

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	89 (1998)
<b>Heft:</b>	23
<b>Artikel:</b>	Motogénérateur asynchrone à vitesse variable : avantages liés à l'exploitation et à la stabilité des réseaux
<b>Autor:</b>	Simond, Jean-Jacques
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-902140">https://doi.org/10.5169/seals-902140</a>

### **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:** 15.01.2026

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

L'article décrit les avantages liés, dans l'exploitation d'une centrale de pompage-turbinage, à l'utilisation d'un motogénérateur asynchrone à vitesse variable plutôt que d'un groupe synchrone conventionnel. Au-delà du gain en rendement pour le mode turbine à charge partielle et de la possibilité d'un réglage de la puissance en mode pompe, deux simulations illustrent les contributions appréciables apportées à la stabilité du réseau.

# Motogénérateur asynchrone à vitesse variable

## Avantages liés à l'exploitation et à la stabilité des réseaux

■ Jean-Jacques Simond

L'exploitation d'un groupe de pompage-turbinage équipé d'un motogénérateur synchrone connecté directement au réseau présente deux aspects gênants. Le réglage de la puissance active en mode pompe n'est pas possible pour une hauteur de refoulement donnée; en mode tur-

bine le rendement du groupe diminue de façon significative pour une exploitation à charge partielle. Ces deux aspects peuvent être améliorés considérablement en réalisant un groupe capable de fonctionner à vitesse variable. A priori, deux solutions sont possibles: l'insertion d'un convertisseur de fréquence entre le stator du motogénérateur synchrone et le réseau ou l'utilisation d'un motogénérateur asynchrone dont le rotor bobiné est équipé d'une cascade renfermant un cyclo-convertisseur. La première solution n'est pas réalisable économiquement pour des puissances unitaires supérieures

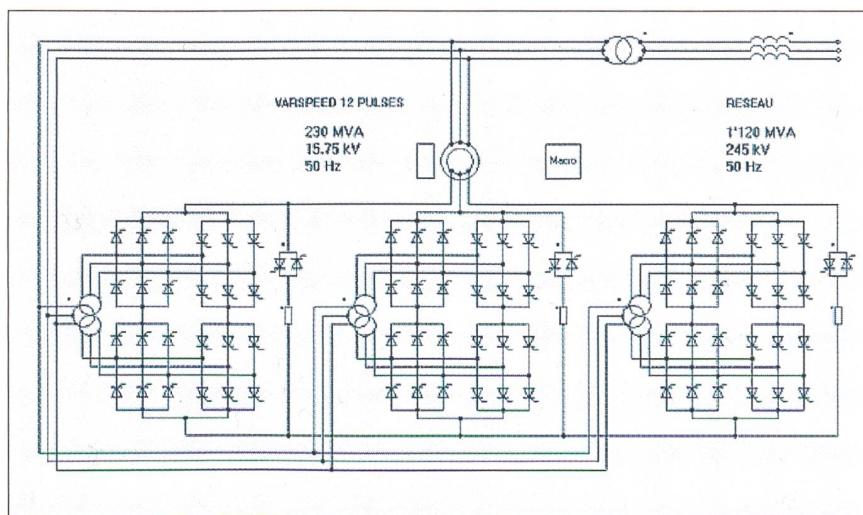


Figure 1 Machine asynchrone dotée d'une cascade cyclo-convertisseur

### Adresse de l'auteur

Prof. Dr Jean-Jacques Simond, Laboratoire d'électromécanique et de machines électriques EPFL, 1015 Lausanne

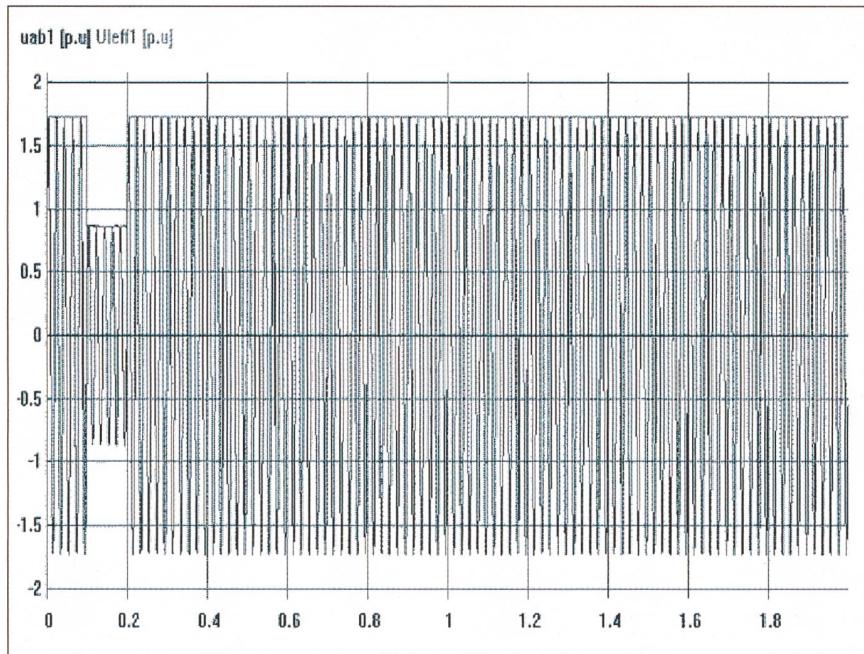


Figure 2 Creux de tension de 50% sur la HT du transformateur principal (100 ms)

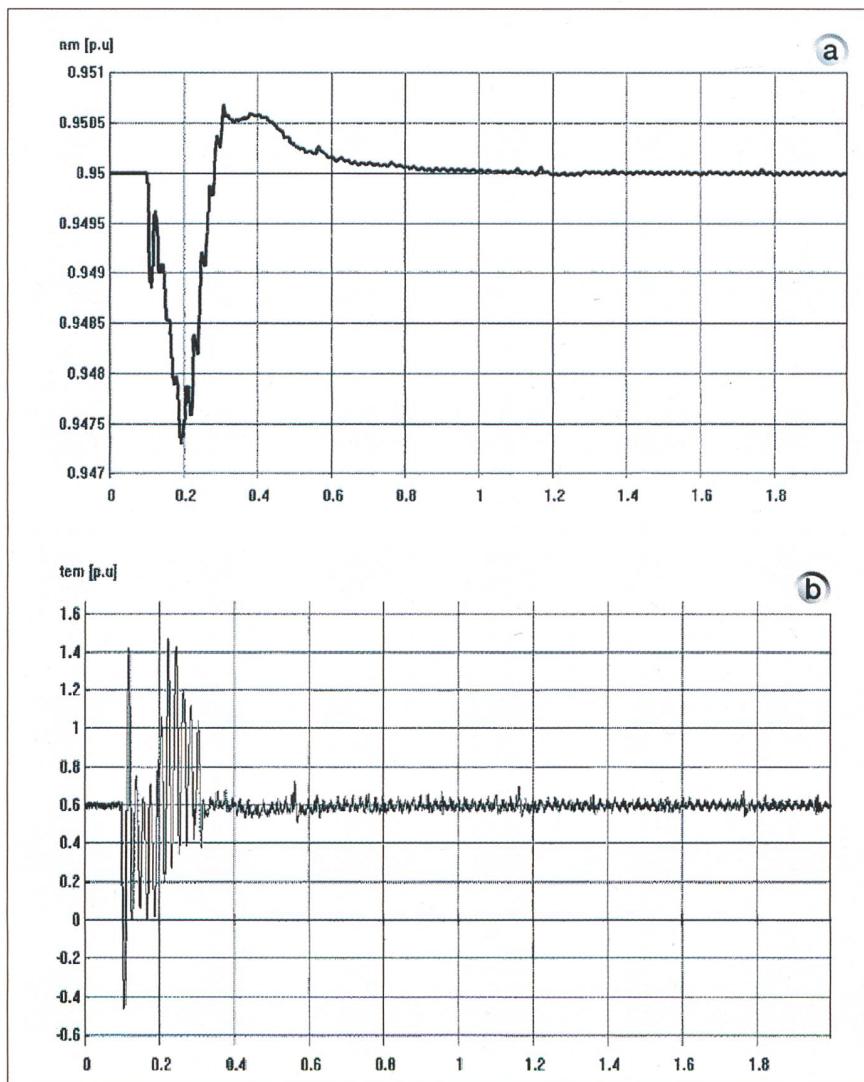


Figure 3 a: Vitesse de la machine asynchrone suite au creux de tension, b: Couple électromagnétique de la machine asynchrone suite au creux de tension

à 200 MVA en raison du fait que la pleine puissance du groupe transite par le convertisseur. La deuxième solution est possible techniquement et économiquement pour des puissances unitaires supérieures à 400 MVA [1, 2, 3, 4] sur une plage de vitesse définie. Cette solution présente encore d'autres avantages tels qu'une contribution à la stabilité du réseau par le contrôle rapide des échanges de puissance réactive, l'injection quasi-instantanée de puissance active en mode turbine en utilisant une partie de l'énergie cinétique stockée dans les masses tournantes par une diminution brusque de la consigne de vitesse, ou une abrasion réduite de la roue de la turbine dans le cas d'eaux très boueuses. Le cyclo-convertisseur sert également au démarrage du groupe en mode pompe. Cette opération se déroule en court-circuitant le stator tout d'abord, puis en alimentant les phases rotoriques avec un système de courants contrôlés en amplitude et dont on fait croître la fréquence de 0 à la valeur nominale.

Cet article décrit d'abord le principe de fonctionnement d'un motogénérateur asynchrone équipé d'une cascade de type cyclo-convertisseur, appelé aussi machine asynchrone à double alimentation; ensuite il illustre les avantages de cette technique au travers de deux simulations réalisées à l'aide d'un logiciel développé au Laboratoire d'électromécanique et de machines électriques de l'EPFL [5].

Un motogénérateur asynchrone peut être équipé aussi d'une cascade de type convertisseur GTO (Gate Turn Off). Il présente alors une dynamique encore meilleure en comparaison avec la variante cyclo-convertisseur, mais pas indispensable pour un groupe de pompage-turbinage.

### Machine asynchrone dotée d'une cascade cyclo-convertisseur

La figure 1 illustre le schéma d'un groupe de pompage-turbinage constitué d'un motogénérateur asynchrone (230 MVA, 15,75 kV, 50 Hz, 2p=18) comportant une cascade de type cyclo-convertisseur dans son circuit rotorique. La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator dont la construction est identique à celle d'une machine synchrone de puissance comparable et un rotor qui doit être conçu de telle sorte qu'il génère un minimum de pertes fer liées aux fréquences de glissement sur la plage de vitesse envisagée. En fonction du diamètre d'alesage les développantes rotoriques sont retenues soit par un bandage précontraint de fils en acier inoxydable, soit séparément par des tiges liées

à un anneau de support placé au-dessous d'elles. Dans les deux cas il y a lieu de veiller à ne pas nuire au refroidissement des têtes de bobines.

La machine asynchrone, accouplée à la pompe-turbine, est connectée au réseau 50 Hz et alimentée au rotor par un cyclo-convertisseur 12 pulse constitué, par phase, de deux ponts triphasés à thyristors couplés en anti-parallèle et alimentés depuis le réseau au travers de trois transformateurs à trois enroulements. Par le truchement des équipements de contrôle-commande, qui ne seront pas décrits en détail ici, le cyclo-convertisseur impose aux phases rotoriques de la machine un système triphasé de courants presque sinusoïdaux dont on peut imposer la fréquence, l'amplitude et la phase par rapport à la tension statorique. Par conséquent, il est possible d'obtenir un point de fonctionnement caractérisé par un choix libre de la vitesse, de la puissance active (marche moteur ou générateur) et de la puissance réactive (fourniture ou absorption), bien sûr dans les limites de variations définies par le concepteur au sens de l'exploitation prévue. Un dispositif de protection rapide contre les surtensions qui peuvent apparaître sur les enroulements rotoriques en cas de perturbation est nécessaire, il est représenté aussi sur la figure 1.

L'analyse des performances, et en particulier de la dynamique d'un tel motogénérateur exige un outil de simulation numérique capable de prendre en compte simultanément tous les composants de l'installation, à savoir non seulement le motogénérateur, mais également la cascade et son dispositif de contrôle-commande, la pompe-turbine et le réseau. Les deux simulations présentées ci-après ont été réalisées à l'aide d'un logiciel de simulation numérique à structure modulaire «Simsen» développé au Laboratoire d'électromécanique et de machines électriques de l'EPFL. Elles concernent la réponse du groupe à un creux de tension sur la haute tension du transformateur principal et l'injection instantanée de puissance active en mode turbine. Un bref descriptif de Simsen est donné en annexe.

### Creux de tension côté HT du transformateur principal

Cette première simulation traduit le comportement du groupe lorsqu'un creux de tension de 50% pendant 100 ms intervient sur les trois phases de la haute tension du transformateur principal (fig. 2). Le creux de tension apparaît lors d'un fonctionnement en alternateur pour une vitesse  $n_m = 0,95$  (p.u.) et un couple élec-

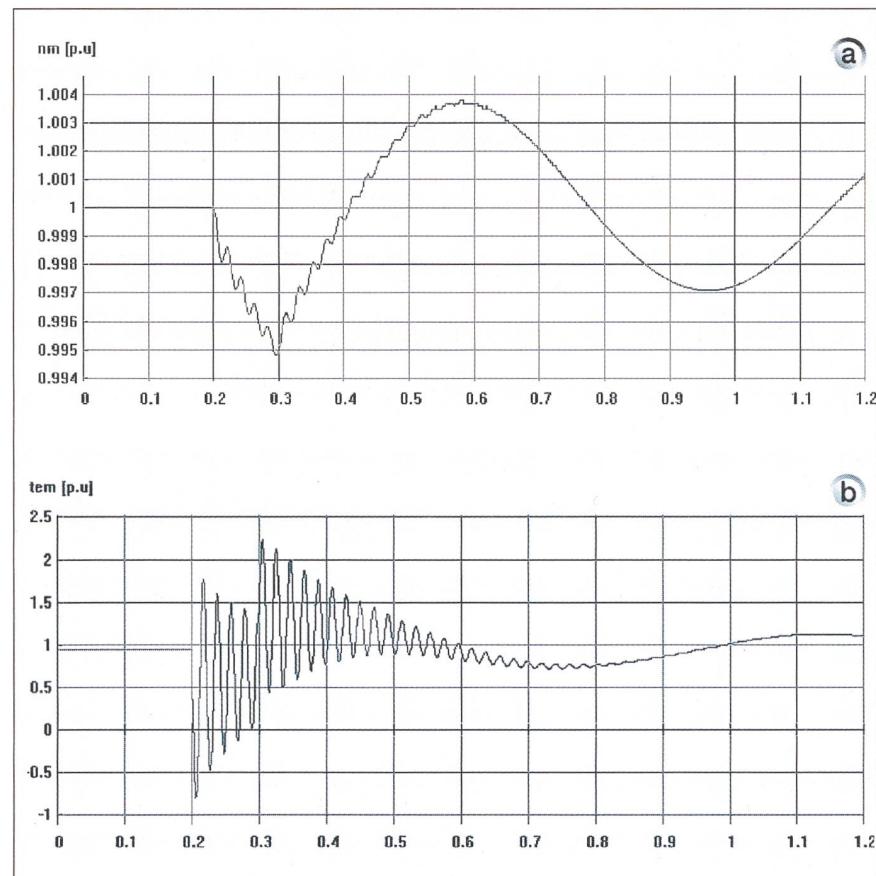


Figure 4 a: Vitesse d'une machine synchrone conventionnelle suite au creux de tension, b: Couple électromagnétique d'une machine synchrone conventionnelle suite au creux de tension

tromagnétique  $t_{em} = 0,6$  (p.u.) dans le système de référence (230 MVA, 15,75 kV, 50 Hz, 2p = 18, 333,3 t/min). Les figures 3a et 3b montrent les allures de la vitesse  $n_m$  et du couple électromagnétique  $t_{em}$  de la machine asynchrone suite à cette perturbation. Les figures 4a et 4b traduisent la réponse d'un groupe synchrone conventionnel équivalent au même creux de tension.

La comparaison entre les figures 3 et 4 montre que la machine asynchrone se stabilise très rapidement après la disparition du creux de tension, alors que la machine synchrone conventionnelle présente des oscillations de plus forte amplitude qui s'atténuent beaucoup plus lentement. L'effet stabilisateur exercé par la machine asynchrone sur le réseau est nettement plus favorable ainsi.

### Injection instantanée de puissance active dans le réseau

Avant l'injection instantanée le groupe est en marche alternateur et il délivre une puissance active de 0,91 (p.u.) à une vitesse de 0,95 (p.u.). La consigne de vitesse est ramenée alors à 0,85 en supposant que le couple développé par la turbine reste constant. La différence entre

les énergies cinétiques du groupe liées à la vitesse initiale et à la nouvelle vitesse de consigne est livrée au réseau et se traduit par une augmentation du courant limitée dans l'exemple décrit à 1,15 (p.u.). Dans ce cas l'alternateur délivre pendant 5,5 secondes une puissance active supplémentaire de 28 MW. Le supplément de puissance et le temps pendant lequel il est fourni dépendent bien sûr de la variation de la consigne de vitesse et de la limitation imposée au courant statique pendant l'injection.

Ce procédé permet de produire quasi-instantanément une puissance active appréciable pour couvrir une demande apparue sur le réseau; c'est une contribution précieuse à l'amélioration de la stabilité sans investissement supplémentaire. Les figures 5a, b, c et d présentent les résultats de la simulation numérique de cette injection de puissance active.

### Conclusions

Les avantages principaux liés à l'exploitation d'un groupe de pompage-turbine équipée d'un motogénérateur asynchrone avec une cascade rotorique de type cyclo-convertisseur ont été

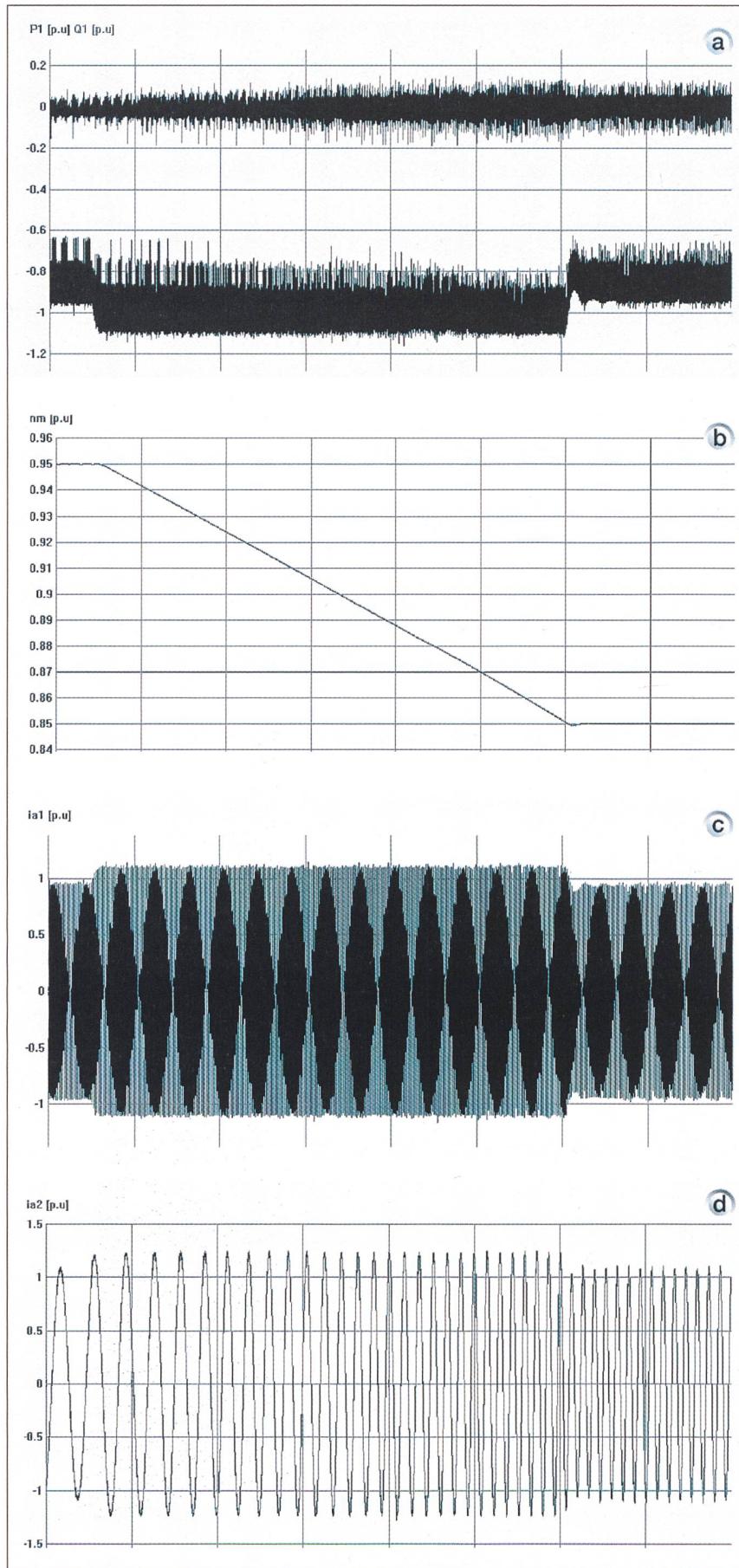


Figure 5 a: Puissance active et réactive au stator de la machine, b: Vitesse de la machine durant l'injection, c: Courant statorique durant l'injection, d: Courant rotorique durant l'injection

décris. Les simulations numériques de la réponse du groupe à un creux de tension sur le transformateur principal et de l'injection quasi-instantanée de puissance active supplémentaire dans le réseau témoignent des contributions importantes qu'un tel équipement est susceptible d'apporter à la stabilité des réseaux électriques.

## Annexe

### Le logiciel Simsens

Simsens est basé sur une structure modulaire qui permet la simulation numérique sur un PC du comportement en régimes stationnaire ou transitoire des réseaux électriques et des systèmes d'entraînement à vitesse variable présentant une topologie arbitraire. Cet outil développé au Laboratoire d'électromécanique et de machines électriques de l'EPFL présente les caractéristiques suivantes:

L'utilisateur compose directement à l'écran le réseau ou le système qu'il désire simuler en sélectionnant et reliant les modules nécessaires présentés dans la figure A conformément à la topologie souhaitée. Chaque module correspond à un élément spécifique du réseau, il comprend un ensemble d'équations différentielles basé sur le modèle de cet élément.

Un algorithme original établit automatiquement le système d'équations différentielles pour l'ensemble du réseau ou du système, et il prend en compte toutes les interactions possibles entre les différents modules. Un régime transitoire peut être constitué de plusieurs perturbations successives. Pour des applications sans semi-conducteurs, les conditions initiales s'obtiennent à l'aide d'un sous-programme de type load-flow.

L'intégration numérique est de type à pas variable afin de cerner précisément l'instant d'une perturbation, de l'ouverture ou la fermeture d'un disjoncteur ou du changement d'état d'un semi-conducteur.

La structure modulaire de Simsens lui confère un caractère évolutif. Il est simple, en effet, de modifier un module existant ou de créer un nouveau module exigé par une application spécifique. La version la plus récente comprend aussi des modules pour les dispositifs de réglage digitaux.

La taille des systèmes qu'il est possible de traiter avec Simsens n'est limitée que par la capacité du support informatique. L'allocation dynamique de la place mémoire nécessaire permet la simulation de grands systèmes (jusqu'à 1000 variables d'état).

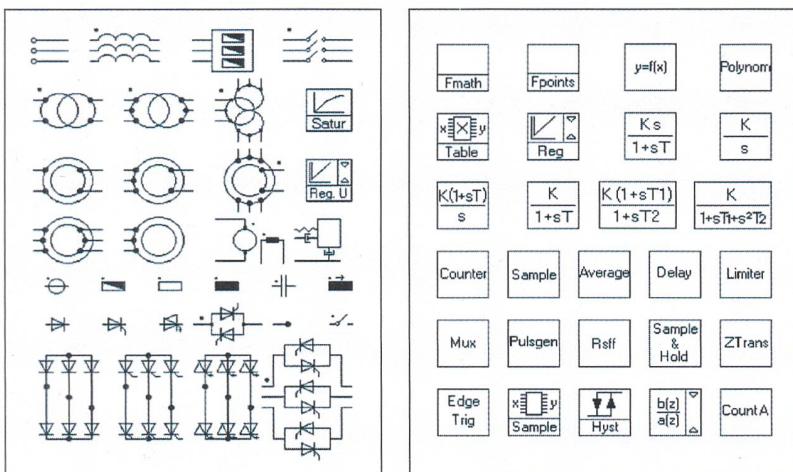


Figure A Liste non exhaustive des modules de Simsen

## Bibliographie

- [1] K. Kudo: Japanese Experience with a Converter-Fed Variable Speed Pumped-Storage System. *Hydropower & Dams*, Vol. 1, Issue 2, March 1994.
- [2] H. Hachiya, N. Nishijima, C. Shibata: 500 MVA Class Double-Fed Adjustable-Speed Machines for Pumped-Storage. *Hydropower into the Next Century*, pp. 453–459, Barcelona, June 1995.
- [3] J. M. Merino, A. Lopez: ABB Varspeed Generator Boosts Efficiency and Operating Flexibility of Hydropower Plant. *ABB Review* 3(1996), pp. 33–38.
- [4] D. Schafer, J.-J. Simond, B. Willy: Adjustable Speed Asynchronous Machine in Hydropower Plants and its Advantages for Electric Grid Stability, Cigré, Group 11, Rotating Machines, Paris 1998.
- [5] J.-J. Simond, A. Sapin, B. Kawkabani, D. Schafer, M. Tu Xuan, B. Willy: Optimized Design of Variable Speed Drives Based on Numerical Simulation. *EPE Trondheim*, 1997.

## Motorgenerator mit variabler Geschwindigkeit

Die Bewirtschaftung von Pump-Turbinen-Stationen mit Synchron-Motorgeneratoren ist mit zwei Nachteilen behaftet: Im Pumpbetrieb kann die Leistung nicht ausreichend reguliert werden und im Generatorbetrieb nimmt der Wirkungsgrad bei Teillast merklich ab. Der Artikel beschreibt, wie diese Nachteile durch den Einsatz eines Asynchron-Motorgenerators überwunden werden können. Dieser erlaubt beides: hohen Wirkungsgrad auch bei Teillast und variable Pumpleistung.

Dass darüber hinaus auch eine bessere Netzstabilität durch die Asynchrontechnik erreicht werden kann, zeigen Simulationen im zweiten Teil dieses Beitrages.

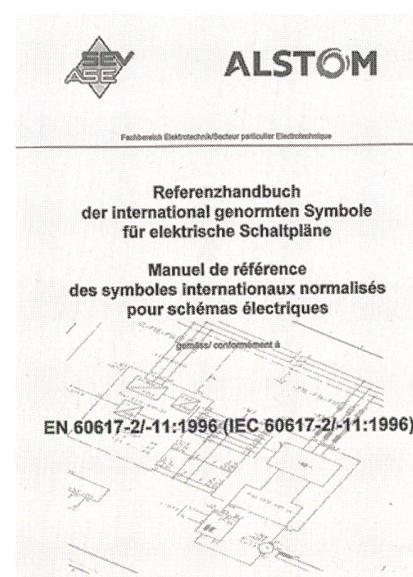
## Grafische Symbole für elektrische Schaltpläne übersichtlich und vollständig zusammengestellt

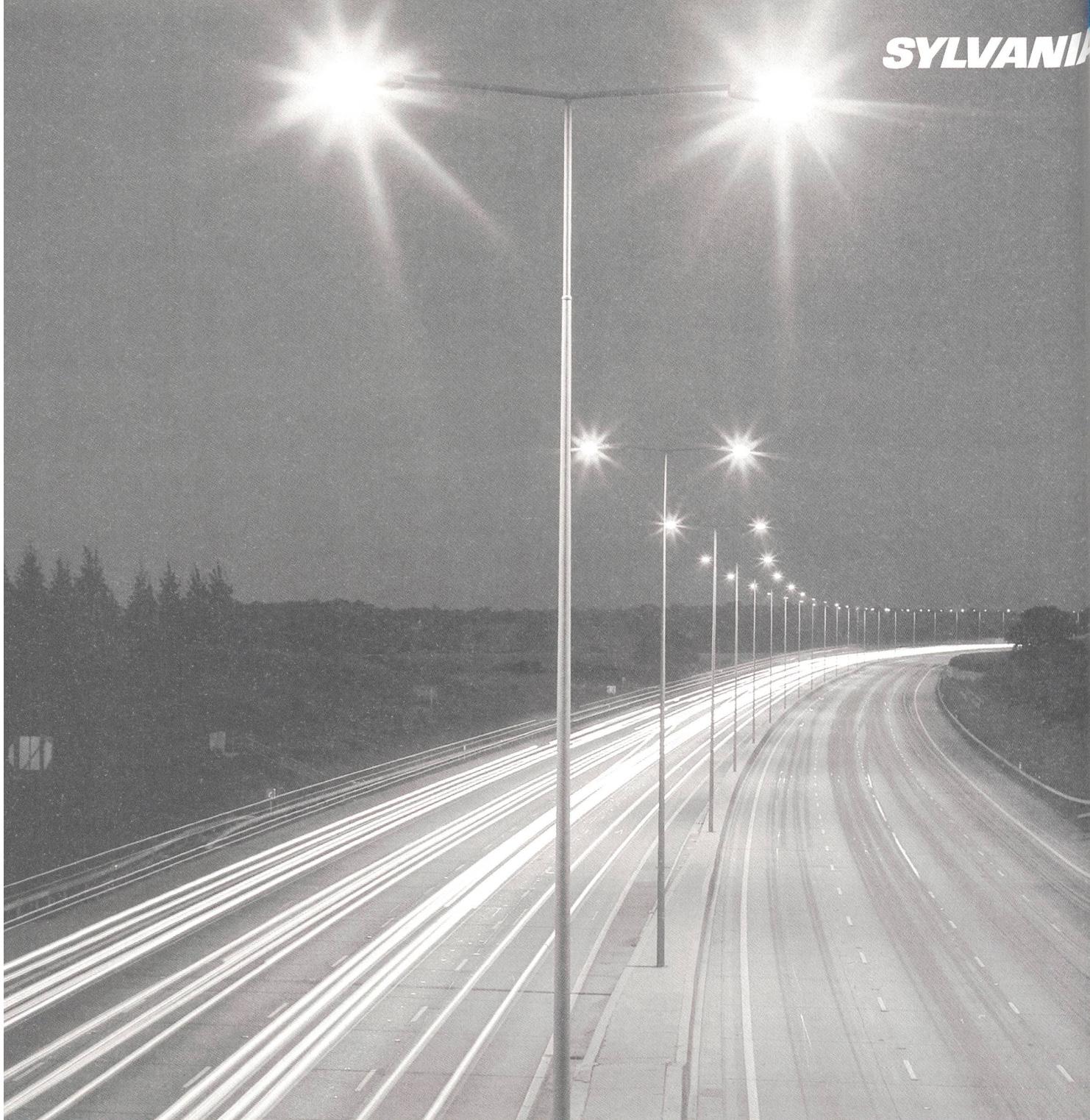
Der SEV hat gemeinsam mit der Firma Alstom ein «Referenzhandbuch der international genormten Symbole für elektrische Schaltpläne» erarbeitet. Das Handbuch basiert auf den deutschen und französischen Fassungen der Europäischen Norm EN 60617-2 bis -11:1996, (identisch mit der Internationalen Norm IEC 60617-2 bis -11:1996) und umfasst alle in dieser Norm enthaltenen Symbole.

Um eine bessere Übersichtlichkeit zu erreichen und um Kosten zu sparen, wurde auf eine umfassende Beschreibung der Symbole verzichtet. Das Handbuch beschränkt sich auf Kurzbenennungen und präsentiert Originalgrafiken der Symbole. Außerdem enthält es ausführliche Stichwortverzeichnisse. Diese Merkmale erleichtern das Auffinden der Symbole, ihr Verständnis und damit die

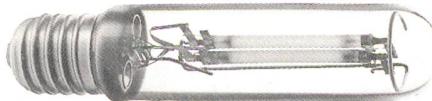
korrekte Anwendung in technischen Dokumentationen. Das Handbuch richtet sich in erster Linie an Elektroingenieure und Elektroinstallateure, die sich speziell mit der Erstellung und Anwendung von elektrischen Schaltplänen für die Produktdokumentation befassen. Empfohlen wird es zum Gebrauch vor allem in Konstruktionsbüros, bei Projektierung und Ausführung von Elektroanlagen, in Technischen Hoch- und Berufsschulen (sowohl für Dozenten als auch für Studenten) und für die Erstellung der Symbolbibliotheken in den CAD-Systemen.

Das Loseblattwerk kann jederzeit mit minimalem Aufwand aktualisiert werden. Preis Fr. 266.–. Bestellungen: SEV, Normen- und Drucksachenverkauf, 8320 Fehraltorf, Tel. 01 956 11 65/66, Fax 01 956 11 68.



**DOPPELTE LEBENSDAUER, HALB SO VIELE PROBLEME**

Super Natriumdampf-Hochdrucklampen (SHP-S) haben eine recht lange Lebensdauer. Dennoch kann das Auswechseln zu starken Verkehrsbehinderungen führen, wenn z.B. Fahrstreifen oder ganze Straßen gesperrt werden müssen. Die revolutionären Sylvania SHP Twinarc S Lampen mit 2-Brennersystem, brauchen im Gruppenaustausch nur alle 4, oder sogar nur alle 6 Jahre (250W/400W)



ausgewechselt zu werden. Wartungs- und Verwaltungskosten werden damit um 50% reduziert. Die etwas höheren Anschaffungskosten für die SHP Twinarc S sind jedoch bereits nach dem ersten Jahr amortisiert. Zudem zünden die SHP Twinarc S sofort nach einem Stromunterbruch und sind dadurch noch zuverlässiger. Die doppelte Lebensdauer der SHP Twinarc S halbiert wirklich Ihre Probleme.

**Sylvania, eine Quelle der Inspiration.**

SYLVANIA LIGHTING S.A., 4 CHEMIN DES LECHERES, CH-1217 MEYRIN. TEL: +41 (0) 22 719 85 80 FAX: +41 (0) 22 719 85 81