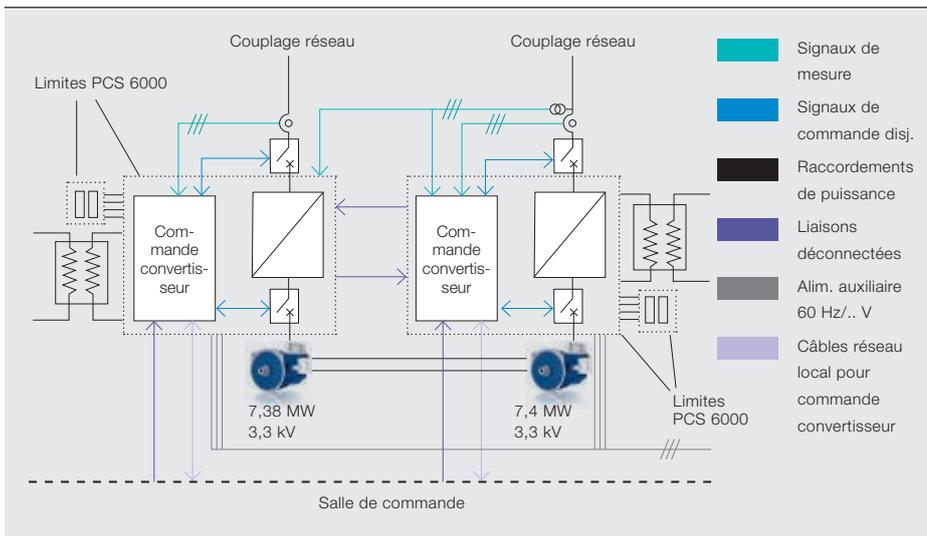
Plusieurs critères présidèrent à la conception et à l'essai d'un ensemble convertisseur-MSAP moyenne vitesse de 7 MW :

- La longue distance qui sépare la génératrice du transformateur et la turbine de forte puissance amenèrent à choisir une MSAP associée à un convertisseur MT ;
- Les calculs démontrèrent la faisabilité des solutions à 14–20 pôles sous l'angle des performances et de la fabrication. Des constructions à 16 et 18 pôles étaient similaires, à quelques petites différences près en matière de pertes, de facteur de puissance, de force contre-électromotrice et de masses actives. La solution à 18 pôles l'emporta du fait des inductances et de l'angle de charge légèrement inférieurs ;



- Des calculs, optimisations et analyses poussés aboutirent à un pôle rotorique en V → 1. Sur la base de simulations de charge soudaine et de courts-circuits avec différentes propriétés d'aimants et températures, on opta pour des néodymes à force coercitive intrinsèque élevée ;
- En conception, il importe d'identifier les fréquences de résonance potentiellement dangereuses pour la mécanique et d'assurer un amortissement et une raideur suffisants pour tolérer les forces en jeu. Il faut également pouvoir adapter la stratégie de modulation et la fréquence de découpage. On sait d'expérience qu'une modification d'environ 50 Hz de la fréquence de découpage décale la fréquence d'excitation du point résonant, réduisant considérablement les nuisances sonores et vibratoires.

## 4 Montage dos à dos



### Convertisseur

Le convertisseur de cet aérogénérateur de 7 MW exploite un IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*) trois niveaux à point neutre clampé, qui allie les faibles pertes par conduction et la fiabilité d'un thyristor entièrement commandable à l'extinction. La tension nominale

réseau par l'intermédiaire du second convertisseur. Dans cette configuration, seules les pertes du système complet doivent être couvertes par le réseau. Elle permet de faire tourner la génératrice à la puissance nominale, à condition que le convertisseur « moteur » soit capable de fonctionner à la puissance

nominale de l'aérogénérateur et puisse couvrir les pertes totales de l'installation.

L'échauffement de la génératrice fut conforme aux calculs et les températures finales des composants du

Un courant plus faible se traduit par moins de pertes Joules et plus de facilité dans la conception et l'approvisionnement en pièces.

convertisseur (3,3 kV) permet non seulement de réduire le câblage et les pertes Joule par rapport à un convertisseur à plus faible tension de sortie, mais aussi les points de défaillance, compte tenu du moins grand nombre de semi-conducteurs utilisés. La modularité des convertisseurs PCS 6000 d'ABB → 2 autorise un agencement sur mesure des composants → 3, que l'appareil soit logé dans le mât, la nacelle ou une enceinte extérieure.

### Intégration

L'essai d'intégration porta sur deux génératrices accouplées et reliées chacune au réseau par un convertisseur de fréquence → 4 : un PCS 6000 pilotait la génératrice raccordée en mode « moteur principal », laquelle pilotait l'autre génératrice réinjectant la puissance dans le

convertisseur restèrent inférieures aux limites. La tension à vide de la génératrice, moins élevée que la valeur calculée, réduit le facteur de puissance de la génératrice. Malgré cela, les principales caractéristiques assignées de la génératrice furent conformes aux calculs. L'essai de court-circuit triphasé après échauffement montra que les aimants de la génératrice étaient, comme prévu, protégés de la démagnétisation. Les mesures de vibrations et d'émissions sonores furent bien inférieures aux prescriptions CEI. La génératrice afficha un rendement de 98,17 % au point nominal, dépassant même les attentes à d'autres points de charge.

On testa plusieurs fréquences de découpage sur toute la plage de vitesse, dans différents modes de modulation. Les

meilleurs résultats furent obtenus avec une fréquence porteuse MLI (modulation de largeur d'impulsions) fixe de 720 Hz ou plus, sur toute la plage de vitesse, en asynchrone. Le mode asynchrone donna de bons résultats car la fréquence de commutation et ses bandes latérales ne rencontrèrent aucun point de résonance dangereux, quelle que soit la vitesse de rotation.

La moyenne vitesse l'emporte sur la basse vitesse dans les applications éoliennes de plusieurs mégawatts. C'est une solution à faible courant qui minimise les pertes Joule, facilite la conception de la génératrice et permet d'utiliser un convertisseur MT robuste à haute disponibilité. Équipée de MSAP, elle est compacte, légère et offre le plus haut rendement proche du point nominal. Des essais de chaîne de conversion électrique dos à dos montrèrent que l'ensemble génératrice-convertisseur ABB remplit les exigences du client et de la normalisation CEI. Les écarts entre calculs théoriques et mesures effectives restèrent dans des limites acceptables.

L'association moyenne vitesse-moyenne tension accumule les avantages, tant pour le constructeur éolien, client d'ABB, que pour l'exploitant du parc et le consommateur final.

#### Erko Lepa

ABB Discrete Automation and Motion,  
Motors and Generators  
Helsinki (Finlande)  
erko.lepa@ee.abb.com

#### Tobias Thurnherr

Alexander Faulstich  
ABB Discrete Automation and Motion,  
Power Conversion  
Turgi (Suisse)  
tobias.thurnherr@ch.abb.com  
alexander.faulstich@ch.abb.com