

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 116 (1990)  
**Heft:** 20  
  
**Artikel:** La génératrice asynchrone: une solution pour les usines hydroélectriques jusqu'à 20000 kw  
**Autor:** Kallmann, Roland  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-77310>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 12.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# La génératrice asynchrone

## Une solution pour les usines hydroélectriques jusqu'à 20 000 kW

### 1. Généralités

#### 1.1. Les petites usines hydro-électriques et leurs avantages

La demande croissante d'énergie électrique ainsi que le coût de plus en plus élevé de l'électricité exigent une meilleure exploitation des petits cours d'eau, pour une production accrue d'énergie électrique. D'autre part, un avantage économique non négligeable

PAR ROLAND KALLMANN,  
BERNE

résulte de la transformation d'anciennes usines mal utilisées, d'un mauvais rendement, dont l'entretien et la surveillance sont coûteux [5]<sup>1</sup>.

Au-delà des caractéristiques propres à une usine hydroélectrique – disponibilité dans un faible laps de temps, pas d'atteinte à l'environnement – le principal avantage de ce type d'équipement tient à ce qu'il permet une exploitation décentralisée des cours d'eau, près des consommateurs. Enfin, elle offre une solution de substitution à l'énergie fossile appelée à s'épuiser; à ce titre, elle est donc irremplaçable [8].

#### 1.2. Génératrices asynchrones ou synchrones

La génératrice asynchrone est caractérisée par une conception simple. Son rotor est en cage d'écureuil. Elle n'a pas besoin d'excitatrice propre, ni de régulateur de tension, ni de dispositif de marche en parallèle. Elle est donc tout indiquée pour être installée dans une usine télécommandée. La machine asynchrone en tant que génératrice est connue depuis 1893 [1].

Du point de vue sûreté de service, absence d'entretien et de surveillance, volume restreint, conception simple et rendement économique élevé, la génératrice asynchrone est supérieure à la synchrone.

La génératrice asynchrone entraînée par une turbine bulbe (spécialement lorsqu'elle est équipée d'engrenages multiplicateurs de vitesse) a acquis un

intérêt particulier dû principalement à ce qu'un grand volant d'inertie n'y est plus nécessaire, d'où la possible réduction du diamètre par rapport à la génératrice synchrone [9].

Dans le cas de *génératrices synchrones*, les conditions hydroélectriques exigent une masse d'inertie minimale pour assurer la stabilité du réglage de la vitesse. La masse du volant limite l'augmentation brusque de vitesse en cas de délestage soudain de la charge. Si la masse d'inertie naturelle du rotor est insuffisante, elle peut être augmentée par un volant additionnel incorporé à l'ensemble turbine/génératrice.

Les génératrices synchrones sont excitées par du courant continu alimentant le rotor par des bagues montées sur l'arbre. Le courant continu peut être fourni soit par une excitatrice accouplée à l'arbre du rotor ou par une unité d'alimentation statique. Les bagues ne sont plus nécessaires en cas d'alimentation à courant alternatif redressé par des diodes tournantes. La génératrice synchrone peut, selon sa conception, fournir au réseau de l'énergie réactive capacitive ou inductive.

Contrairement à la génératrice synchrone, la *génératrice asynchrone* ne requiert aucune excitatrice particulière. Le courant d'excitation nécessaire peut être obtenu soit par du courant réactif pris sur le réseau ou, dans le cas d'un service en îlot, par des condensateurs branchés en parallèle sur l'enroulement statorique.

Les génératrices asynchrones triphasées couplées en parallèle à un réseau rigide prélevant leur courant magnétisant de ce réseau, soit partiellement ou complètement (la compensation partielle se fera à l'aide de condensateurs) sont actuellement fabriquées jusqu'à une puissance limite de 10 000 kW. Des puissances plus élevées sont possibles, du point de vue tant technique qu'économique. Elles ne sont pas limitées pour des raisons d'abord électriques, mais pour des raisons mécaniques liées en particulier à la vitesse d'emballage.

La puissance limite d'une génératrice asynchrone dépend de plusieurs facteurs économiques: en premier lieu il faut connaître l'importance de la puissance réactive que le réseau peut fournir pour assurer l'excitation en marche en parallèle et quelle est la part qui doit être fournie par des condensateurs.

En règle générale, les condensateurs devraient assurer une compensation pour un facteur de puissance de 0,90 à 0,93. Le reste du courant réactif doit être fourni par le réseau. Tout le problème est de déterminer laquelle des deux possibilités convient le mieux du point de vue économique: courant inductif livré par le réseau, ou par des condensateurs.

#### 1.3. La génératrice triphasée asynchrone

En règle générale, tout moteur asynchrone peut fonctionner en génératrice. Compte tenu des facteurs économiques et d'exploitation, c'est la machine triphasée à rotor en cage d'écureuil qu'on utilisera de préférence.

Le moteur synchrone fonctionne en génératrice lorsque le rotor est entraîné en dessus de la vitesse synchrone du champ tournant, le glissement devient alors négatif. Le courant réactif absorbé et, par conséquent, la capacité requise des condensateurs, dépendent de la charge.

Pour une même utilisation thermique d'un moteur asynchrone en génératrice, la vitesse hypersynchrone de ce dernier sera déterminée par la vitesse synchrone plus le glissement en régime moteur. Pour une tension et une fréquence données, la puissance active fournie dépend uniquement du glissement. La vitesse s'ajuste automatiquement au couple d'entraînement disponible pour autant que le couple n'est pas supérieur au couple de décrochage de la génératrice. Dans le cas des turbines, la puissance motrice disponible dépend du débit d'eau (m<sup>3</sup>/s) et de la hauteur de chute.

Le rendement des génératrices asynchrones est légèrement supérieur à celui des génératrices synchrones d'une même puissance de la liste. Les réactances magnétisantes et de dispersion de la machine déterminent le facteur de puissance d'une génératrice asynchrone. Normalement ce facteur se situe pour la génératrice à quelque deux ou trois centièmes en dessous du facteur de puissance en fonctionnement comme moteur. Il est donc superflu de prescrire un facteur de puissance, que la génératrice soit asynchrone ou synchrone. Il est recommandé de travailler à vitesse et puissance constantes, puisque le facteur de puissance diminue fortement avec la charge.

La puissance réelle d'une génératrice asynchrone est à peu de chose près la même que la puissance absorbée en moteur asynchrone.

En tenant compte de la diminution du facteur de puissance en le multipliant par le facteur  $k$  (0,97 à 0,98) on obtient la puissance réelle  $P_n$ :

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.



$$P_n = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot k}{1000} \text{ en kW}$$

où :

$U$  = tension nominale en V  
 $I$  = courant nominal durant le fonctionnement en moteur en A  
 $\cos \varphi$  = facteur de puissance en régime moteur

La génératrice asynchrone est habituellement lancée à sa vitesse nominale avant d'être accouplée au réseau. Aucune mesure spéciale de synchronisation, telle que comparaison des phases et des fréquences, n'est nécessaire. Le courant d'enclenchement est pratiquement indépendant du nombre de tours. Il correspond approximativement au courant de court-circuit de la machine. Une composante de courant continu est encore superposée au courant alternatif de telle sorte que la pointe de courant peut être nettement plus élevée que dans le cas du court-circuit stationnaire. Lorsque la machine asynchrone est portée à sa vitesse de synchronisation et qu'elle est connectée au réseau, le courant d'enclenchement s'atténue rapidement, de telle sorte qu'en quelques fractions de seconde il se stabilise à sa valeur permanente donnée par le glissement.

Si la tension du réseau est plus élevée que celle pour laquelle la génératrice peut encore être fabriquée d'une manière économique et fiable, et en

tenant compte de sa puissance, il est recommandé de prévoir un transformateur en couplage bloc. Cette combinaison a l'avantage de réduire fortement la pointe du courant d'enclenchement par l'impédance du transformateur.

Pour atténuer le courant d'enclenchement, des résistances ou bobines de démarrage sont généralement couplées sur le point neutre de l'enroulement statorique. Pour les petites machines elles sont branchées côté réseau. Après mise en parallèle avec le réseau ces résistances ou bobines sont court-circuitées par un sectionneur verrouillé.

#### 1.4. La génératrice asynchrone en service en îlot

Pour rendre la génératrice asynchrone indépendante du réseau on utilise des condensateurs pour assurer l'excitation. En tenant compte de la vitesse et de la capacité critiques, la rémanence des machines asynchrones est à même de provoquer une autoexcitation par les condensateurs, lorsque la machine fonctionne à vide.

On peut assimiler ce cas aux dynamos autoexcitées. Pour une rémanence insuffisante on peut provoquer l'excitation par une injection de courant continu provenant d'une batterie à travers l'enroulement statorique.

Les génératrices asynchrones auto-excitées par des condensateurs sont à même de maintenir un réseau indé-

pendant s'il est parcouru par un courant principalement actif et dont la charge est plus ou moins constante. Une augmentation de la charge provoque une fluctuation de la tension, à moins que la capacité des condensateurs d'excitation ne soit adaptée en conséquence. Ces conditions ne peuvent être remplies que si la vitesse de la turbine est contrôlée par un régulateur. Cette installation complémentaire augmente les frais d'investissement, d'où des avantages économiques moins évidents pour la génératrice asynchrone par rapport à la synchrone.

#### 1.5. La marche en parallèle de génératrices asynchrones

Lorsqu'une génératrice asynchrone fonctionne en parallèle sur un réseau, l'excitation requise est assurée par le courant réactif tiré du réseau, si des génératrices synchrones ou des compensateurs sont en service sur ce réseau et que celui-ci est à même de fournir la puissance réactive requise. La fréquence du réseau est déterminée par les génératrices synchrones. L'enroulement statorique de la génératrice asynchrone est connecté au réseau et le rotor (à cage d'écureuil) est entraîné en dessus de la vitesse synchrone par la turbine. Pour une tension et une fréquence données, la puissance fournie dépend uniquement du glissement. Elle s'ajuste en fonction de la vitesse de la turbine, qui n'est que de peu supérieure à la vitesse synchrone de la génératrice.

Le facteur de puissance baissant fortement à charge partielle, on a avantage à utiliser la génératrice asynchrone à puissance constante, c'est-à-dire à sa valeur nominale.

#### 1.6. Caractéristiques des machines asynchrones triphasées

La génératrice asynchrone fournit sa puissance maximale seulement pour un glissement négatif déterminé. Si ce glissement évolue en dessus ou en dessous de ce niveau, la puissance fournie diminue rapidement (fig. 1).

Contrairement à la génératrice synchrone, la génératrice asynchrone n'est pas en mesure de fournir un courant de court-circuit permanent, cela par manque d'excitation. Une protection contre les courts-circuits internes ou proches de la génératrice est néanmoins nécessaire dans les cas où une génératrice asynchrone est couplée en parallèle sur un réseau, car le court-circuit est alimenté par le réseau (fig. 2). Une protection contre les surtensions est recommandée, même si les condensateurs d'excitation sont connectés à la génératrice par un sectionneur. On évite ainsi tout danger d'au-

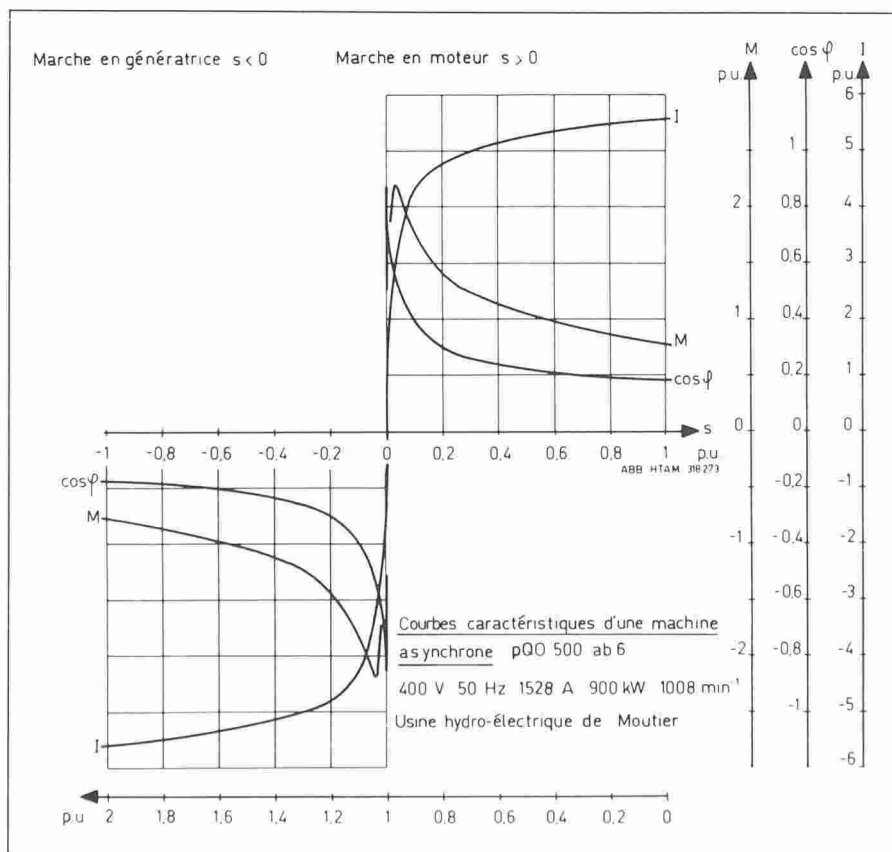


Fig. 1. - Ces courbes représentent l'évolution du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction du glissement en régime moteur et en génératrice.



toexcitation lors d'une augmentation de vitesse de la turbine. Le disjoncteur de la génératrice devra être verrouillé avec celui des condensateurs afin que leur couplage à la génératrice ne puisse se produire que si le disjoncteur de la génératrice est fermé. Le sectionneur des condensateurs doit être ouvert simultanément ou, mieux encore, juste avant l'ouverture du disjoncteur de la génératrice.

Les fluctuations de la tension du réseau provoquent à leur tour une variation du courant magnétisant de la génératrice asynchrone. Pour la protéger contre les surintensités lors de surtensions trop élevées, il est indiqué de prévoir un relais de surintensité.

Une baisse de la fréquence du réseau provoque une augmentation du glissement et par conséquent du couple de la génératrice, étant donné que la vitesse et par là même la puissance débitée s'ajustent automatiquement à la puissance fournie par la turbine. Pour éviter donc une surcharge due à la surintensité, la turbine sera munie d'un limiteur de débit qui restreindra la puissance de la turbine à la valeur correspondant à celle de la génératrice. Une augmentation de la fréquence du réseau, à tension constante, décharge la génératrice asynchrone et la turbine. Si le débit de l'eau reste constant, la vitesse de la turbine augmentera. Du fait du gradient négatif du couple, la puissance sera alors plus faible

qu'avant l'augmentation de la fréquence. Par conséquent aucune surcharge de la génératrice asynchrone ne sera possible.

### 1.7. Problèmes mécaniques

Les génératrices et moteurs asynchrones d'une même grandeur peuvent en principe être conçus en recourant à tous les types de construction, systèmes de protection et de refroidissement possibles. C'est la disposition de la turbine qui détermine l'arrangement du groupe, soit vertical, horizontal ou incliné.

La forme de construction de la génératrice dépend essentiellement de la conception de la turbine. Par exemple pour une disposition horizontale entraînée par une turbine Pelton dont la force du jet est reprise par ses propres paliers, de même que pour les turbines Francis ou Kaplan horizontales, on peut choisir la forme IM B3.

Cette forme, avec deux paliers flasques, carcasse avec pieds et bout d'arbre libre représente la conception standard préférée des machines asynchrones d'ABB pour les petites et moyennes puissances (jusqu'à environ 16 000 kW à 1000 min<sup>-1</sup> et 12 500 kW à 750 min<sup>-1</sup>). L'utilisation de composants standards réduit les coûts et les délais de livraison.

Pour les petites usines avec turbines Kaplan, la génératrice est entraînée le plus souvent par un engrenage multi-

plicateur de vitesse. Etant donné que, là aussi, la poussée hydraulique est reprise par les paliers de la turbine ou du multiplicateur, c'est la forme IM B3 qui convient aussi le mieux.

En cas de déléstage brusque de la charge et d'une panne du système de commande de la turbine simultanés, celle-ci risque d'atteindre la vitesse d'emballement. Pour les turbines Pelton et Francis, la vitesse d'emballement peut atteindre 1,8 fois la vitesse nominale et pour les turbines Kaplan environ 3 fois. En conséquence, la génératrice doit être conçue pour supporter cette survitesse.

### 1.8. Mesure du niveau d'eau et contrôle de la turbine

Comme nous l'avons vu plus haut, la puissance fournie par la génératrice asynchrone dépend de celle fournie par la turbine et elle est indépendante de la charge du réseau. La puissance de la turbine est déterminée par le débit et la hauteur de la chute de l'eau.

Afin d'atteindre une production maximale d'énergie, la turbine doit être adaptée à la force motrice de l'eau disponible. La cote du niveau d'eau est mesurée par un flotteur, un manomètre (par exemple par la méthode d'injection de bulles d'air) ou par toute autre technique. Le régulateur de niveau d'eau installé dans l'usine indiquera les valeurs suivantes :

- valeur instantanée du niveau d'eau (par exemple au moyen d'une transmission à basse fréquence)
- valeur de consigne du niveau d'eau (par exemple selon un programme préétabli)
- valeur instantanée de la puissance des génératrices asynchrones (par exemple au moyen de l'appareillage de mesure).

La puissance de consigne de la turbine sera déterminée au moyen d'un régulateur PI avec caractéristiques proportionnelles intégrales qui, avec la valeur instantanée de la puissance de la génératrice, sont transmises au régulateur de position (à trois points).

Ce régulateur transmet au dispositif de commande de la turbine l'ordre de fermeture/ouverture, jusqu'à ce que les valeurs instantanées et de consigne soient identiques.

Le réglage du niveau d'eau est nécessaire avant tout si des conditions contractuelles exigent de maintenir les niveaux amont et aval à une valeur déterminée. Au lieu de mesurer le niveau d'eau au moyen d'un flotteur, on peut également le mesurer par un manomètre installé en amont de la turbine, qui agit directement sur sa commande. Cette méthode présente l'avantage que tous les appareils nécessaires peuvent être installés dans l'usine même. Elle offre une plus grande fiabilité de service comparée à

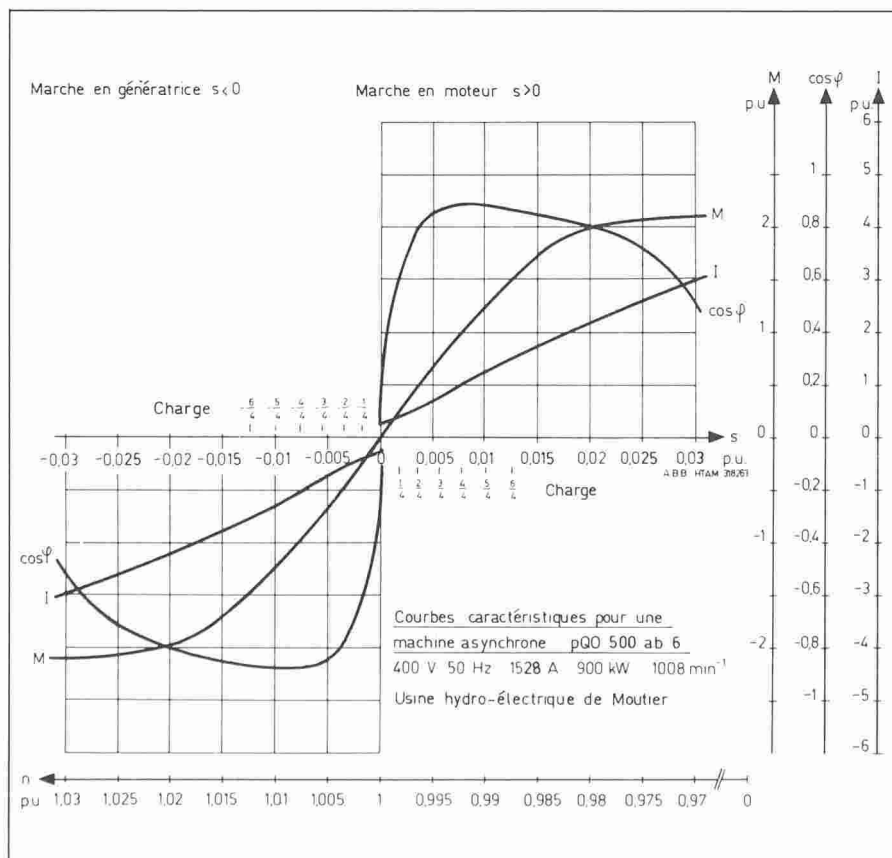


Fig. 2. – Courbe de performance entre la vitesse synchrone ( $s = 0, n = 1 \text{ pu} = 1000 \text{ min}^{-1}$ ) et le glissement ( $s_k = \pm 0,031 \text{ pu}$ ). Le domaine utilisable en permanence se situe entre la marche à vide et la charge nominale (charge  $\frac{1}{4}$ ). Les  $\frac{5}{4}$  et  $\frac{6}{4}$  de la charge ne peuvent être utilisés que durant une courte période.



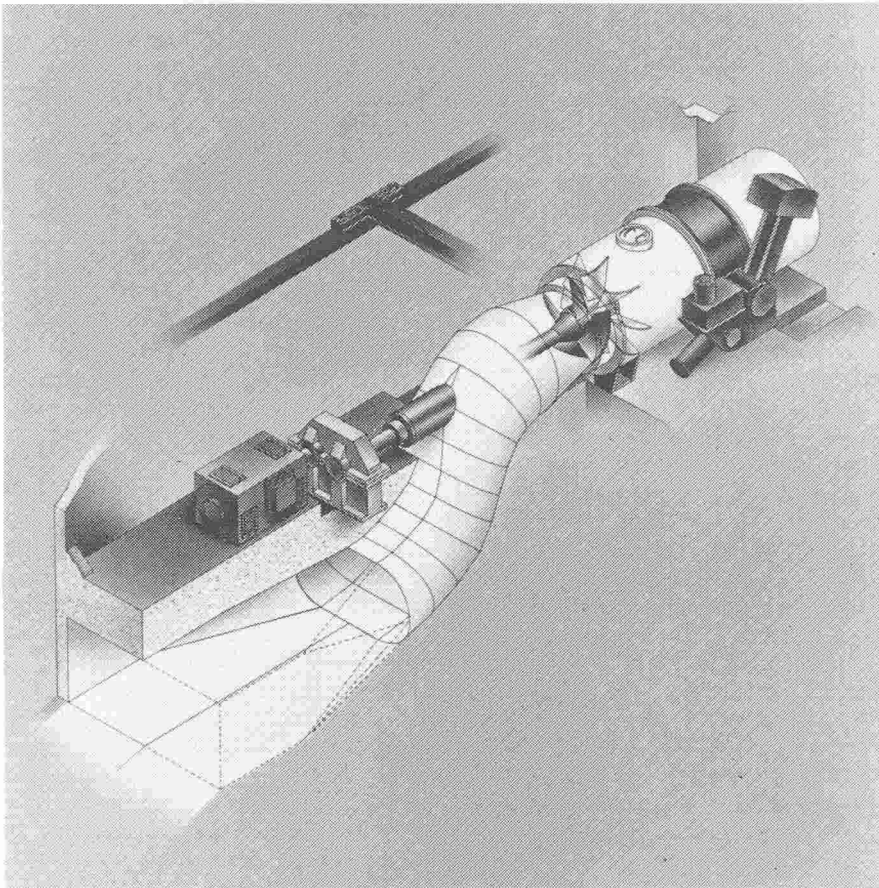


Fig. 3. – Exemple d'une configuration horizontale d'une petite usine hydroélectrique. De droite à gauche : turbine à bulbe, multiplicateur de vitesse, la génératrice dans sa version standard et la forme IM B3. ABB 201 233 C

la technique du flotteur, car elle élimine les éventuelles perturbations liées à des causes naturelles. La cote du réservoir est déterminée par la pression d'eau et une fonction non linéaire indépendante de la disposition de l'installation et de la position du distributeur. Cette fonction tient compte des pertes de charge dues à la vitesse et au frottement de l'eau dans la conduite forcée. Pour cela, un microprocesseur programmé est installé avec, en mémoire, les paramètres propres à l'usine. Une partie de ceux-ci ne peut être déterminée que par des essais lors de la mise en service.

Pour permettre l'arrêt immédiat du groupe en cas de dérangement mécanique (par exemple dégât aux paliers), le dispositif de fermeture rapide est actionné automatiquement et l'organe de coupure à l'entrée sera également fermé, s'il existe. Le disjoncteur de la génératrice sera ouvert dès que le groupe aura été délesté.

Lors de dérangements électriques requérant l'ouverture immédiate du disjoncteur de la génératrice ou lors d'une baisse de charge, l'emballement doit être freiné le plus rapidement possible. Dans ce cas, l'arrêt d'urgence est commandé par un relais de protection, soit par un contact centrifuge, soit par un tachymètre électronique. L'arrêt d'urgence comporte les fonctions suivantes :

- pour les turbines Francis, à hélice ou Kaplan, fermeture du distributeur ; dans les cas de turbines Pelton, actionnement du déflecteur et fermeture de l'injecteur ;
- ouverture immédiate du disjoncteur de la génératrice (déjà ouvert en cas de délestage) ;
- fermeture de la vanne de la turbine (s'il y en a une).

Si, pour quelque raison que ce soit, l'amenée d'eau est interrompue alors que la génératrice est accouplée au réseau, celle-ci fonctionnera comme moteur. Elle prélèvera la puissance électrique couvrant les pertes mécaniques des paliers et le frottement de l'air. Pour éviter que cette situation se prolonge, la génératrice sera déconnectée par un relais de retour de puissance avec dispositif à action retardée.

## 2. Théorie

### 2.1. La machine asynchrone comme moteur ou génératrice

La machine asynchrone est le plus souvent utilisée comme moteur. Dans ce cas le rotor tourne en hyposynchronisme par rapport au champ tournant, c'est-à-dire avec un glissement positif. Si le rotor est actionné à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone par un moyen extérieur, par exemple une

turbine, la machine asynchrone fonctionne comme génératrice avec un glissement négatif, donc hypersynchrone. Le couple à l'arbre est alors négatif, une puissance active étant fournie et une puissance réactive absorbée (fig. 1 et 2).

Une machine asynchrone fonctionne comme moteur dans le quadrant I de l'espace complexe des puissances ( $P > 0$ ,  $P_q > 0$ ) comme génératrice dans le quadrant IV de la figure 4 ( $P < 0$ ,  $P_q > 0$ ). Vu que la génératrice asynchrone ne peut elle-même fournir de la puissance réactive pour son champ magnétique, cette puissance doit être prélevée sur le réseau ou être produite par une génératrice de puissance réactive en cas d'exploitation en îlot.

### 2.2. La puissance réactive – demande et production

Pour produire le champ magnétique, les machines asynchrones requièrent une puissance réactive. Celle-ci atteint sa valeur la plus faible en marche à vide. Elle augmente avec la charge (moteur ou génératrice, fig. 4). Par rapport au courant total, le courant réactif croît avec le nombre de pôles, ce qui provoque une diminution du facteur de puissance ( $\cos \phi$ ).

Pour améliorer le facteur de puissance, on a recours principalement à des condensateurs qui délivrent une puissance réactive. Par conséquent les courbes de la figure 4 sont quelque peu déplacées vers la gauche. Ces courbes se déplacent jusque sur l'axe réel pour une compensation totale à vide ( $\cos \phi_0 = 1$ ).

A vide, le courant réactif, communément appelé « courant magnétisant », se décompose en deux parties :

- $I_{m\delta}$  est linéaire par rapport à la tension et correspond à la force magnétomotrice dans l'entrefer ;
- $I_{mfe}$  est non linéaire par rapport à la tension et correspond à la force magnétomotrice de l'empilage. La non-linéarité est due à la saturation du fer.

### 2.3. Les critères d'autoexcitation

Si des condensateurs sont prévus pour la fourniture de courant réactif, il convient d'examiner s'il y a possibilité d'autoexcitation et s'il est nécessaire d'envisager un dispositif de coupure entre les condensateurs et la génératrice asynchrone.

Une machine asynchrone entraînée a la propriété de s'autoexciter pour une fréquence déterminée lorsqu'un condensateur est connecté en parallèle, à la tension à vide correspondant au domaine de saturation de sa courbe de magnétisation. Dans les machines asynchrones, la tension rémanente nécessaire à la création de l'autoexcitation existe en général.



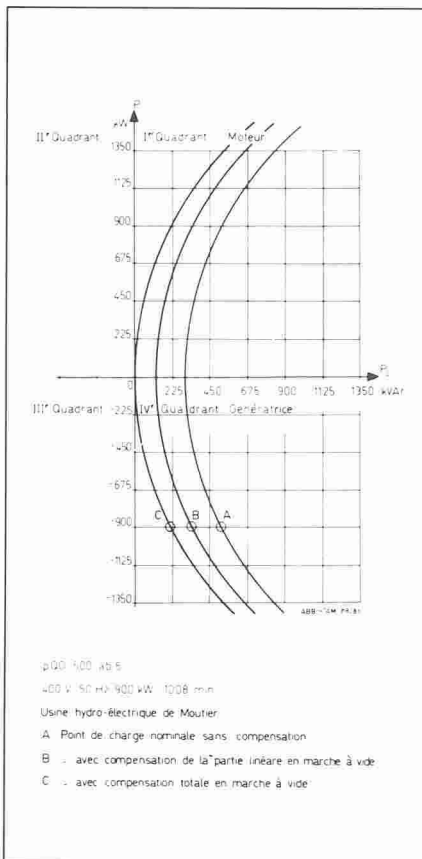


Fig. 4. – Caractéristiques d'une machine asynchrone.

Pour déterminer la présence d'auto-excitation, on prend pour critère la courbe de magnétisation propre à chaque machine asynchrone, qu'on obtient en considérant le courant de magnétisation  $I$  comme fonction de la tension aux bornes.

On tracera sur ce diagramme la caractéristique du condensateur

$$I_c = U \cdot \omega_n \cdot C$$

( $C$  = capacité en F,  $\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n$ ,  $I_c$  = courant des condensateurs en A,  $f_n$  = fréquence nominale en Hz).

Puisque  $\omega \cdot C$  sont constants à une vitesse déterminée, la courbe du condensateur est une droite.

L'autoexcitation se produira au point d'intersection de la droite du condensateur avec la courbe de magnétisation. Ce point indique quelle sera la tension qui apparaîtra à la fin du processus d'autoexcitation.

L'autoexcitation apparaîtra lorsque

$$\frac{dI_c}{dU} > \frac{dI_m}{dU} \Big|_{f=\text{constante}} \quad I_m \rightarrow 0.$$

Cette inégalité est valable sur la partie droite du courant de magnétisation  $I_m$ .

La figure 6 montre la courbe de magnétisation d'une génératrice asynchrone de 900 kW, 400 V, 50 Hz, 1008 min<sup>-1</sup> ainsi que la courbe pour deux condensateurs, respectivement pour des courants capacitifs de grandeur différente. Dans notre exemple, le courant capacitif  $I_{c2}$  (50 Hz) ne compense que la partie linéaire en marche à vide. En revanche,  $I_{c3}$  (50 Hz) com-

pense la totalité de la puissance réactive en marche à vide.

Si la génératrice asynchrone mentionnée, qui est totalement compensée en marche à vide, était couplée en parallèle à un réseau, comme indiqué à la figure 5, sa tension et sa fréquence dépendraient alors de ce réseau. La figure 6 montre clairement l'intersection de la droite du courant des condensateurs  $I_{c3}$  (50 Hz) avec la courbe de magnétisation  $I_m$  (50 Hz) au point de travail c, qui tombe dans la zone dangereuse d'autoexcitation.

Lors d'une perte soudaine de la charge, la génératrice asynchrone peut être entraînée à la vitesse d'emballement de la turbine. Ce cas doit être pris en considération pour le critère d'autoexcitation. Lors de la détermination de la caractéristique du condensateur de compensation, il faut tenir compte de la fréquence correspondant à la vitesse d'emballement  $n_d$ .

$$I_{cd} = U \cdot \omega_n \cdot \frac{n_d}{n_n} \cdot C$$

De plus, il faut déterminer la courbe de magnétisation correspondant à la vitesse d'emballement.

L'exemple suivant illustre le danger causé par une surtension provoquée par autoexcitation. Soit la génératrice asynchrone dont les données sont indiquées dans la figure 5 – totalement compensée à vide fonctionnant sur le réseau.

Pour une raison quelconque, le disjoncteur A (fig. 5) s'ouvre. La génératrice asynchrone s'emballe, entraînée par la turbine, et la fréquence monte.

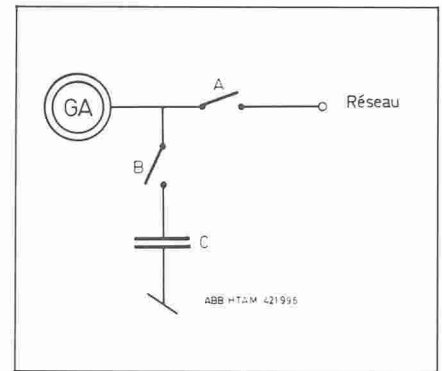


Fig. 5. – Compensation par condensateur pour une machine asynchrone.

La vitesse d'emballement monte à 1,5 fois la vitesse nominale, ce qui correspond à 75 Hz. Le courant  $I_{c3}$  augmente – la pente de la droite du courant de compensation  $I_c$  à 75 Hz est 1,5 fois plus grande que pour 50 Hz – jusqu'à l'intersection au point a (fig. 7) de la courbe de magnétisation  $I_m$  (75) et de la droite  $I_{c3}$  (75).

La puissance réactive fournie aux condensateurs doit être absorbée par la machine. La tension augmentera alors jusqu'à s'équilibrer et atteindra une valeur  $U$  aux bornes de 820 V, ce qui correspond à 2,05 fois la tension nominale. Le rapport de la surtension est plus grand que celui de la survitesse. Cette surtension peut provoquer des dommages aux bobinages et aux condensateurs et même les détruire. Dans ce cas, il est impératif que les condensateurs soient déconnectés aussitôt que le disjoncteur de la génératrice est ouvert.

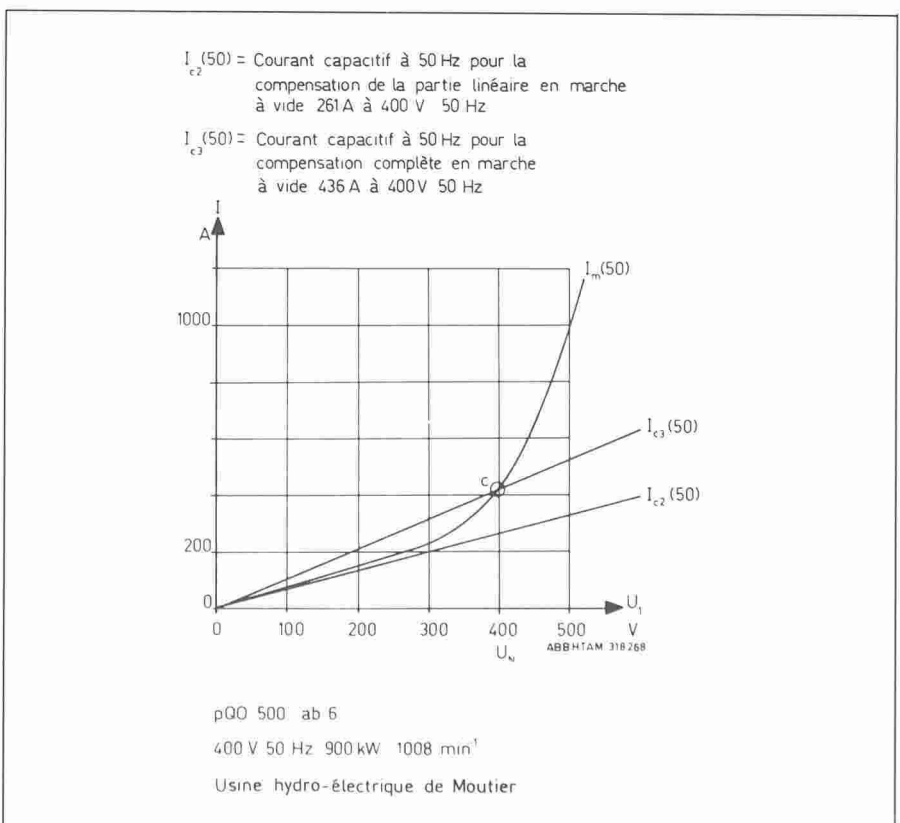


Fig. 6. – Caractéristiques à vide d'une génératrice asynchrone.

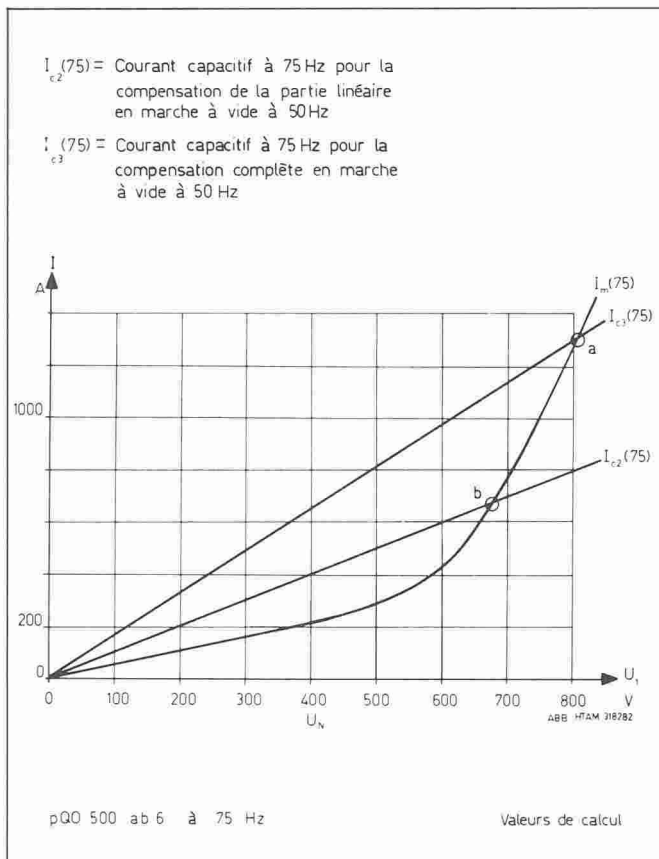


Fig. 7. - Caractéristiques à vide d'une génératrice asynchrone.

Même si seule la partie linéaire de la courbe de magnétisation est compensée (compensation partielle), il existera un danger d'autoexcitation lorsque la vitesse de la machine est plus grande que la vitesse nominale de la machine (fig. 7, point b pour  $U = 675$  V).

Pour déterminer la compensation de façon adéquate, il suffit de diminuer la valeur en ordonnée de  $I_m$  dans le domaine linéaire de la courbe de magnétisation dans le rapport  $n_n/n_d$ .

On obtient ainsi la nouvelle pente du courant de compensation et l'on peut déterminer la limite pour laquelle se produira l'autoexcitation.

Si l'autoexcitation est exclue (également à la vitesse d'emballement) lorsque des condensateurs sont couplés en parallèle, on peut supprimer le sectionneur des condensateurs et coupler directement ceux-ci à la génératrice. Si, en revanche, le risque d'autoexcitation persiste, il est impératif de prévoir un sectionneur ad hoc entre le condensateur et la génératrice. Pour s'assurer que les condensateurs soient découplés lorsque la génératrice est mise en vitesse et accouplée au réseau, il est nécessaire de prévoir un verrouillage entre le disjoncteur de la génératrice et celui des condensateurs.

Ce verrouillage doit garantir que les condensateurs seront découplés simultanément à l'ouverture du disjoncteur de la génératrice ou, mieux encore, juste avant.

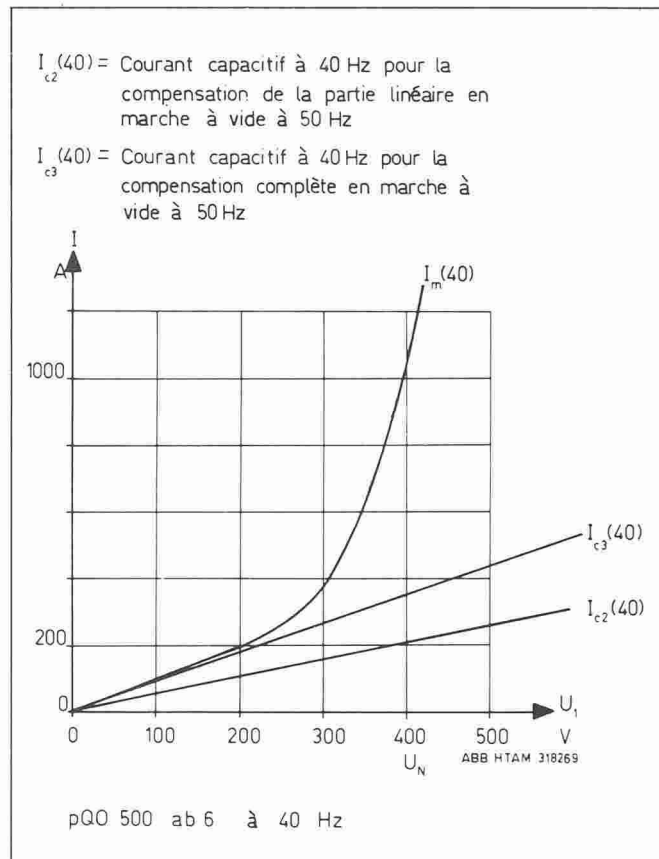


Fig. 8. - Caractéristiques à vide d'une génératrice asynchrone.

#### 2.4. Conséquence d'une chute de la fréquence lors du service en îlot

Pour un service en îlot assuré exclusivement par des génératrices asynchrones, il faut veiller à ce que la vitesse, donc la fréquence, ne tombe pas en dessous d'une certaine limite. La génératrice asynchrone de la figure 8 prévue avec condensateurs pour la pleine compensation à 50 Hz ne peut produire aucune tension à la vitesse de 800  $\text{min}^{-1}$ , soit à la fréquence de 40 Hz. La courbe de magnétisation  $I_m(40)$  de la figure 8 n'a aucun point commun avec la caractéristique  $I_{c3}(40)$  du condensateur.

### 3. Exemples de réalisation

#### 3.1. Transformation de l'usine hydroélectrique de Moutier

A Moutier (canton de Berne, Suisse), on a remplacé deux génératrices synchrones d'une ancienne usine électrique d'une puissance totale de 450 kW par une génératrice asynchrone triphasée de 900 kW, 400 V, 1008  $\text{min}^{-1}$ , 50 Hz, de forme IM B3. Entraînement par turbine Francis sur son propre palier. La génératrice fournit de l'énergie de base au réseau moyenne tension interconnecté des Services Industriels de Moutier au travers d'un transformateur 400/16 000 V. La génératrice asyn-

chrone a été choisie pour sa simplicité du réglage de la turbine, la suppression du réglage de tension et de synchronisation, la protection offerte ainsi que l'appareillage de mesure peu important et le prix avantageux. La moyenne de la puissance utile sur une période d'une année est de 70 % de la puissance nominale, soit une production de 5 520 000 kWh.

#### 3.2. Transformation de l'usine hydroélectrique de Manegg

Deux groupes hydroélectriques avec génératrices synchrones avaient été installés en 1904 et 1916 à la Fabrique zurichoise de papier la Sihl. Ils ont été remplacés en 1980 par deux génératrices asynchrones de 315 kW chacune, 500 V, 610  $\text{min}^{-1}$ , 50 Hz. Le facteur de puissance des génératrices fut porté à 0,92 par des condensateurs.

Chaque génératrice, dont la forme correspond à IM V1, est accouplée directement à une turbine verticale Kaplan. Tous les efforts axiaux de la turbine sont supportés par leur pivot.

Le rendement amélioré des groupes, spécialement des machines d'entraînement, permet d'obtenir une production d'énergie notablement plus élevée, dans les mêmes conditions hydrauliques. L'installation, qui couvre essentiellement la demande de la fabrique de papier, est couplée au réseau interconnecté de la ville de Zurich par un transformateur 500/11 000 V.



# BBC

BROWN BOVERI

ASYNCHRONMASCHINE  
MACHINE ASYNCHRONE  
ASYNCHRONOUS MACHINE

No HM	1002594	1978	Typ.	pQO 500 ab 6	
P	900	kW	S1	cos $\varphi$	0,85
n	1008	1/min.		f	50 Hz
U <sub>1</sub>	400	V	I <sub>1</sub> 1528	A	3~ $\lambda$
U <sub>2</sub>		V	I <sub>2</sub>	A	
Mec.	survitesse 2000 min <sup>-1</sup>		El.	CEI 34-1 (1969)	Cl. F

Fig. 9. – Plaque signalétique de la génératrice asynchrone de l'usine de Moutier. D'après les prescriptions du Comité électrotechnique international, la vitesse d'emballement doit figurer sur la plaque signalétique. Une machine accouplée à une turbine hydroélectrique doit être conçue pour supporter la vitesse d'emballement.

### 3.3. Usine hydroélectrique de Lessoc

L'usine de Lessoc des Entreprises Electriques Fribourgeoises (EEF) est alimentée par les eaux de la Sarine. La salle des machines se trouve à l'intérieur du barrage. En plus d'une génératrice synchrone triphasée de 1175 kVA,  $\cos \varphi = 0,8$  (surexcité) avec une turbine Francis réglée pour l'utilisation du débit de dotation, deux autres groupes ont été installés. Ces groupes sont formés par des turbines S à hélice et des génératrices asynchrones triphasées de 3200 kW, 6600 V, 428 min<sup>-1</sup>, 50 Hz. Les génératrices à arbre horizontal sont placées sous la conduite d'amenée d'eau de la turbine. Ces groupes ne sont pas réglables. Ils sont utilisés lors de crues ou pour la production d'énergie de pointe. Le  $\cos \varphi$  à la puissance nominale est de 0,82. Il est compensé à 0,92 au moyen de condensateurs. L'usine est télécommandée par haute fréquence depuis les usines voisines de Broc ou de Montbovon.

### 3.4. Usine hydroélectrique de dotation de Bärenburg

Au pied du réservoir de compensation de Bärenburg des Forces Motrices d'Hinterrhein SA à Thusis, existe un groupe de dotation destiné à mettre en valeur une chute de 30 à 50 m. Cette génératrice est entrée en service en 1968. Le groupe se compose d'une turbine Francis à arbre horizontal avec palier axial-radial combiné, accouplé directement à la génératrice asynchrone modèle IM 1205 pour 720 kW,  $\cos \varphi = 0,86$ , 380 V, 611 (1160) min<sup>-1</sup>, 50 Hz. Il est équipé d'une dynamo tachymétrique et d'un interrupteur centrifuge. Etant donné que le débit d'eau varie beaucoup au cours des saisons, et avec lui la puissance de la turbine et de la génératrice, des condensateurs ont été installés pour améliorer le facteur de puissance. Ils sont accouplés

à la génératrice par gradin et automatiquement, afin d'éviter une surcompensation inutile. La génératrice fonctionne en couplage bloc sur le réseau à 16 kV de la vallée.

### 3.5. Installation de pompage de Busko Blato en Yougoslavie

La fonction principale de la station de pompage de Busko Blato consiste à pomper le surplus d'eau qui ne peut pas être utilisé directement à l'usine d'Orlovac, depuis le réservoir de compensation de Lipa jusqu'au barrage de Busko Blato situé un peu plus haut. Durant les périodes de faibles précipitations, on pallie le manque d'eau du

réservoir de compensation par l'eau du barrage de Busko Blato. Lorsque la différence de niveau entre le réservoir de compensation et le barrage est suffisante, l'énergie sera fournie par l'usine de Busko Blato et sera distribuée au réseau. Durant une période de sécheresse prolongée, le niveau d'eau du barrage peut tomber en dessous de celui du réservoir de compensation, ce qui justifie le pompage réversible de l'eau du barrage dans le réservoir de compensation.

La station de pompage comprend trois pompes-turbines prévues pour le pompage dans les deux sens et le turbinage dans un sens. Pour optimiser les conditions hydroélectriques, une installation avec génératrices-moteurs triphasés asynchrones à pôles commutables, avec rotors à cage d'écureuil pour deux vitesses (réversibles) a été choisie. Les caractéristiques en sont : 3400/1600 kW en moteur 3500/1670 kW et en génératrice, 6000 V, vitesse synchrone 1000/750 min<sup>-1</sup>, 50 Hz, démarrage direct, forme IM 7311, mise en service en 1973.

### 3.6. Transformation de l'usine hydroélectrique de Landquart

Dans une première étape, l'usine hydroélectrique de Landquart fut modifiée en 1977 et deux anciens groupes remplacés par deux nouveaux, au rendement notablement amélioré. Afin de limiter les frais d'investissement, on a conservé la même disposition hydraulique (turbine Francis disposée horizontalement dans le canal

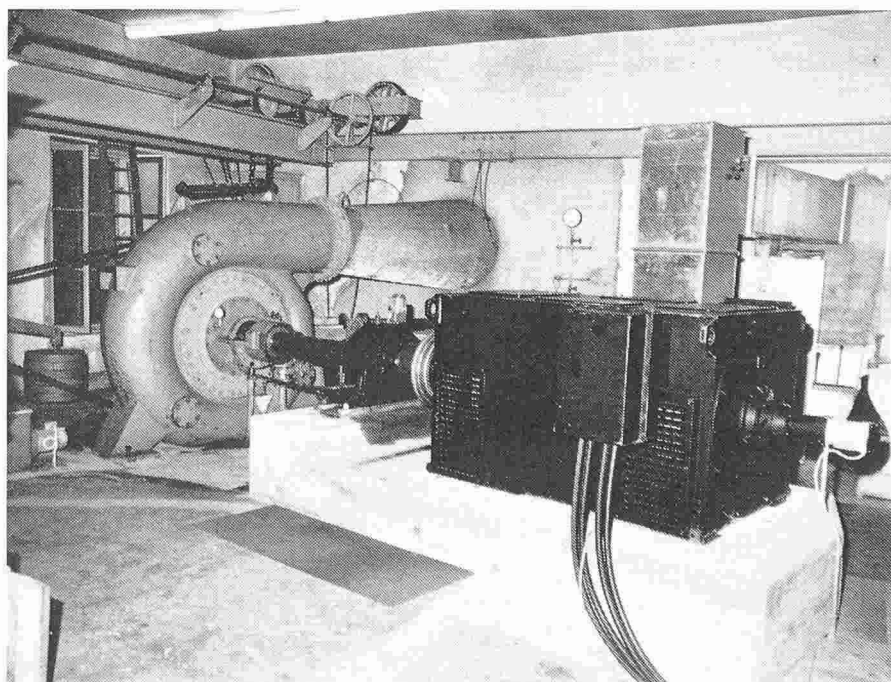


Fig. 10. – Usine hydroélectrique de Moutier. A gauche, la turbine Francis qui entraîne la génératrice asynchrone, située à droite. Type pQO 500 ab 6, forme IM B3, degré de protection IP 23. Caractéristiques de la génératrice:  $U_n = 400$  V,  $f_n = 50$  Hz,  $n_n = 1008$  min<sup>-1</sup>,  $P_n = 900$  kW,  $\cos \varphi = 0,85$ , vitesse d'emballement = 2000 min<sup>-1</sup>. Derrière la génératrice se trouve le canal de sortie de l'air. L'air chaud chauffe un appartement de service à travers un échangeur de chaleur (puissance dissipée: 10-30 kW, à 1/4-3/4 de charge). Mise en service en 1979.

ABB 199 481 C



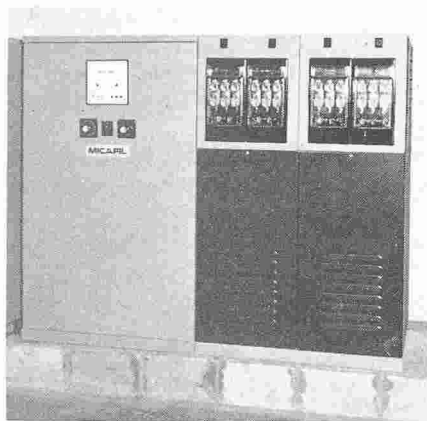


Fig. 11. – Usine hydroélectrique de Moutier. Une des deux armoires avec la commande automatique des batteries de condensateurs de 200 kVar. Fabrication Micafil, une filiale de ABB. Au total, huit gradins sont disponibles, ce qui exclut une surcompensation à charge réduite. A pleine charge (900 kW), le facteur de puissance passe de 0,85 à 0,98. ABB 199 482 C

en amont, sans colimaçon, et avec conduite d'aspiration verticale). Cette centrale étant couplée en parallèle avec le réseau des Forces Motrices Grisonnes, de Klosters, les conditions de fonctionnement en îlot n'avaient aucune raison d'être. C'est la raison pour laquelle on a préféré pour les nouveaux groupes une génératrice asynchrone à une synchrone. Afin d'obtenir une vitesse économiquement plus rentable des génératrices, on les a équipées d'un multiplicateur de vitesse.

Chaque groupe est composé d'une turbine Francis simple, équipée côté entraînement d'un palier combiné axial-radial, d'un engrenage à denture droite ( $250/1015 \text{ min}^{-1}$ ), volant d'inertie et d'une génératrice asynchrone avec rotor à cage d'écureuil (forme IM B3 protection, IP 23 refroidissement IC 01). Génératrice: 250 kW, 400 V, 361 A,  $1015 \text{ min}^{-1}$ , 50 Hz. Les deux génératrices sont couplées sur une barre omnibus sur laquelle sont également branchés les condensateurs via leur propre sectionneur. En service simultané des deux génératrices à pleine charge, les condensateurs améliorent le  $\cos \varphi$  de 0,83 à 0,94.

Du fait d'une installation ancienne et de la hauteur limite de l'onde des remous, la durée de fermeture de la vanne est relativement longue si un arrêt urgent de la turbine est nécessaire.

Pour limiter malgré tout l'emballement à un niveau acceptable, l'extrémité de l'arbre rapide du train d'engrenage est équipée d'un volant d'inertie.

### 3.7. Usine hydroélectrique de Muslen

L'usine hydroélectrique de Muslen des Forces Motrices Saint-Galloises-

Appenzelloises (SAK), située sur la rive septentrionale du lac de Walenstadt, est entrée en service au printemps 1982.

Le groupe hydroélectrique comprend une turbine Francis à un palier accouplée directement à une génératrice asynchrone avec rotor à cage d'écureuil, forme IM B3 avec 1580 kW, 480 V, 2144 A,  $1510 (2650) \text{ min}^{-1}$ , 50 Hz. Une batterie de condensateurs de 418 kVar améliore le facteur de puissance de 0,89 à 0,97. La génératrice, en couplage bloc avec un transformateur, alimente le réseau à moyenne tension de 16 kV de la SAK. La conception de l'enroulement statorique ne permettait pas, pour la puissance et le nombre de pôles donnés, de choisir librement la tension de la machine dans les limites usuelles ( $U \leq 660 \text{ V}$ ).

Pour obtenir une machine aux conditions optimales, on a choisi une tension de 480 V. Cette valeur inhabi-

tuelle est sans autre admissible pour un couplage bloc.

Voici enfin encore un cas intéressant de transformation d'une usine hydroélectrique avec génératrices synchrones triphasées.

### 3.8. Transformation de l'usine hydroélectrique de Kappelerhof

L'usine hydroélectrique de Kappelerhof sur la Limmat, construite en 1892, a été transformée en 1974 et l'augmentation de la chute utile par le drainage du lit de la rivière a permis d'en augmenter le débit de 40 à  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Une étude approfondie a démontré qu'une transformation de la salle très ancienne des machines avec ses quatre groupes historiques de l'année 1925 ( $4 \times 400 \text{ kVA}$ , 4 kV,  $214 \text{ min}^{-1}$ , 50 Hz) était rentable. Dans ce cas, la solution la plus économique consistait à choisir une turbine bulbe Kaplan en forme de S avec arbre oblique. Le multiplicateur

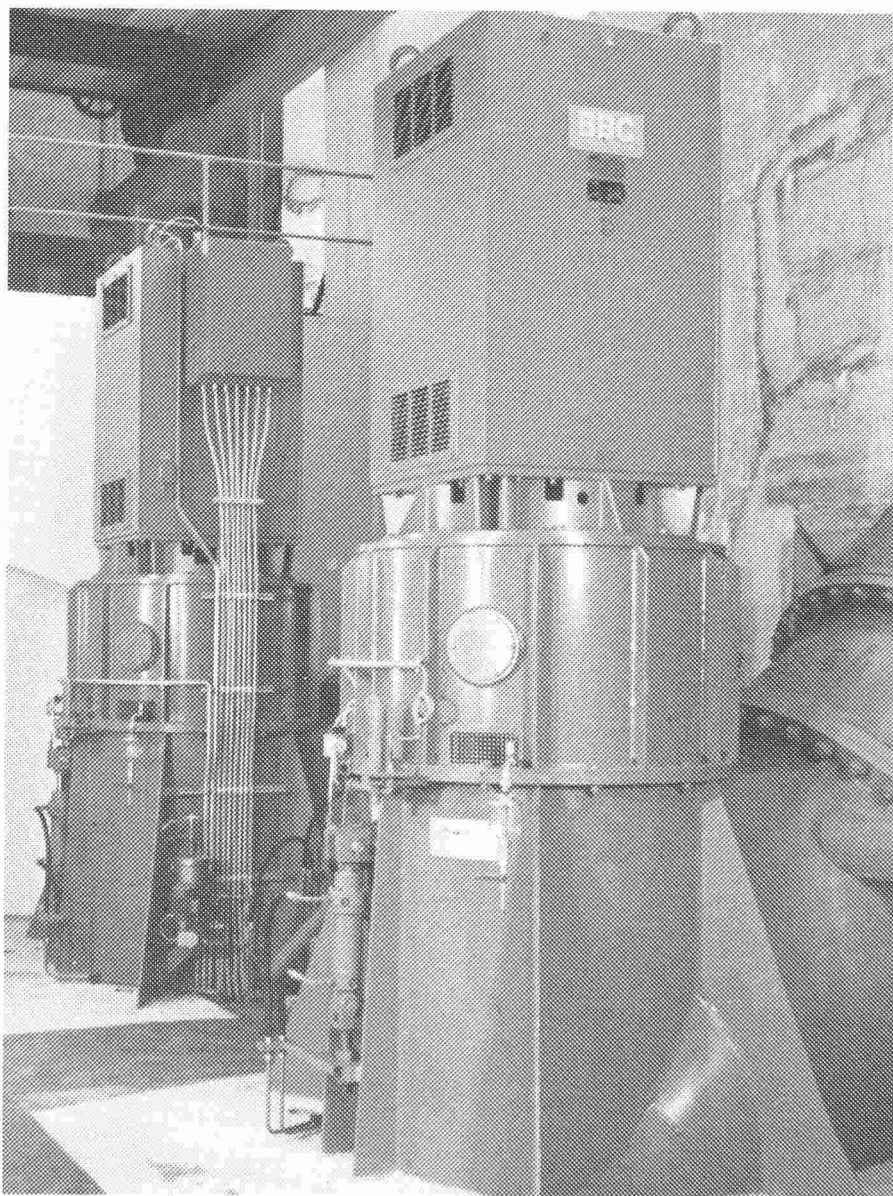


Fig. 12. – Usine hydroélectrique de Manegg de la Fabrique de papier sur la Sihl. Deux génératrices asynchrones type gQOVx 450 bb 10, forme IM V1. Chacune est accouplée à une turbine Kaplan. Caractéristiques (d'une machine):  $U_n = 500 \text{ V}$ ,  $P_n = 315 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,82$ ,  $\eta_n = 610 \text{ min}^{-1}$ , vitesse d'emballement =  $1310 \text{ min}^{-1}$ . Mise en service en 1981. ABB 196 569



de vitesse ( $86,3/750 \text{ min}^{-1}$ ) ainsi que la génératrice se trouvent hors de l'eau. L'usine de Kappelerhof avec sa voisine, celle de Aue, seraient à même, en fonctionnant en îlot, de fournir dans certains cas l'énergie nécessaire aux consommateurs importants du réseau des Services Industriels à Baden. Une génératrice synchrone triphasée avec un moment d'inertie augmenté fut cependant choisie avec les caractéristiques suivantes:  $3300 \text{ kVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ ,  $8000 \text{ V}$ ,  $750 (2607) \text{ min}^{-1}$ ,  $50 \text{ Hz}$ , avec excitatrice à diodes tournantes, forme IM 7312.

Cette installation est équipée d'un automatisme de télécommande moderne de démarrage, d'arrêt, et de contrôle ainsi que d'un circuit de contrôle automatique du niveau d'eau amont.

### 3.9. Statistique des génératrices asynchrones en Suisse

Les membres de l'Union des centrales suisses d'électricité (ASE/UCS) ont recensé, en 1978, 68 petites usines électriques. D'après nos informations, 10 génératrices asynchrones ont été installées entre 1978 et 1980. Elles sont représentées en traits fins sur les figures 14 à 17. Il en ressort que pour 68 des

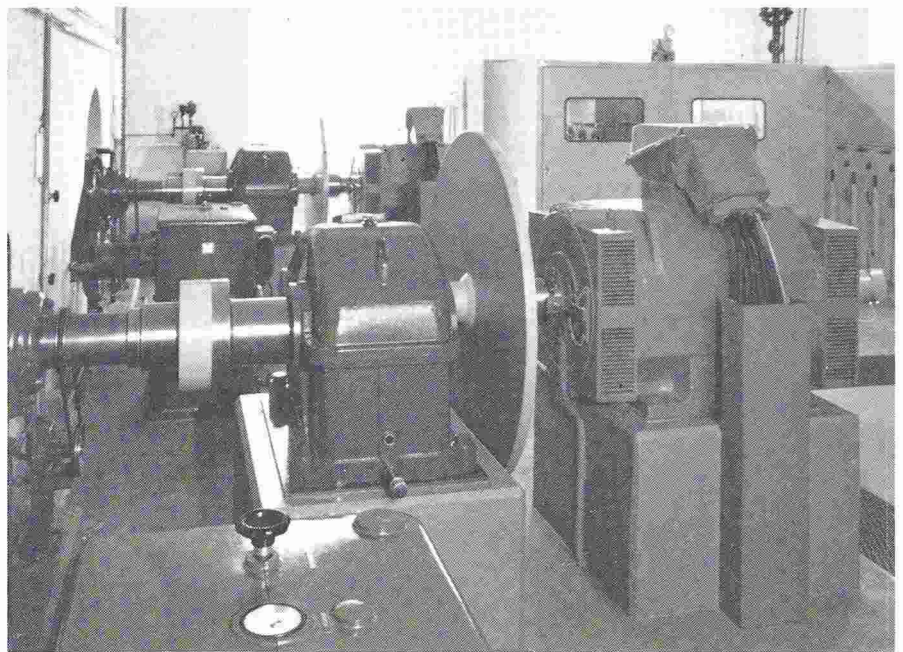


Fig. 13. – Usine hydroélectrique de Landquart I de la Fabrique de papier de Landquart. Deux génératrices asynchrones type QO 355 M 6, forme IM B3, entraînées par des turbines Francis et un train d'engrenage. Caractéristiques (d'une machine):  $U_n = 400 \text{ V}$ ,  $P_n = 250 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,83$ ,  $n_n = 1015 \text{ min}^{-1}$ , vitesse d'emballage =  $2250 \text{ min}^{-1}$ . Mise en service en 1977. ABB 188 039 C

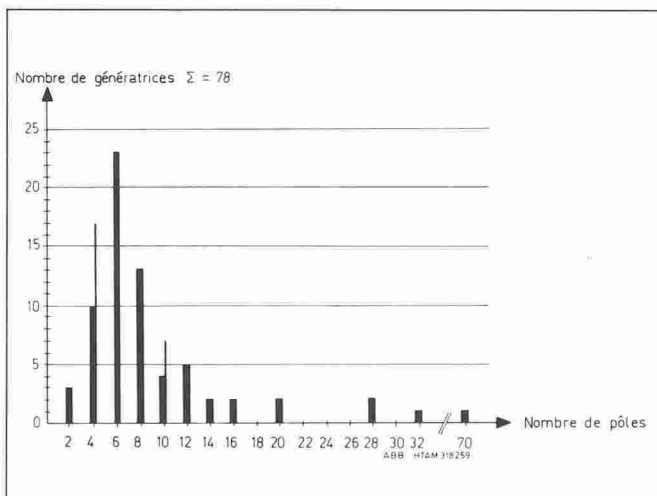


Fig. 14. – Nombre de génératrices asynchrones en fonction du nombre de pôles en Suisse. Etat au 31.12.1980.

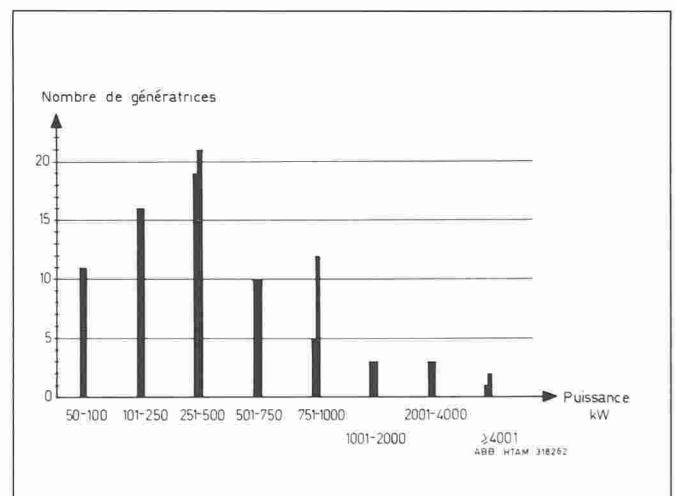


Fig. 15. – Nombre de génératrices en fonction de la puissance en Suisse. Etat au 31.12.1980.

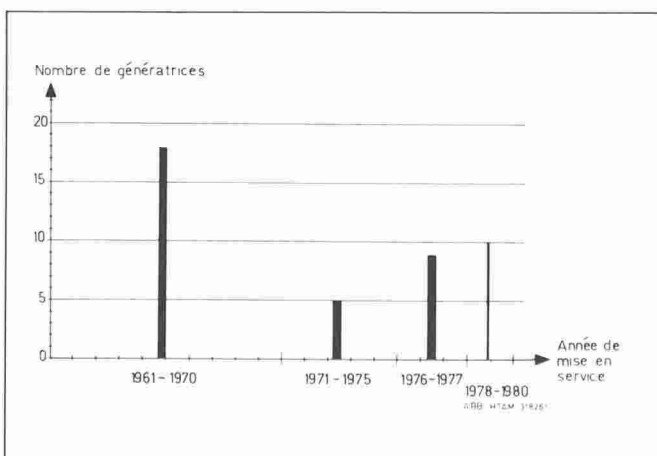


Fig. 16. – Nombre de génératrices asynchrones en fonction de l'année de mise en service en Suisse de 1961 à 1980.

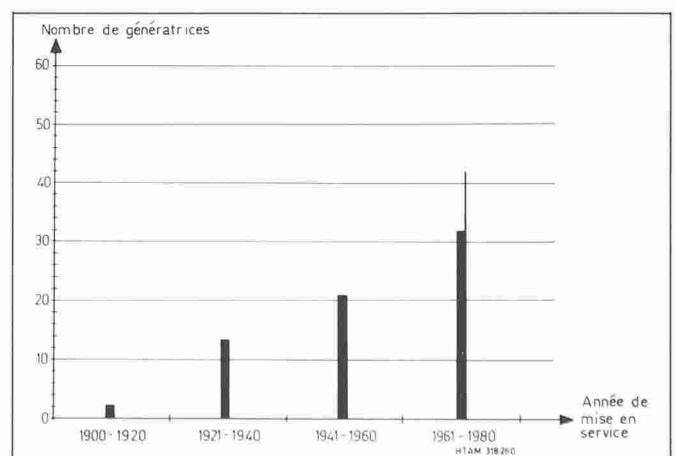


Fig. 17. – Nombre de génératrices asynchrones en fonction de l'année de mise en service en Suisse.



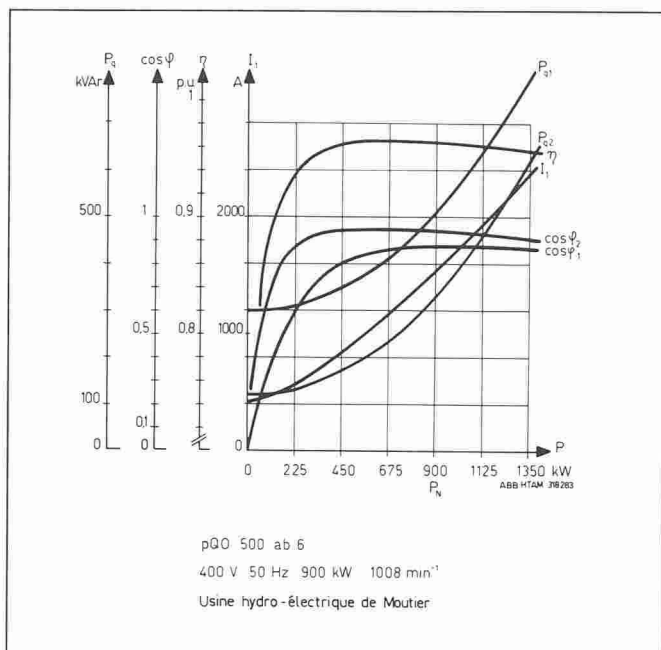


Fig. 18. – Caractéristiques d'une génératrice asynchrone.

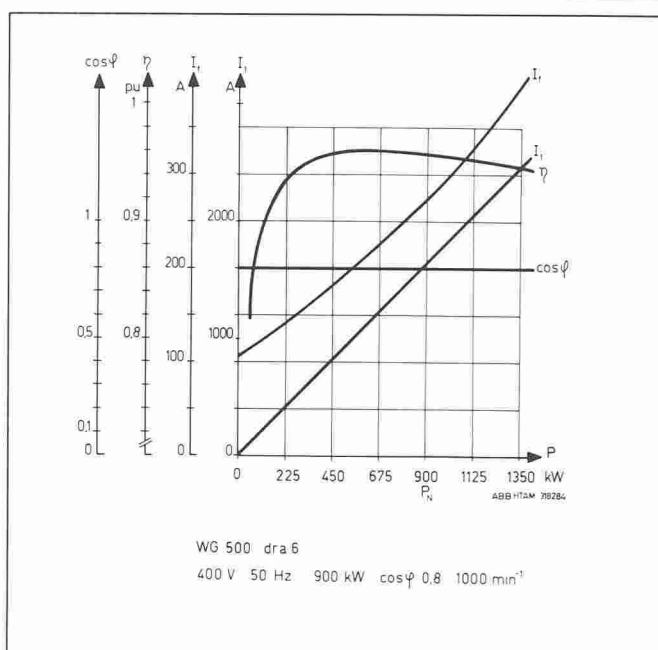


Fig. 19. – Caractéristiques d'une génératrice asynchrone.

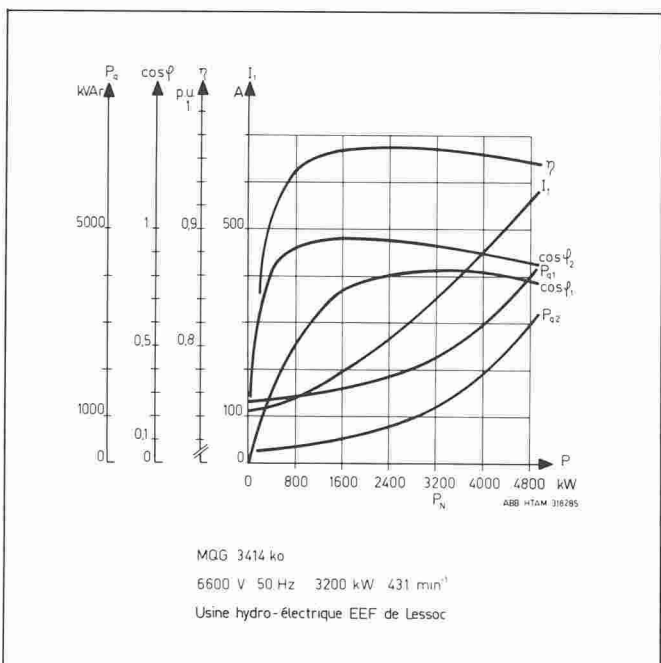


Fig. 20. – Caractéristiques d'une génératrice asynchrone.

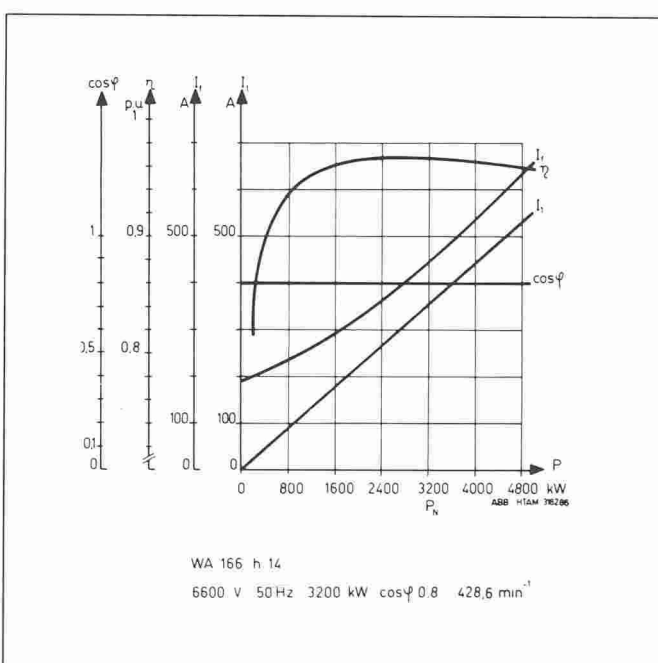


Fig. 21. – Caractéristiques d'une génératrice asynchrone.

Sur les figures 18 à 21 sont représentées les caractéristiques de génératrices asynchrones et synchrones de 6 et 14 pôles. Il en ressort que le rendement des machines asynchrones est légèrement supérieur à celui des machines synchrones.

- $P$  puissance active
- $P_{q1}$  puissance réactive sans les condensateurs
- $P_{q2}$  puissance réactive avec les condensateurs de compensation pour la partie linéaire de la courbe de magnétisation
- $\cos \varphi_1$  facteur de puissance sans les condensateurs de compensation
- $\cos \varphi_2$  facteur de puissance avec condensateurs de compensation pour la partie droite de la courbe de magnétisation
- $\eta$  rendement
- $I_1$  courant d'excitation pour génératrice synchrone
- $I_1$  courant statorique

78 génératrices, le nombre de pôles se situe entre 2 et 12 (synchrone 3000 et 500 min<sup>-1</sup>), c'est-à-dire que 87% d'entre elles fonctionnent dans ces limites. La figure 14 renseigne sur le

nombre de génératrices asynchrones mises en service entre 1900 et 1980. Cette statistique démontre que les avantages des génératrices asynchrones sont de mieux en mieux reconnus.

La figure 15 renseigne sur la progression du nombre de génératrices durant ces vingt dernières années. La gamme des puissances installées en Suisse jusqu'à la fin de 1980 est représentée sur la figure 15. A la fin de 1978 il y avait en Suisse 68 génératrices asynchrones installées, d'une puissance totale de 42 000 kW. La plus grande génératrice asynchrone, de 6800 kW, 16 kV, 1507 min<sup>-1</sup>, 50 Hz, a été mise en service en 1971 dans l'usine hydroélectrique d'Ackersand. Une autre, plus grande, de 8400 kW, 10,5 kV, 50 Hz, 10 pôles a été installée en 1979 dans l'usine de Gondo. A la fin de 1980 il y avait 78 génératrices asynchrones d'une puissance totale de 57 080 kW installées en Suisse, dont 24 mises en service dès 1971.



## 4. Résumé

### 4.1. Comparaison des propriétés et caractéristiques entre génératrices asynchrones et synchrones

#### Génératrices asynchrones (GA)

- Très robuste mécaniquement. Pratiquement sans nécessité de surveillance.
- Pas d'exigences spéciales quant au moment d'inertie.
- Faible entrefer; il doit être augmenté parfois pour des raisons mécaniques dues à l'emballement.
- Requiert une puissance réactive pour l'excitation, soit tirée du réseau ou produite par des condensateurs. Le facteur de puissance diminue avec l'augmentation du nombre de pôles et la réduction de la vitesse.
- Lors de fortes variations de charge en service en îlot, il est nécessaire de prévoir des condensateurs réglables ou des bobines saturées pour maintenir la tension constante.
- $P_q = f(P)$ , c'est-à-dire que la caractéristique est limitée à une courbe (paragraphe 2.1., fig. 4). Lors de marche en parallèle, la puissance réactive ( $P_q$ ) peut être fournie soit par le réseau ou par une GS dans la même usine. On peut aussi réaliser une compensation partielle où serait compensée la partie droite de la courbe de magnétisation à l'aide de condensateurs.
- Les condensateurs requièrent une protection contre les surtensions.
- Ne requiert aucun dispositif de synchronisation.
- Démarrage progressif de la turbine avec la génératrice jusqu'à approximativement la vitesse synchrone et fermeture du disjoncteur principal.

#### Génératrices synchrones (GS)

- Robuste mécaniquement. Avec excitatrice à diodes tournantes (sans balais), ne demande pas de surveillance.
- Les exigences hydroélectriques requièrent une masse d'inertie minimale pour le réglage de la vitesse et pour limiter l'emballement.
- La vitesse d'emballement n'est limitée que par des sollicitations mécaniques.
- Peut fournir de l'énergie réactive ou en prélever.
- Le maintien de la tension constante se fait sans problème avec l'excitation par régulateur de tension.
- Le point de travail  $<P; P_q>$  est ajustable à volonté dans le cadre des limites thermiques et électriques de la génératrice et de l'excitatrice, c'est-à-dire que la courbe est une surface (diagramme de charge).
- Requiert un dispositif de synchronisation pour la mise en parallèle.
- Démarrage de la turbine avec la génératrice jusqu'à la vitesse synchrone, synchronisation et mise en charge.
- Service en îlot, le réglage de la fréquence est possible.

C'est lors de la marche en parallèle sous a et b que les caractéristiques électriques et les avantages économiques sont le mieux mis en valeur (fig. 18 à 21).

### 4.3. Conclusion

La pénurie et le coût élevé de l'énergie font que les petites usines électriques (entre 10 kW et 20 000 kW) présentent un intérêt croissant et sont de plus en plus rentables. Une petite usine équipée de génératrices asynchrones robustes et ne requérant, malgré les condensateurs de compensation, que des frais d'investissement réduits en comparaison avec les génératrices synchrones, est donc avantageuse. Le cas idéal d'installation de génératrices asynchrones est celui où existe la possibilité de marche en parallèle sur un réseau où l'apport d'énergie réactive ne présente pas de problème (conduites électriques courtes ou génératrices synchrones au voisinage).

Dans ce cas, la génératrice asynchrone peut fournir une puissance constante ou variable. Six sur huit exemples présentés ici – Moutier, Manegg, Lessoc, Bärenburg, Landquart, Muslen – illustrent cette tendance. La production d'énergie réactive par des condensateurs, pour autant qu'on applique des règles simples de couplage, ne présente pas de difficultés, même en cas d'emballement. Grâce aux condensateurs de compensation, même les génératrices asynchrones ayant un nombre de pôles plus élevé ( $2p \geq 12$ ) sont encore rentables.

A la fin de 1980 il y avait en Suisse 78 génératrices asynchrones en service dans de petites usines, dont 24 mises en service depuis 1971. D'autres usines semblables sont en construction ou en projet, avec des puissances unitaires de génératrices asynchrones allant jusqu'à 12,5 MW.

La puissance techniquement et économiquement possible se situe actuellement aux alentours de 24 MW pour une exécution à 4 pôles, 30 MW pour 6 pôles et 45 MW pour 8 pôles.

La puissance des génératrices asynchrones est limitée avant tout non pas électriquement, mais mécaniquement à cause des sollicitations dues à la vitesse d'emballement.

Les huit exemples présentés montrent qu'il n'existe pas de règles générales pour choisir soit des génératrices asynchrones, soit des génératrices synchrones. Il faut tenir compte des particularités propres à chaque machine. On ne peut pas décider sans avoir au préalable étudié la configuration de l'ensemble du projet pour chaque cas pris individuellement. La décision finale résultera d'un compromis entre l'exploitation de la machine et la rentabilité économique.

### 4.2. L'application des génératrices asynchrones et synchrones selon le mode d'opération (présentée sous forme de tableau)

Les X se réfèrent à l'aptitude correspondante.

Type de génératrice	Aptitudes	Marche en parallèle				Service en îlot			
		a	b	c	d	a	b	c	d
Asynchrone	Très indiquée	X							
	Indiquée		X						
	Pas spécialement indiquée					X			
	Non indiquée			X	X		X	X	X
Synchrone	Très indiquée	X	X	X	X	X	X	X	X

a: fonctionnement à charge constante

b: fonctionnement à charge variable

c: fonctionnement à charge variable et à tension constante

d: fonctionnement à charge variable et production de puissance réactive.



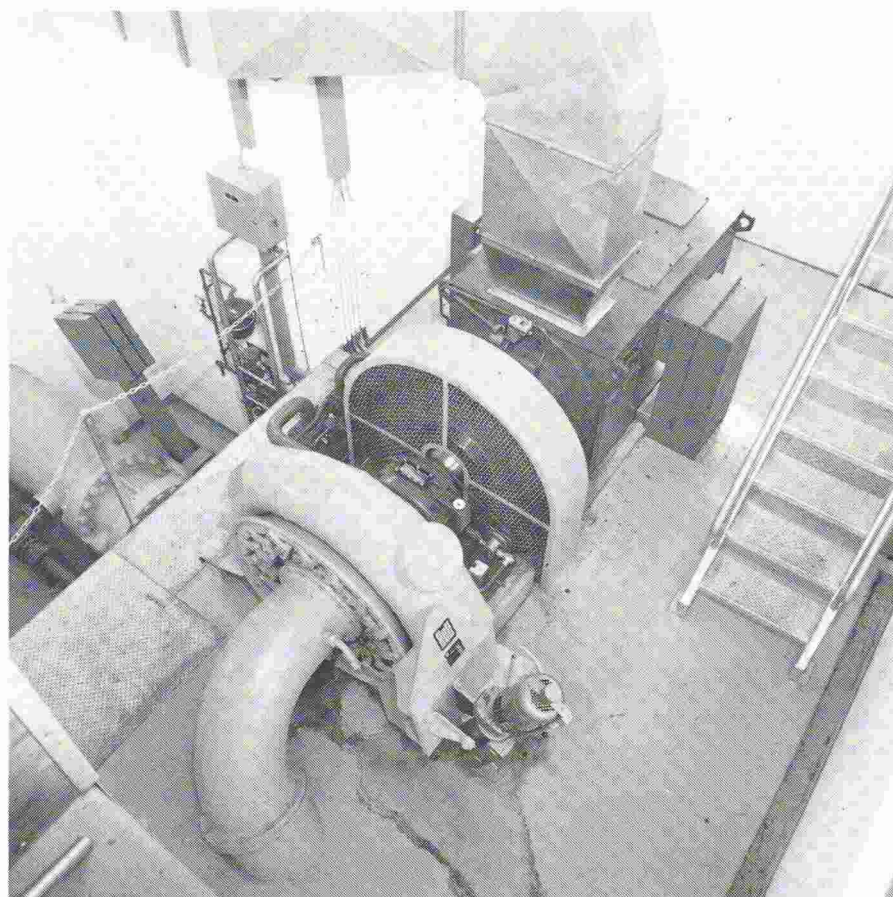


Fig. 22. – Usine hydroélectrique de Muslen des Forces Motrices Saint-Galloises-Appenzeloises SA (SAK). Au premier plan, la turbine Francis avec accouplement direct à la génératrice asynchrone QOG 500 dw 4, forme IM B3. Un volant d'inertie est monté dans l'accouplement pour des raisons techniques concernant le réglage de la turbine. Caractéristiques :  $U_n = 480$  V,  $P_n = 1580$  kW,  $\cos \varphi = 0,88$ ,  $n_n = 1509$  min<sup>-1</sup>, vitesse d'emballement = 2650 min<sup>-1</sup>. La génératrice alimente le réseau à moyenne tension de la SAK à travers un transformateur bloc 480/16 000 V. Mise en service en 1982. ABB 207 548 C

#### 4.4. Symboles et littérature utilisés

##### Symboles utilisés

$C$	capacité
$\cos \varphi$	facteur de puissance
$\cos \varphi_1$	facteur de puissance sans les condensateurs de compensation
$\cos \varphi_2$	facteur de puissance avec condensateurs de compensation pour la partie droite de la courbe de magnétisation
$f$	fréquence
$I$	courant
$I_c$	courant capacitif
$I_{c2} (50)$	courant capacitif pour la compensation de la partie droite linéaire (à 50 Hz)
$I_{c3} (50)$	courant capacitif pour compensation complète (à 50 Hz)
$I_f$	courant d'excitation pour génératrice synchrone
$I_m$	courant magnétisant
$I_{m\delta}$	partie linéaire du courant magnétisant
$I_{mfe}$	partie non linéaire du courant magnétisant
$I_1$	courant statorique
$M$	couple
$n$	nombre de tours
$P$	puissance active

$P_q$	puissance réactive
$P_{q1}$	puissance réactive sans les condensateurs
$P_{q2}$	puissance réactive sans les condensateurs de compensation pour la partie linéaire de la courbe de magnétisation
$s$	glissement
$U$	tension
$\eta$	rendement
$\omega$	vitesse angulaire

##### Indices

$d$	vitesse d'emballement
$n$	valeur nominale
$o$	marche à vide

##### Bibliographie

- [1] DANIELSON, E.: «Reversibility of three phases motors with inductive winding». *The Electrical World*, 1893-01-21.
- [2] SCHRÖDER, J. W.: «Der kondensatorerregte Asynchrongenerator». *Technische Rundschau*, Nr. 54, 1963-12-27, S. 9-13.
- [3] BÖDEFELD, TH.; SEQUENZ, H.: *Elektrische Maschinen*, 8<sup>e</sup> édition, Springer, 1971, S. 197-236, 293-297.
- [4] ROMPF, R.: «30 000 Staustufen – Kleinwasserkraftwerke im Dienste des Umweltschutzes». *Das Wassertriebwerk*, Nr. 11/1971, S. 73-77; Nr. 12/1971, S. 85-87.
- [5] NÜSSLI, W.; JACOBSEN, S.; BOHUN, V.: «Erneuerung alter Wasserkraftwerke». *Wasser, Energie, Luft*, 10, 1977, S. 235-243.
- [6] JAUSLIN, W.: «Wasserkraftanlagen und Landschaftschutz». *Wasser, Energie, Luft*, 11/12, 1978, S. 299-301.
- [7] PUCHER, E.: «Innovation oder Stilllegung von Kleinwasserkraftwerken?» Internationale Fachtagung über Umbau und Erweiterung von Wasserkraftanlagen, Zürich, 1979. *Mitteilung Nr. 34 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich*, S. 185-192.
- [8] PUCHER, E.: «Nützliche Kleinwasserkraftwerke». *Technische Rundschau*, 12, 1979-03-20, S. 25-27.
- [9] OSCHANITZKY, H.: «Direkt und über Getriebe angetriebene Rohrgeneratoren». *Elektrizitätswirtschaft*, 4, 1963, S. 118-123.
- [10] KATAOLA, M.; ABE, M.: «A large, high-speed, induction generator for recovering energy from top-gas pressure of blast furnaces». *Mitsubishi Electric Advance*, 1980-03, pp. 23-24.

#### 4.6. Complément

Depuis la rédaction première de ce texte en 1982 et sa parution dans la revue *Wasser, Energie, Luft*, N° 3/4 1984, quelques années se sont écoulées et de nouvelles installations ont été livrées par notre entreprise et mises en service.

En Suisse, il s'agit des installations suivantes :

Type	$P_n$ kW	$U_n$ V	$n_n$ min <sup>-1</sup>	$n_d$ min <sup>-1</sup>	Année	Nom- bre	Usine hydroélectrique (UHE) et propriétaire
gQO 450 bb 6	585	400	1010	3620	1982	2	Beterkinden et Hagerhüsli de la Fabrique de papier d'Utzenstorf, canton de Berne
gQWG 450 ib 4	620	7500	1512	2500	1984	1	Gabi, Energie Electrique du Simplon (EES), Valais
gQOGx 400 bb 4	560	400	1514	3020	1989	3	Blinnental, Blinnenkraftwerke AG, Valais



Les usines hydroélectriques de Beterkinden et de Hagerhüsli résultent de la transformation d'installations anciennes; pour Gabi, il s'agit d'une extension; Blinnental est une nouvelle installation où les trois génératrices asynchrones fonctionnent par intermittence en été pour la production d'énergie de pointe, en complément d'une génératrice synchrone utilisant le débit de dotation.

D'autres installations sont en projet. Dans le domaine des petites puissances, comprises entre 1 et 150 kW, plusieurs installations avec des génératrices asynchrones, avec des entraînements tant hydrauliques que thermiques, ont également été mises en service depuis 1978, date du dernier recensement par l'Union des centrales suisses d'électricité (UCS). Les exploitants de ces petites installations ne sont le plus souvent pas membres de l'UCS, de sorte que leur inventaire systématique est difficile.

A l'étranger, l'usage de la génératrice asynchrone se développe dans différentes directions. Nous citerons deux pays, où nos partenaires et concessionnaires produisent des machines électriques pour le marché intérieur essentiellement.

De 1978 à 1989, notre partenaire norvégien a livré 43 génératrices asynchrones pour 39 installations hydrauliques sises en Norvège et en Suède. Les mêmes répartitions statistiques que pour la Suisse sont valables:

- Les machines à 6, 8 et 10 pôles (vitesse synchrone =  $n_s = 1000, 750, 600 \text{ min}^{-1}$  à 50 Hz) forment 91% de l'effectif, les polarités 4 et 12 ( $n_s = 1500, 500 \text{ min}^{-1}$ ) occupent le reste.
- La puissance nominale unitaire varie entre 150 et 1600 kW dans 88% des cas (39 machines sur 43).
- Pour les machines avec une puissance nominale inférieure ou égale à 1600 kW, la tension nominale est comprise entre 400 et 660 V, soit le palier basse tension pour 35 machines sur 39.

Le cas de la République d'Afrique du Sud est quelque peu différent. Pour la récupération de l'énergie de chute de l'eau de refroidissement destinée aux mines d'or profondes de plusieurs kilo-

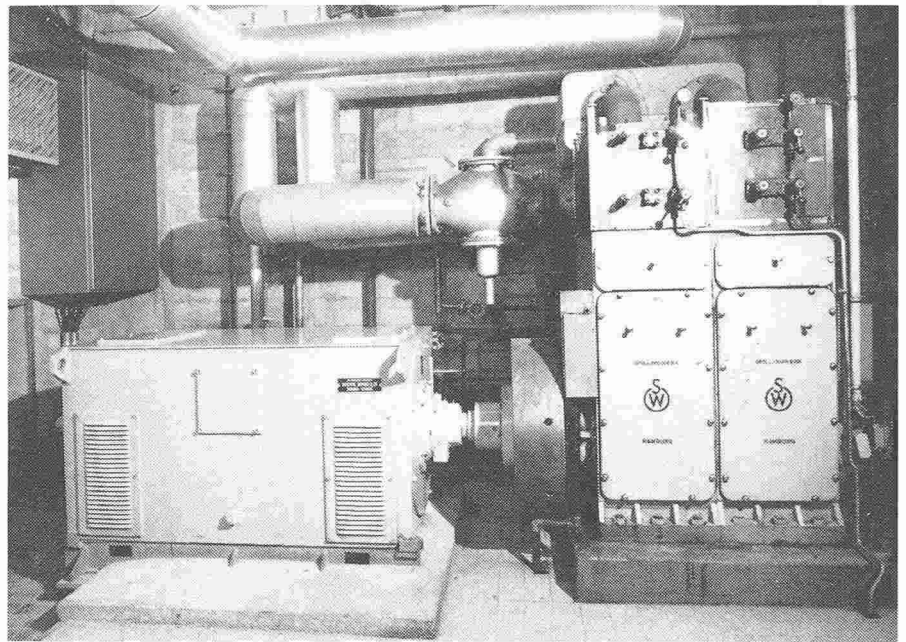


Fig. 23. - La génératrice asynchrone peut aussi être avantageusement utilisée pour des entraînements non hydrauliques. Générateur asynchrone QO 400 aya 8, forme IM B3 entraînée par une machine à vapeur de la Station d'épuration des eaux (STEP) de Lausanne-Vidy. Caractéristiques:  $U_n = 380 \text{ V}$ ,  $P_n = 224 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,81$ ,  $n_n = 760 \text{ min}^{-1}$ . Mise en service en 1973.

Cet emploi est encore plus judicieux qu'en usine hydraulique, car la survitesse est d'environ 1,2 à 1,4 fois  $n_n$  et, pour leur fonctionnement, les stations d'épuration doivent de toute façon être connectées au réseau (ce type de production d'énergie électrique ne couvre que les 60 à 70% de la demande en électricité d'une station d'épuration). ABB 207 772

mètres, notre concessionnaire a livré dès 1983 treize génératrices asynchrones dont la puissance nominale unitaire varie entre 800 et 4250 kW, avec une moyenne de 2584 kW. En raison de la section réduite des galeries, douze des treize machines sont construites pour une vitesse synchrone de 1500 et 3000  $\text{min}^{-1}$ , soit les polarités 2 et 4, ce qui n'est pas sans autre possible. Les rotors ont dû être dimensionnés spécialement et renforcés - car la survitesse atteint 5200  $\text{min}^{-1}$ , et même 5400  $\text{min}^{-1}$ , la vitesse périphérique du rotor en survitesse dépasse 135 m/s -, de même que les paliers lisses, où la lubrification sous pression est indispensable, même à la vitesse nominale.

Les domaines d'utilisation de la génératrice asynchrone (GA) présentés à la page précédente restent valables. Avec le progrès réalisé depuis dix ans pour les microprocesseurs et leur baisse de prix, l'exploitation d'une GA en îlot peut être envisagée pour de petites installations, où la charge est essentiellement résistive et où les différents utilisateurs sont compensés individuellement jusqu'à  $\cos \varphi = 0,95$  inductif. Le microprocesseur surveille l'état de l'excitation de la machine et commande les différents gradins des condensateurs d'excitation.

Il est difficile de déterminer quelle est la plus grande GA du monde - les convertisseurs de fréquence 50 / 16 2/3 Hz, triphasés/monophasés, asynchrones/synchrones mis à part. Au Japon, une

GA à deux pôles a été mise en service en 1979, entraînée par une turbine de récupération des gaz de combustion d'un haut fourneau. Ses caractéristiques sont les suivantes:  $U_n = 6600 \text{ V}$ ,  $P_n = 16500 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi_n = 0,88$ ,  $n_n = 3015 \text{ min}^{-1}$ ,  $\eta_n = 0,974$ . La moyenne de la puissance utile sur une période d'une année est de 70% de la puissance nominale, soit une production de 100 GWh. Si on capitalise cette énergie électrique obtenue sans frais d'énergie primaire avec 0,03 franc suisse par kWh - à dessein cette valeur est prise très basse - on arrive à 3000000 de francs suisses de recettes annuelles, ce qui montre l'intérêt de systématiser la récupération d'énergie dans le domaine sidérurgique.

Le constructeur japonais prétend pouvoir produire des génératrices asynchrones bipolaires de 30 MW [10].

Les différents exemples cités, qu'il s'agisse d'une installation hydraulique ou thermique, montrent de manière éclatante que la génératrice asynchrone est apte de manière simple et élégante à la production d'énergie électrique jusqu'à une puissance unitaire de 20000 kW.

*De 1976 à 1989, l'auteur était ingénieur de dimensionnement pour les machines électriques chez ABB (BBC). Il travaille actuellement dans l'économie énergétique d'un producteur d'électricité.*

*Pour tout renseignement concernant les machines électriques, prière de s'adresser à: ABB Drives AG, Département UMW, 5242 Birr.*

La rédaction

Adresse de l'auteur:

Roland Kallmann  
Ingénieur électricien EPFL  
Gewerbestrasse 12  
3012 Berne