

1 Unité de cogénération à microturbine ABB MT100

Microturbines: un nouvel élan pour la production décentralisée de chaleur et d'électricité

Anders Malmquist, Ola Aglén, Edgar Keller, Marco Suter, Jari Wickström

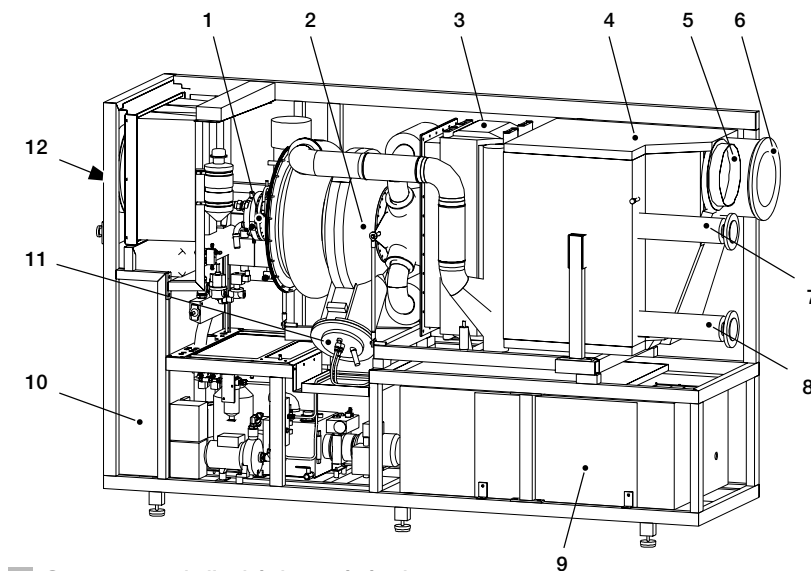
Moins de grandes centrales électriques et de lignes aériennes, une utilisation plus efficace des ressources naturelles, une électricité meilleur marché: c'est désormais possible avec un tout nouveau concept de production décentralisée d'énergie. La clé de son succès? La microturbine, petite turbine à haut rendement fonctionnant au gaz naturel ou au biogaz. Capable de produire même plus de chaleur que d'électricité, c'est une source de production d'énergie parfaitement adaptée à un large éventail d'installations: hôpitaux, hôtels, centres commerciaux et usines. Grâce aux systèmes de communication, ces microturbines peuvent être interconnectées pour élaborer des solutions en réseau qui révolutionneront la production et la fourniture d'énergie.

Dans le cadre de sa stratégie, ABB Distributed Power Generation a créé, en 1998, une joint-venture à parité avec Volvo Aero Corporation pour développer une nouvelle génération de microturbines. Ce partenariat s'appuie sur l'expérience de Volvo dans les véhicules hybrides (électrique/turbine à gaz) et sur celle d'ABB dans la production et la conversion de puissance haute fréquence [1, 2].

Le premier produit issu de cette nouvelle société, appelée Turbec AB, est la microturbine ABB MT100 pour la production combinée de chaleur et d'électricité **1**. Fonctionnant au gaz naturel, la microturbine ABB MT100 produit 100 kW d'électricité et 167 kW d'énergie thermique. Le cœur de la nouvelle ABB MT100 est une petite turbine à gaz montée avec un compresseur sur une ligne d'arbre unique et intégrée à un nouveau générateur grande vitesse, le HISEM 110/70.

Un produit innovant aux nombreux avantages

De technologie relativement récente, les microturbines devraient connaître un succès certain au fur et à mesure du développement du marché et de la réduction des coûts résultant de leur commercialisation. Les facteurs susceptibles d'accélérer leur acceptation par le marché sont:



2 Composants de l'unité de cogénération

- 1 Générateur, 2 Moteur de turbine à gaz, 3 Récupérateur, 4 Echangeur thermique des gaz d'échappement, 5 Sortie de l'air de ventilation, 6 Sortie des gaz d'échappement, 7 Arrivée d'eau, 8 Sortie d'eau chaude, 9 Electronique de puissance, 10 Système de contrôle-commande, 11 Chambre de combustion, 12 Prise d'air

- Conformité aux normes antipollution les plus récentes
- Compacité et légèreté (elle passe par une porte standard)
- Faible niveau de bruit
- Maintenance minimale
- Télégestion sans surveillance sur site
- Dépenses d'investissement réduites du fait de l'effet de série et de sa simplicité de conception
- Souplesse dans le choix du combustible
- Rendement élevé

Une microturbine dédiée à la nouvelle ère de la production décentralisée

La microturbine ABB MT100 est une unité de cogénération, produisant simultanément de l'énergie électrique et thermique. Intégrée dans le caisson illustré à la figure **2**, elle fonctionne au gaz naturel et peut inclure un compresseur en fonction de la pression de ce dernier. Conçue pour s'implanter en intérieur, la microturbine ABB MT100 prélève

l'air sur une prise extérieure. Ses principaux composants sont:

- Moteur de turbine à gaz et récupérateur
- Générateur électrique
- Système électrique

■ Échangeur thermique exposé aux gaz d'échappement

■ Système de supervision et de commande

Les caractéristiques techniques de l'unité de cogénération figurent au *Tableau 1*.

Tableau 1: Unité de cogénération ABB MT100 – caractéristiques de base

Caractéristiques	Données
Dimensions	
Largeur	840 mm
Hauteur	1900 mm
Longueur	2900 mm
Poids	2000 kg
Niveau de bruit	70 dB (A) à 1 mètre
Performances¹⁾	
Puissance électrique nette	100 kW
Rendement électrique net	30 %
Puissance thermique nette (eau chaude)	167 kW
Rendement net global	80 %
Emissions de gaz d'échappement par volume (15% O₂ et charge: 100%)	
NO _x	<15 ppm v
CO	<15 ppm v
Hydrocarbures non brûlés	<10 ppm v
Entrée d'air ambiant	
Température de l'air	- 25 °C à +40 °C
Humidité de l'air	0-100%
Pression de gaz	6/9,5 bar (a)
Indice de Wobbe	45–55 MJ/m ³
Débit-masse à charge de 100 kW (39 MJ/kg)	31 Nm ³ /heure
Air environnant	
Température	0 °C à +40 °C
Humidité air environnant	0-80%
Débit des gaz d'échappement	0,79 kg/s
Température des gaz d'échappement	55 °C
Température de l'eau en entrée	50 °C
Température de l'eau en sortie	70 °C

¹⁾ Selon exigences ISO et en prenant en compte la consommation et les pertes électriques de tous les auxiliaires, y compris le compresseur de gaz.

Conception et fonctionnement

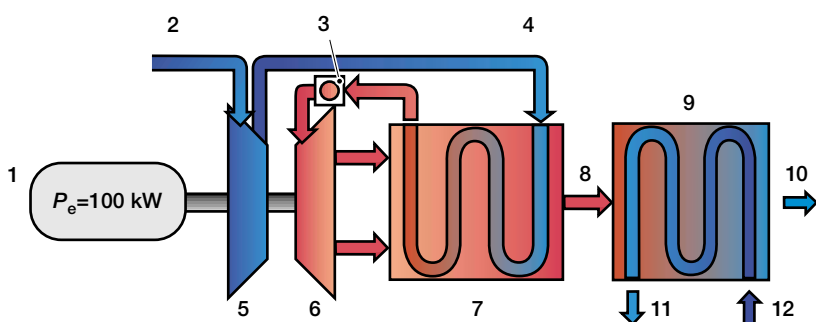
Dans la microturbine, une roue de turbine entraîne une roue de compresseur montée sur la même ligne d'arbre **3**. Le compresseur introduit de l'air dans la chambre de combustion dans laquelle le combustible est injecté en continu. Le flux de gaz chaud se détend dans la turbine. Une part importante de l'énergie thermique se transforme ainsi en énergie mécanique qui entraîne le compresseur et la charge. Dans les centrales électriques classiques, la charge est un générateur à deux ou quatre pôles entraîné par l'intermédiaire d'un engrenage démultiplicateur. La vitesse de rotation du générateur est fixe car synchronisée à la fréquence d'un réseau électrique. Dans le cas de la microturbine ABB MT100, le générateur grande vitesse est couplé directement à l'arbre de la turbine, un convertisseur statique de fréquence assurant la régulation électronique de la vitesse.

L'énergie thermique excédentaire peut être évacuée par la cheminée, mais ce type de turbine à gaz a un rendement médiocre, sauf si on ajoute plusieurs étages de compresseur et de turbine. Dans la microturbine ABB MT100, cet inconvénient est supprimé par un récupérateur qui collecte la chaleur des gaz d'échappement et l'utilise pour préchauffer l'air comprimé avant son entrée dans la chambre de combustion. Il faut alors moins de combustible pour atteindre la température de fonctionnement souhaitée. Un autre échangeur thermique, situé en aval du récupérateur, chauffe l'eau du circuit externe.

Les émissions polluantes de la turbine à gaz sont très faibles car la combustion en continu est parfaitement maîtrisée. La chambre de combustion externe peut également être optimisée pour un faible niveau d'émissions.

3 Microturbine ABB MT100: processus thermodynamiques

1 Générateur, 2 Prise d'air, 3 Chambre de combustion, 4 Air vers le récupérateur, 5 Compresseur, 6 Turbine, 7 Récupérateur, 8 Gaz d'échappement, 9 Echangeur thermique des gaz d'échappement, 10 Sortie des gaz d'échappement, 11 Sortie d'eau chaude, 12 Arrivée d'eau



Les turbines à gaz sont souvent «à géométrie variable»: des aubes réglables régulent l'écoulement du gaz vers la turbine et le compresseur, permettant de maîtriser le point de fonctionnement de la turbine. Ici encore, les concepteurs de la microturbine ABB MT100 ont adopté une démarche différente. Le système de production d'énergie électrique,

avec son convertisseur de fréquence, autorise un fonctionnement à vitesse variable et donc une régulation de la production d'énergie en faisant varier la vitesse de la turbine dans une large plage. On peut alors choisir un modèle de turbine plus simple, avec un impact positif sur les coûts. Pour une description détaillée de la microturbine et une description générale des

turbines à gaz, cf. respectivement [3] et [4] de la bibliographie.

Moteur de turbine à gaz

La turbine à gaz est un moteur à ligne d'arbre unique dont les principaux composants sont:

- Caisson
- Compresseur
- Récupérateur
- Chambre de combustion
- Turbine
- Echangeur thermique des gaz d'échappement

Caisson: Le générateur et les organes en rotation de la turbine à gaz sont montés sur la même ligne d'arbre. Les pièces du moteur et l'arbre sont contenus dans un même carter.

Petite cogénération, grands avantages

A la suite de la transformation du Groupe ABB en entreprise du savoir, la nouvelle entité ABB Distributed Power Generation a été créée pour servir un marché énergétique en pleine mutation.

Au lieu de vendre des solutions matérielles, cette nouvelle entité propose des prestations et contrats de services dans le domaine de l'énergie (électricité, chaleur, froid).

Vendre des services plutôt que des produits signifie conjuguer technologies et financement. ABB Distributed Power Generation installe, chez ses clients, des petits moyens de production d'énergie dont elle reste propriétaire, qu'elle commande et gère à distance, et dont elle assure la maintenance en tant que de besoin. Les clients ne paient que la puissance délivrée, gardant ainsi leurs possibilités de financement pour leur métier de base créateur de valeur ajoutée.

Quels sont les autres avantages pour les clients? D'abord un avantage économique en renforçant leur compétitivité face à la concurrence. Nous leur offrons de produire, en interne, une énergie moins chère qu'avec les solutions traditionnelles, évitant les coûts de transport et de distribution tout en fournissant un sous-produit utile: la chaleur.

Autre avantage, peut-être plus important encore: la qualité de l'alimentation électrique et la sécurité. Bien que relativement

moins fréquentes, des coupures de courant se produisent encore occasionnellement. Chacune d'elles présente des risques importants pour les activités du client et, par conséquent, pour ses résultats financiers. L'installation d'une microturbine, raccordée au réseau de distribution public, rend les coupures de courant extrêmement improbables, sécurisant et fiabilisant les machines, les procédés et les systèmes informatiques du client, de même que son bilan financier.

En résumé, ABB propose un service énergétique meilleur marché et plus performant que les solutions concurrentes et qui ne nécessite aucune dépense d'investissement de la part du client. Il est parfaitement adapté aux immeubles de bureaux, centres commerciaux, serres de culture, réseaux électriques faibles, hôpitaux, centres de loisirs, etc.

Dans certaines régions, les réseaux de transport et de distribution sont en limite de charge et les réglementations environnementales ou autres risquent de rendre leur extension longue et fastidieuse. Grâce aux technologies de l'information les plus récentes (ex., Internet), de nombreuses microturbines et autres moyens de production décentralisée d'électricité, peuvent être interconnectés et commandés par un opérateur chargé de gérer ce qui n'est autre qu'un vaste «réseau électrique virtuel».

4 Schéma de principe de la production d'énergie électrique

1 Générateur, 2 Redresseur/convertisseur de démarrage, 3 Circuit intermédiaire, 4 Convertisseur, 5 Filtre réseau, 6 Filtre CEM, 7 Disjoncteur principal

Compresseur: Dans la microturbine ABB MT100, un compresseur centrifuge radial comprime l'air ambiant. Le rapport de compression est de l'ordre de 4,5:1. Le compresseur est monté sur la même ligne d'arbre que la turbine et le générateur.

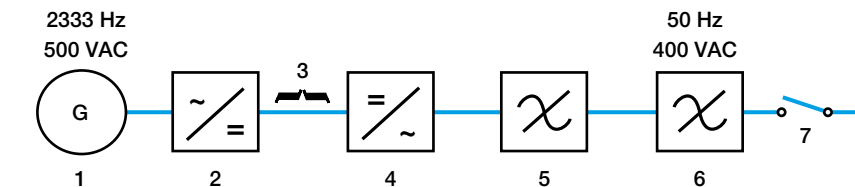
Récupérateur: Le récupérateur est un échangeur thermique gaz/air fixé à la micro-turbine dont il accroît le rendement en transmettant la chaleur des gaz d'échappement à l'air comprimé alimentant la chambre de combustion.

Chambre de combustion: L'air comprimé préchauffé est mélangé au gaz naturel. Un allumeur électrique enflamme ce mélange dans la chambre de combustion. Celle-ci est à prémélange pauvre, elle garantit donc de faibles émissions de NO_x, CO et hydrocarbures non brûlés dans les gaz d'échappement.

Turbine: La turbine radiale entraîne le compresseur et le générateur à une vitesse nominale de 70 000 tr/min. En sortie de la chambre de combustion, la température des gaz de combustion avoisine les 950°C, pour une pression de 4,5 bar environ. Au fur et à mesure que les gaz se détendent dans la turbine, la pression redescend vers le niveau de pression atmosphérique et la température chute pour atteindre environ 650°C.

Echangeur thermique des gaz

d'échappement: L'échangeur thermique des gaz d'échappement est un échangeur de type gaz/eau à contre-courant. Il transfère l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement, qui pénètrent dans



l'échangeur à 270°C environ, vers le circuit d'eau chaude. La température de l'eau en sortie dépend de ses caractéristiques à l'arrivée (température d'entrée et débit-masse). Les gaz d'échappement quittent l'échangeur pour la cheminée par un conduit d'évacuation.

Système de supervision et de contrôle-commande

La microturbine ABB MT100 est commandée et surveillée automatiquement par le contrôleur de module de puissance PMC (*Power Module Controller*). En fonctionnement normal, l'unité de cogénération ne nécessite donc aucune surveillance. En cas de défaut critique, le contrôleur PMC commande soit un arrêt normal, soit un arrêt d'urgence, selon le cas. Un protocole de défaut est enregistré par le contrôleur PMC et s'affiche sur l'écran du panneau de commande.

La turbine à gaz et le système de production d'électricité sont pilotés et commandés automatiquement par le contrôleur PMC. Pour ce faire, il dispose de données collectées par plusieurs capteurs, à savoir:

- Demande en chaleur
- Demande en puissance électrique
- Pression de gaz
- Température de l'huile
- Vibrations
- Vitesse

Système de production d'énergie électrique à grande vitesse

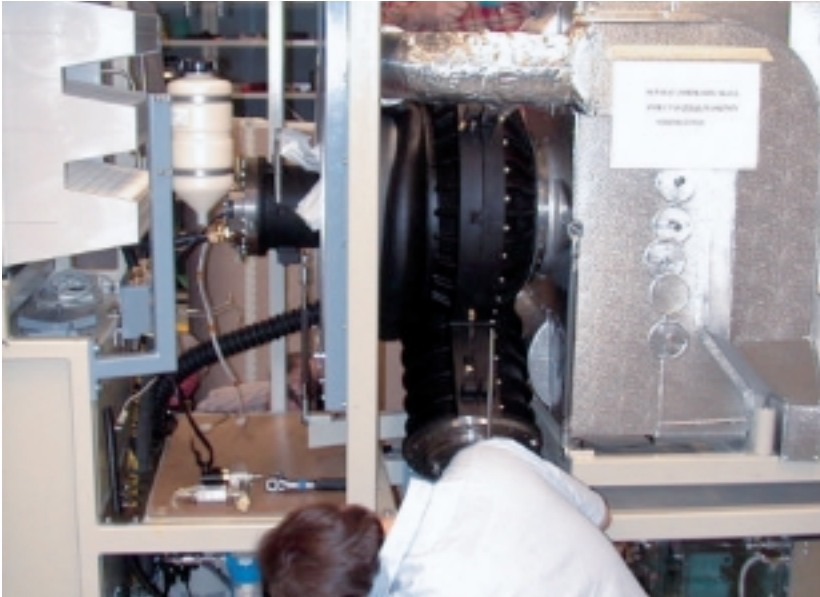
Les petites turbines à gaz sont particulièrement performantes lorsqu'on supprime l'engrenage servant à ramener la vitesse de l'arbre de la turbine à celle des machines électriques classiques. Ces performances se traduisent en termes de rendement, compacité et fiabilité. Avec ce type de système, la vitesse de rotation de l'arbre est normalement supérieure à 30 000 tr/min, pouvant même dépasser les 100 000 tr/min.

Les aimants permanents haute énergie et les matériaux très résistants à la déformation sont les plus modernes et ont fait leurs preuves dans les machines électriques tournant à grande vitesse. Par exemple, l'emploi d'aimants au néodyme-fer-bore (NdBFe) réduit les pertes rotor du générateur.

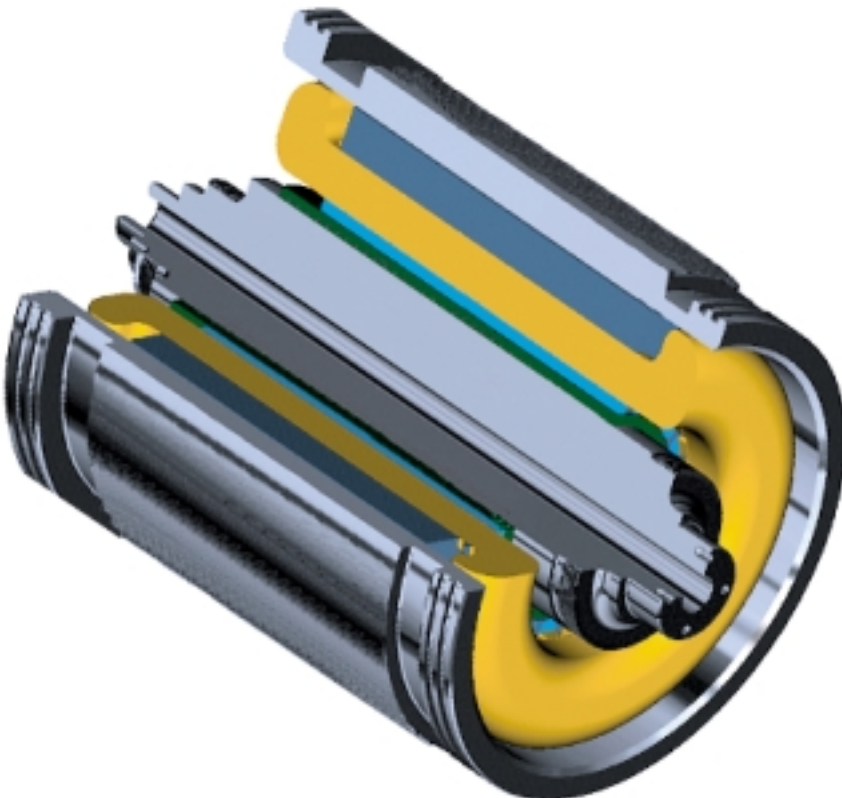
L'une des conditions préalables au couplage mécanique direct est la conversion de fréquence à haut rendement. Les transistors IGBT (transistors bipolaires à grille isolée) autorisent non seulement ce haut rendement énergétique, mais peuvent également être conduits à une fréquence de pulsation élevée appropriée. Les machines dotées de ces composants semi-conducteurs sont adaptées pour certaines applications à grande vitesse.

L'un des atouts du générateur grande vitesse est la diminution de sa taille en proportion directe avec l'accroissement de sa vitesse. Très petit, il peut donc s'intégrer à la turbine à gaz.

5 Préparation du générateur HISEM 110/70 et de la turbine pour les essais



6 Vue en coupe du générateur HISEM 110/70



Système électrique

Avant de transmettre la puissance produite par le générateur, il faut convertir la fréquence à celle du réseau comme illustré en 4. Le courant alternatif provenant du générateur est d'abord redressé en courant continu avant d'être transformé en courant alternatif triphasé. Une inductance lisse le courant alternatif en sortie et un filtre CEM protège le réseau des harmoniques générés. Le système électrique peut également servir de source d'alimentation pour démarrer la turbine à gaz.

Générateur grande vitesse

L'énergie électrique est produite par un générateur synchrone HISEM 110/70 à aimants permanents et intégré à la microturbine comme le montre la figure 5. Le rotor est maintenu par un palier à chacune de ses extrémités; il n'y a aucun palier supplémentaire sur l'arbre de turbine. La fréquence de sortie du générateur est élevée, pouvant atteindre 2,3 kHz. Le générateur, jouant le rôle de démarreur électrique pour la turbine, démarre également l'unité de cogénération.

Conception du générateur

Sa conception est dérivée du générateur HSG100 [5] développé pour les véhicules hybrides. L'expérience tirée des applications microturbine et la nécessité de prendre en compte de nouvelles exigences ont débouché sur d'importantes améliorations (notamment en termes de fiabilité et de coûts de production). De même, l'expérience d'ABB Motors dans la production en grandes séries a été prise en compte dès la conception.

Le stator du générateur est illustré à la figure 6. Son noyau se compose de fines feuilles d'acier à faibles pertes et ses

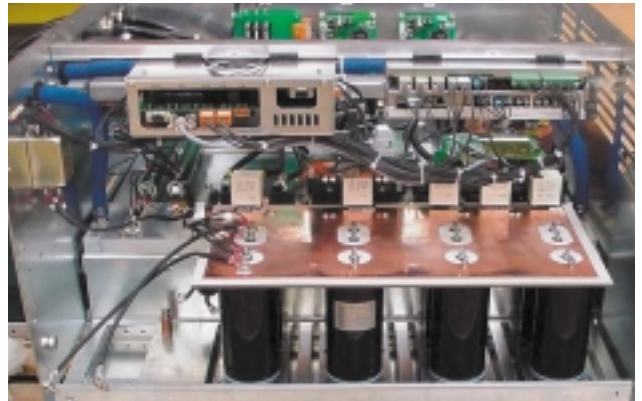
7 Rotor du générateur



enroulements sont en conducteur torsadé offrant de bonnes caractéristiques en haute fréquence. La configuration quadripolaire contribue à réduire la longueur des enroulements et à raccourcir la distance entre les paliers. Le bobinage est refroidi à l'eau. Cette particularité, plus l'imprégnation sous vide et une isolation supplémentaire, garantissent une longue durée de vie aux enroulements.

La cage du rotor (figure 7) est en acier magnétique avec les aimants permanents montés en surface. Un ruban en fibre de carbone maintient fermement les aimants en place, même à 70 000 tr/min. Les conditions de fonctionnement étant très différentes de celles des machines traditionnelles, les logiciels d'analyse classiques sont inadaptés pour la conception de cette machine électrique. Un facteur d'influence énorme est la fréquence fondamentale élevée de 2,3 kHz à 70 000 tr/min, qui invalide les paramètres des logiciels classiques (paramètres définis de manière empirique au fil des ans avec les machines de conception traditionnelle). Une stratégie de conception spéciale fut donc choisie combinant calculs analytiques et analyse par la méthode des éléments finis.

8 Convertisseur de fréquence



Le rayon du rotor, basé sur des critères de conception mécaniques, est un compromis entre une résistance au cintrage optimale et une épaisseur maximale des aimants pouvant être maintenus par un ruban d'épaisseur raisonnable. Sur la base du rayon du rotor, le rayon du noyau du stator et la longueur axiale sont déterminés par des méthodes itératives. La nature discrète de l'enroulement statorique, au nombre de spires très limité, est une contrainte essentielle.

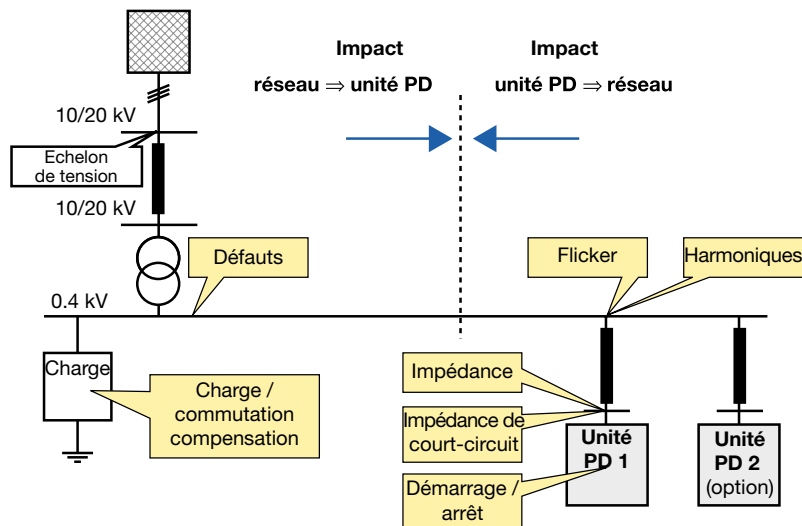
Il importe de s'assurer que le rotor n'atteigne jamais une température de démagnétisation de l'aimant. Pour ce faire, on réduit les pertes rotor tout en refroidissant efficacement l'entrefer. Le frottement dans l'air et les ondes F.m.m. (Force magnétomotrice) asynchrones dans l'entrefer sont les deux principaux facteurs d'élévation de la température du rotor. Cette dernière est principalement le fait d'harmoniques dans le courant du stator. Sachant que la rotation à grande vitesse engendre d'importantes pertes dues au frottement et que le ruban de fibre de carbone agit comme un isolateur thermique, le rotor est plus sensible aux harmoniques de courant qu'un rotor de machine classique. On a donc défini une limite d'harmoniques de courant basée sur des pertes rotor admissibles.

Convertisseur statique de fréquence

Les deux défis majeurs pour les concepteurs du convertisseur statique de fréquence furent la fréquence d'entrée élevée (2300 Hz) et l'objectif de coût du produit. Le convertisseur statique de fréquence de la microturbine est issu de la gamme des ACS 600, avec les fonctionnalités du convertisseur réseau provenant du produit ACA 635. Cependant, d'importants travaux de programmation furent nécessaires pour la mise en œuvre des fonctions d'interface et de contrôle-commande pour l'application microturbine.

L'étage d'entrée du générateur, y compris le convertisseur de démarrage, repose sur l'architecture matérielle de l'ACS 600, mais une nouvelle carte de contrôle-commande a été développée pour la régulation de la vitesse de la turbine et la commande du démarrage. En mode démarrage, le redresseur joue le rôle d'onduleur pour accélérer la turbine jusqu'à 30.000 tr/min, vitesse à partir de laquelle elle commence à produire une puissance nette lui permettant d'accélérer jusqu'à sa plage de fonctionnement de 50 000 à 70 000 tr/min. Le convertisseur de démarrage fait office de redresseur et alimente le circuit intermédiaire

9 Problèmes d'interface réseau ayant un impact sur les unités de production décentralisée (PD)



en énergie électrique. Cette dernière est ensuite injectée par le convertisseur de réseau sur le réseau de distribution.

Les convertisseurs de la série ACS 600 sont conçus pour fonctionner en environnement industriel, alors que pour les microturbines, ils doivent satisfaire les exigences des installations en zone résidentielle. Bien que les applications de production décentralisée d'électricité demeurent une «zone d'ombre» en matière de réglementation vis-à-vis du réseau, nous avons décidé d'adapter le convertisseur aux exigences de la norme EN 50081.

Même si l'architecture matérielle est basée sur la série des ACS 600, le montage mécanique a été adapté spécialement à la microturbine (cf. figure 8). Le refroidissement à eau est un des aspects primordiaux.

Analyse du système

Dans une application de microturbine type, la topologie du réseau n'est probablement pas connue, de sorte que la maîtrise de la stabilité du système constitue un réel défi. S'il faut

coordonner les moyens de production décentralisée d'énergie, le risque d'instabilité du réseau peut être significatif. Etant donné qu'il y a plus d'un régulateur, des oscillations internes peuvent même apparaître soudainement comme l'ont montré les essais effectués sur le pré-prototype d'unité de cogénération [7] du centre de recherches du Groupe ABB de Dättwil, en Suisse.

Pour éviter ce type d'instabilité, différents modèles de simulation ont été élaborés, à partir des travaux précédents sur le bus hybride [6], de la topologie du système de cogénération et de mesures. Certains de ces modèles sont temporels et servent à appréhender et étudier le système complet, de même que les dif-

férentes interfaces entre les sous-systèmes. Les problèmes possibles sont présentés à la figure 9. Il va sans dire que la microturbine ABB MT100 doit pouvoir les gérer sans subir des dégâts ni endommager les équipements extérieurs.

D'autres modèles sont fréquentiels [8], ce qui permet une analyse beaucoup plus directe et l'identification des sources d'instabilités possibles du système, principalement côté réseau. Ce travail repose sur l'expérience acquise sur les réseaux ferroviaires, où une panne provoquée par de telles instabilités s'est produite il y a quelques années [9]. Ces modèles sont définis en générant un spectre de fréquence de chacun des composants du système (ex., onduleur, topologie de réseau particulière). En combinant ces spectres et en les analysant, on localise rapidement les instabilités du système. Grâce à cette analyse, les composants, principalement les régulateurs, sont conçus pour garantir une interopérabilité stable du système complet et des éléments associés.

Concept de maintenance

L'un des principaux atouts de l'unité de cogénération ABB MT100 est sa maintenance très réduite. Les interventions de maintenance préventive (programmée) incluent des contrôles et des révisions (cf. Tableau 2). Grâce au faible nombre de pièces en mouve-

Tableau 2: Intervalles de maintenance

Type	Périodicité (h)	Indisponibilité (h)
Contrôle	6000	24
Révision	30000	48

Tableau 3: Interventions de maintenance

<i>Contrôle</i>	<i>Révision</i>
Contrôles généraux	Même procédure que dans la colonne «Contrôle»
Contrôle de la chambre de combustion et remplacement de l'injecteur de combustible	Remplacement de la chambre de combustion complète
Remplacement des consommables, apport d'huile et d'eau (si nécessaire)	Remise à neuf du moteur
Contrôle visuel général	Nouveaux roulements pour la pompe d'huile de lubrification, le ventilateur et la pompe à air comprimé
Contrôle du compresseur de gaz combustible, apport d'huile et remplacement du filtre d'huile	
Nouveaux filtres d'air	
Nettoyage de la crépine du circuit de refroidissement à eau	
Nouveau filtre d'huile de lubrification	

ment, la maintenance se limite aux tâches décrites au *Tableau 3*.

Perspectives

Le marché potentiel de la production décentralisée d'électricité est important et constitue un véritable défi. Pour le relever, nous devons

proposer un produit standard à un prix abordable, hautement fiable et sans impact sur l'environnement. La microturbine ABB MT100 satisfait ces exigences avec des éléments constitutifs issus du meilleur de la technologie ABB. S'appuyant notamment sur les technologies de l'information, la microturbine ABB

MT100 fonctionne en toute sécurité, sans supervision sur site et marque une étape importante sur la voie de la production décentralisée d'énergie électrique.

Auteurs

Dr Anders Malmquist

ABB Motors AB
SE-721 70 Västerås/Suède
anders.malmquist@se.abb.com

Ola Aglén

ABB Motors AB
SE-721 70 Västerås/Suède
ola.jw.aglen@se.abb.com

Edgar Keller

ABB Industrie AG
CH-5300 Turgi
Suisse
edgar.v.keller@ch.abb.com

Marco Suter

ABB Corporate Research Ltd
CH 5405 Baden-Dättwil
Suisse
marco.suter@ch.abb.com

Jari Wickström

ABB Distributed Power
Thurgauerstrasse 54
CH 8050 Zurich
Suisse
jari.wickstroem@ch.abb.com

Bibliographie

- [1] P. Chudi, A. Malmquist: Entraînement hybride pour automobiles. Revue ABB 9/93, 3-12.
- [2] G. Lagerström, A. Malmquist: Advanced hybrid propulsion system for Volvo ECT. Volvo Technology Report no 2, 1995.
- [3] D10365 v1 - Technical Information, Turbec AB 2000.
- [4] D.K. Mukherjee: Etat de la technique des turbines à gaz. Revue ABB 2/97, 4-14.
- [5] P. Chudi, A. Malmquist: Development of a small gas turbine driven high speed permanent magnet generator. Licentiate thesis, The Royal Institute of Technology. KTH 1989.
- [6] A. Malmquist: Analysis of a gas turbine driven hybrid drive train for heavy vehicles. Ph.D. thesis, The Royal Institute of Technology. KTH 1999.
- [7] M. Suter: Do it yourself. Akzent, ABB Switzerland, no 2/2000.
- [8] E. Moellerstedt, B. Bernhardsson: Out of control because of harmonics: an analysis of the harmonics response of an inverter locomotive. IEEE Control Systems Magazine, August 2000.
- [9] M. Meyer, J. Schöning: Netzstabilität in grossen Bahnnetzen, Eisenbahn-Revue, July-August 1999.