

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 93 (2002)

Heft: 7

Artikel: Simulation des réseaux de des systèmes d'entraînements électriques

Autor: Simond, J.-J. / Sapin, A. / Allenbach, P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855394>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

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

Simulation des réseaux et des systèmes d'entraînements électriques

Simsen – un logiciel modulaire et évolutif

Le Laboratoire de machines électriques (LME) de l'EPFL a développé au cours des dernières années un logiciel de simulation numérique pour l'étude et l'optimisation, en régimes stationnaires ou transitoires, de réseaux et de systèmes d'entraînements électriques présentant une topologie a priori quelconque. Dans cet article quelques exemples d'application sont décrits.

Ce logiciel, appelé *Simsen*, est bâti sur une structure modulaire, chaque module renferme la modélisation d'un composant (machines électriques, convertisseurs, transformateurs, lignes, éléments mécaniques, équipements de contrôle-com-

J.-J. Simond, A. Sapin, Ph. Allenbach

mande et de réglages analogiques ou digitaux, etc.). L'utilisateur traduit une topologie de son choix en positionnant et en reliant les modules nécessaires directement sur la grille d'édition de l'écran de son PC. Il définit ensuite les paramètres relatifs à chaque module ainsi que le régime, stationnaire ou transitoire qu'il désire simuler. Les résultats s'obtiennent sous forme graphique en cours de simulation ou à l'issue de celle-ci. La structure modulaire confère à *Simsen* un caractère évolutif, il est en effet simple de modifier un module existant ou d'en créer un nouveau lorsqu'une application l'exige; il est aussi possible de modifier une topologie prédéfinie par la suppression ou par l'ajout de modules.

Ce produit d'envergure repose sur un développement d'environ 15 hommes-années. C'est un outil robuste, précis, rapide et performant pour l'étude, la conception et l'exploitation des réseaux et des systèmes d'entraînements électriques. Depuis cinq ans la diffusion de *Simsen* est réjouissante, cet outil est utilisé par de nombreux fabricants et exploitants de renom en Suisse et à l'étranger, ainsi que par des écoles d'ingénieurs à des fins didactiques. Aujourd'hui, ce logiciel a atteint sa pleine maturité. Il est régulièrement mis à jour et complété par de

nouvelles extensions. Dans le futur, le LME va poursuivre le développement de *Simsen* en l'étendant aux technologies énergétiques émergentes.

Objectifs initiaux et phases de développement

Les logiciels de simulation numérique pour les réseaux et systèmes d'entraînements électriques disponibles sur le marché au début des années 90 étaient certes déjà nombreux, mais en majorité insuffisamment flexibles et conviviaux, donc peu performants. En particulier, il n'existait pas d'outils de simulation numérique exploitables efficacement pour des topologies mêlant des équipements de réseaux classiques et de l'électronique de puissance. L'objectif initial majeur visé par *Simsen* était de créer un outil présentant les caractéristiques principales suivantes:

- applicable au développement, au design optimisé et à l'exploitation en régimes stationnaires ou perturbés des réseaux et systèmes d'entraînements

électriques présentant une topologie a priori quelconque;

- évolutif, c'est-à-dire extensible en tout temps par l'adjonction de modules supplémentaires exigés par des applications nouvelles;
- performances élevées, confort d'utilisation, robustesse, précision et rapidité pour des utilisations à des fins de R&D¹, d'exploitation industrielle ou didactiques;
- exploitable sur PC, actuellement sous Windows NT ou Windows 2000, pour des topologies de tailles qui peuvent être importantes grâce à l'utilisation de variables dynamiques.

Ce développement trouve son origine dans l'enchaînement d'un projet de semestre, d'un projet de diplôme et d'une thèse de doctorat [1, 2]. Les résultats prometteurs obtenus en 1995 à l'issue de la thèse précitée justifiaient la décision de poursuivre l'aventure *Simsen* avec trois ambitions prioritaires nouvelles, soit:

- créer un algorithme capable de générer automatiquement le système d'équations différentielles pour l'ensemble d'une topologie définie graphiquement sur la grille d'édition;

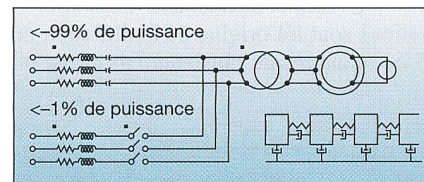


Figure 1 Turbogroupe sollicité par une résonance hyposynchrone

La ligne (1% de puissance) est déclenchée après 0,033 sec. et enclenchée de nouveau après 3,8 sec.

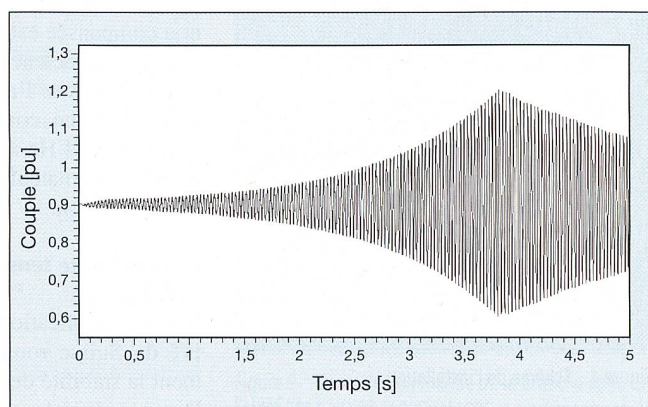


Figure 2 Couple entre le turbo-alternateur et la première turbine lors d'une résonance hyposynchrone

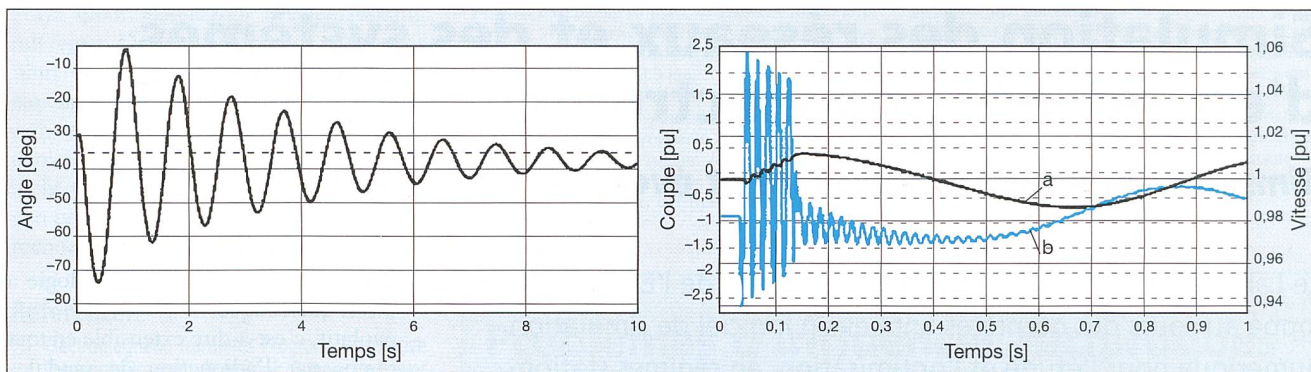


Figure 3 Stabilité des groupes de Cleuson-Dixence lors d'un court-circuit sur la liaison HT Chamoson-Romanel
a: vitesse, b: couple

- mettre en œuvre d'interfaces d'entrée et de sortie plus élaborées afin d'offrir un bon confort d'exploitation aux utilisateurs extérieurs;
- élargir le domaine d'applications par l'intégration de structures ou de modules nouveaux et issus des activités de R&D du LME et des projets de semestre et de diplôme des étudiants.

Compte tenu de sa taille grandissante, le logiciel *Simsen* exigeait une méthodologie de développement très stricte et des procédures de tests systématiques avant l'intégration de tout module nouveau. Le développement de *Simsen* s'est ainsi poursuivi à la fois au plan de ses structures informatiques et au sens d'un élargissement permanent de ses champs d'applications. Ce développement s'est aussi appuyé sur les nombreuses collaborations entre le LME et l'industrie, au travers d'études et de mandats. Ces collaborations sont à l'origine de la diffusion de *Simsen* auprès de plusieurs fabricants ou

exploitants de renom en Suisse et à l'étranger.

Les étapes les plus récentes, au-delà des améliorations apportées en permanence au confort d'utilisation et à l'efficacité de l'outil, concernent l'intégration de stratégies de réglages mixtes (analogique et digitale), d'architectures nouvelles de convertisseurs multiniveaux ainsi qu'une procédure de test d'algorithmes de réglage convertis en code C intégrés sous *Simsen* avant leur transfert (download) sur le DSP² de l'installation.

Dans son état actuel, *Simsen* offre une palette de plus de 80 modules pour la définition des topologies de réseaux ou de systèmes d'entraînements électriques.

Exemples d'application

Les exemples ci-après sont destinés à illustrer quelques cas d'application. D'autres exemples sont décrits dans [3, 4, 5, 6, 7].

Résonance hyposynchrone

Ce premier exemple reprend le cas traité dans [8] et pris en référence à des fins de validation. Il s'agit de l'apparition d'une résonance hyposynchrone sur la ligne d'arbre d'un turbogroupe alimentant une ligne de transport compensée par des condensateurs série (figure 1). La résonance apparaît au moment où la ligne non compensée est déconnectée, elle disparaît au réenclenchement de celle-ci. La figure 2 illustre l'apparition, puis la disparition d'une composante pulsante de couple à 31,4 Hz à l'accouplement entre le turbo-alternateur et la première turbine basse pression.

Réseau haute tension (HT), étude de stabilité

Cette application concerne le réseau HT de Suisse romande et plus précisément la stabilité des groupes de Cleuson-Dixence dans le cas où un court-circuit

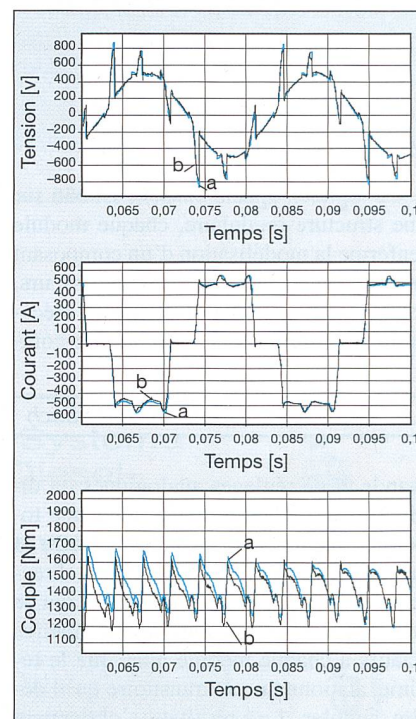


Figure 5 Comparaison entre calculs et mesures à charge nominale

Alimentation à 48,5 Hz; tension statorique; courant statorique; couple électromagnétique; a: valeurs simulées, b: valeurs mesurées

triphase intervient pendant 100 ms sur la liaison 400 kV Chamoson-Romanel. La figure 3 décrit la réponse des groupes de Cleuson-Dixence à ce court-circuit en termes d'angle de la roue polaire, de vitesse et de couple électromagnétique. Cet exemple est certes de nature classique, il quitte cependant la capacité de *Simsen* de traiter des réseaux de grande taille, celui-ci comporte en effet plus de 200 éléments (alternateurs, transformateurs, lignes, charges, disjoncteurs) qui interagissent tous ensemble. *Simsen* livre non seulement les résultats relatifs aux groupes de Cleuson-Dixence, mais aussi ceux liés à tous les autres éléments du réseau.

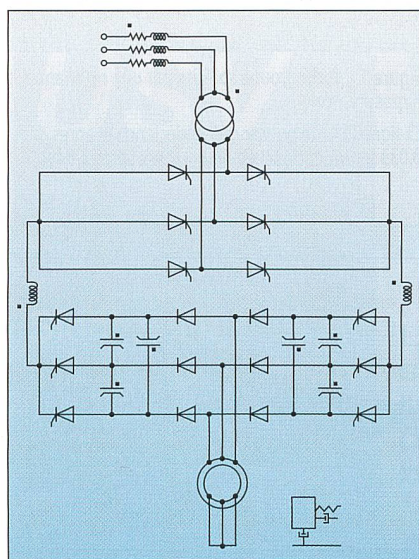


Figure 4 Schéma de l'installation

Moteur asynchrone: 280 kW, 380 V, 50 Hz, 1485 t/min

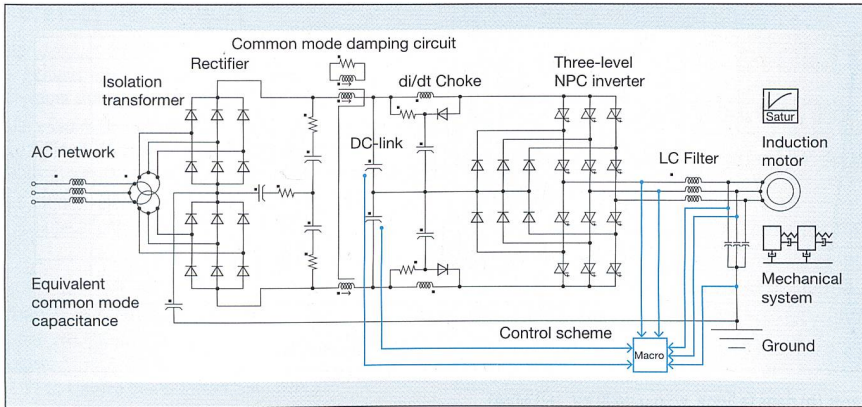


Figure 6 Moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension trois niveaux

Machine asynchrone alimentée par un convertisseur à commutation forcée

Cet exemple (figures 4 et 5), même s'il concerne une technologie en voie d'abandon, reste intéressant pour deux raisons: la première est qu'il fait intervenir au plan de l'onduleur des commutations ex-

trêmement rapides, la deuxième est que des mesures ont été effectuées lors d'une expertise, puis comparées aux résultats livrés par la simulation numérique. La mesure du couple électromagnétique a été réalisée à l'aide d'un torsiomètre digital développé au LME.

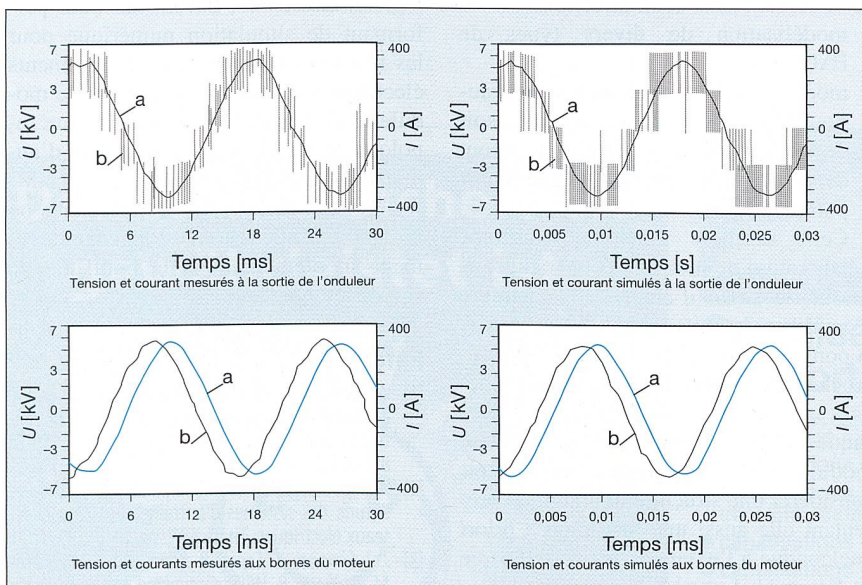


Figure 7 Courants et tensions mesurés et simulés en charge stationnaire

a: courants, b: tensions

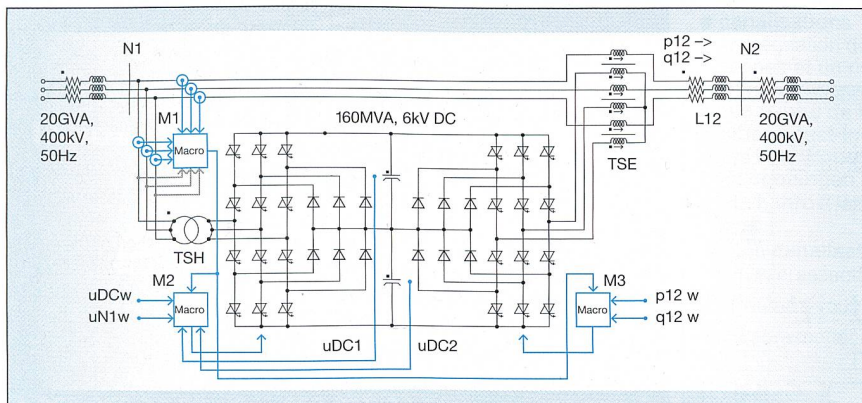


Figure 8 Ligne de transport HT équipée d'un FACTS de type UPFC à trois niveaux

Moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension à trois niveaux

Cet exemple concerne un entraînement industriel développé récemment par ABB. Un moteur asynchrone moyenne tension est alimenté par un onduleur à trois niveau au travers d'un filtre de sortie sinus (figure 6). Le filtre garantissant une tension quasiment sinusoïdale, il devient possible d'alimenter d'anciens moteurs non en mesure de supporter de forts gradients de tension. Cet entraînement est piloté par un réglage digital très élaboré comportant en particulier un contrôle direct du flux et du couple.

L'optimisation d'un tel entraînement implique le recours à un outil de simulation capable de traduire non seulement la partie puissance, mais aussi le réglage échantillonné selon des périodes différentes dans la plage de 25 μ s à 1 ms. L'équivalent de ce réglage programmé dans un DSP a été converti sous *Simsen* en usant de plus de 200 modules. De la sorte, il devenait possible de simuler et d'optimiser le comportement de l'entier de cet entraînement par voie exclusivement numérique.

La figure 7 illustre une comparaison entre calcul et mesure au sens des courants et tensions avant et après le filtre inséré entre l'onduleur et le moteur.

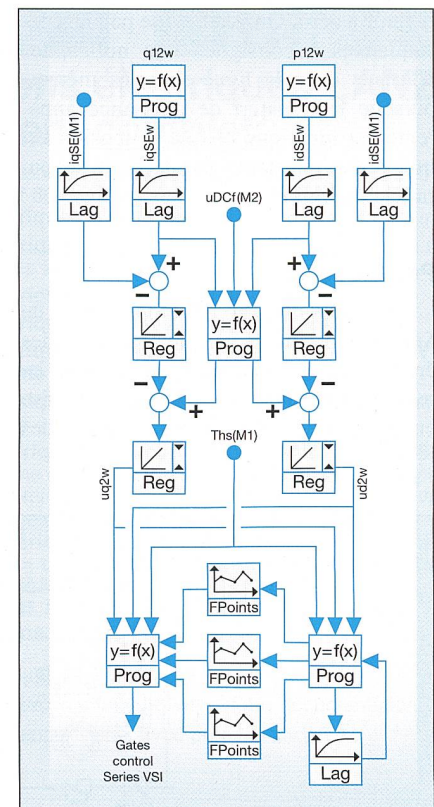


Figure 9 Contrôle-commande de la branche série de l'UPFC

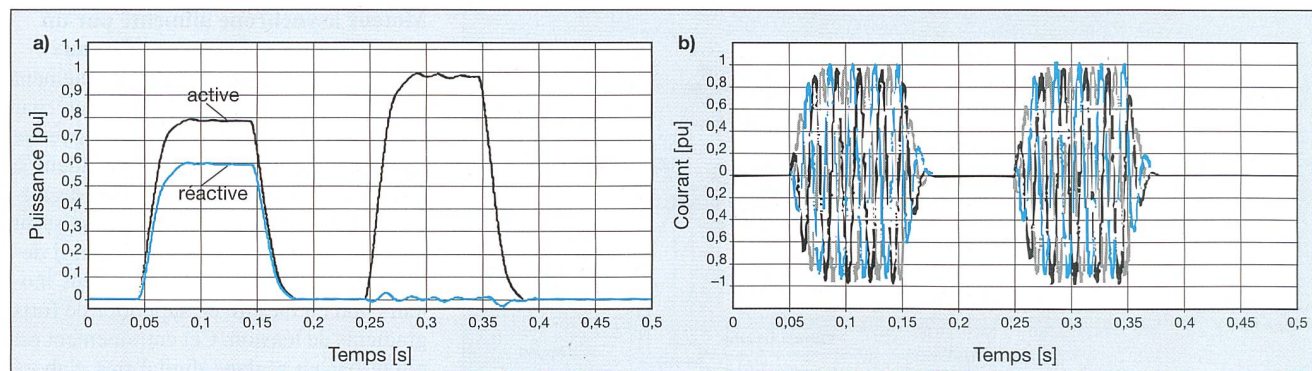


Figure 10 Contrôle des transferts de puissances (a) et courants (b) dans la ligne. en p.u. (400 kV, 160 MVA)

Ligne de transport HT équipée d'un FACTS³ de type UPFC⁴

L'insertion d'un FACTS de type UPFC dans une ligne HT (figure 8) permet de contrôler très rapidement et indépendamment les uns des autres le niveau de tension et les transferts de puissances active et réactive [7]. La macro contenant les éléments nécessaires au contrôle-commande de la branche série de l'UPFC est décrite en figure 9. La figure 10 représente les transferts de puissances active p et réactive q ainsi que le courant au travers de la ligne lorsque l'on fait varier les consignes imposées. Initialement p et q sont nulles, on impose ensuite $p = 0,8$ p.u. et $q = 0,6$ p.u. (1 p.u. = 160 MVA), puis à nouveau zéro, puis $p = 1$ et $q = 0$ avant de revenir à zéro. On vérifie que pendant les séquences à consignes non nulles, les courants dans la ligne sont les mêmes, puisque le transfert de puissance apparente est identique et que la tension est maintenue constante par la branche parallèle de l'UPFC.

Perspectives

La poursuite du développement de *Simsen* s'orientera vers les technologies énergétiques émergentes par la mise en œuvre de modules nécessaires à la prise en compte de celles-ci dans l'étude des

systèmes énergétiques du futur (exemple: piles à combustible). Un couplage avec un programme de calculs numériques de champs magnétiques est envisagé. A cela s'ajoute le souci de faire évoluer la qualité des interfaces d'entrée et de sortie en usant des outils informatiques apparaissant nouvellement sur le marché lorsqu'ils sont performants. Le LME travaille actuellement dans deux directions

- modélisation de divers types de FACTS;
- modélisation des éléments hydrauliques d'un site de production, soit de tous les éléments situés en amont de l'accouplement motogénérateur/pompe-turbine

Cette dernière extension implique l'élaboration de modules pour traduire le bassin, le canal d'amenée, la chambre d'équilibre, le puits blindé, les vannes et la pompe-turbine. Dans une première approche, ces divers éléments ont été modélisés au travers «d'équivalents électriques», afin de bénéficier du caractère modulaire de *Simsen* et de pouvoir considérer une structure hydraulique présentant elle aussi une topologie a priori quelconque à l'exemple de celle illustrée en figure 11. Les premiers résultats obtenus récemment sont prometteurs. Parmi les éléments hydrauliques précités, la pompe-turbine est la plus difficile à

modéliser en régime transitoire, cette tâche est abordée dans le cadre d'un travail de doctorat au sens d'une collaboration entre le Laboratoire des machines hydrauliques de l'EPFL et le LME.

Conclusions

Après dix années de développement, le logiciel *Simsen* est devenu un outil performant de simulation numérique pour les réseaux et systèmes d'entraînements électriques. Le nombre important de modules à disposition pour traduire une topologie ouvre de larges domaines d'applications. Le succès rencontré par la diffusion de *Simsen* auprès de fabricants ou d'exploitants de renom est un encouragement supplémentaire à la poursuite de son développement.

Références

- [1] A. Sapin, J.-J. Simond: Un simulateur numérique à structure modulaire pour systèmes énergétiques et machines électriques. Bulletin ASE/AES 85(1993)23, p. 27-33.
- [2] A. Sapin: Logiciel modulaire pour la simulation et l'étude des systèmes d'entraînements et des réseaux électriques. Thèse EPFL no 1346, 1995.
- [3] 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 1997, Trondheim.
- [4] D. Schafer, J.-J. Simond: Les machines asynchrones à vitesse variable dans les centrales hydrauliques et leurs avantages sur la stabilité des réseaux électriques. Cigré, Paris 1998.
- [5] A. Sapin, J.-J. Simond, P. Allenbach, B. Kawkabani: Mixed signal simulation applied to modern adjustable speed drives. Electrimacs 1999, Lisbonne.
- [6] A. Sapin, P. Allenbach, J.-J. Simond: Modeling of Multi-Windings Phase Shifting Transformers for DC Supplies. ICEM 1998, Helsinki.
- [7] A. Sapin, J.-J. Simond: Investigation of the 3-level unified power flow controller. EPE 2001, Graz.
- [8] I. M. Canay: A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine. IEEE, PAS, vol. PAS-101, no. 10, Octobre 1982.

Links
<http://simsen.epfl.ch>

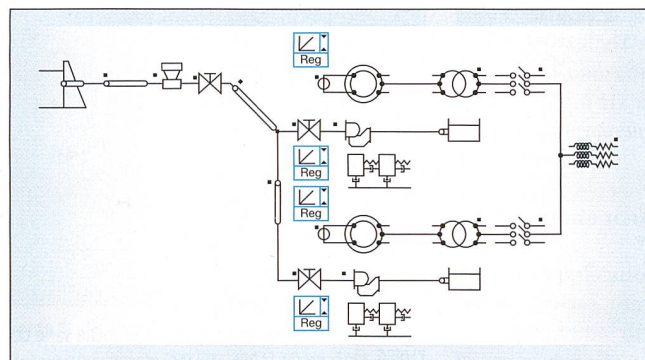


Figure 11 Topologie d'un site hydro-électrique défini sous *Simsen*

Adresses des auteurs

Jean-Jacques Simond, Prof. Dr., Laboratoire de machines électriques, EPFL, 1015 Ecublens, jean-jacques.simond@epfl.ch

Alain Sapin, Dr., Laboratoire de machines électriques, EPFL, 1015 Ecublens, alain.sapin@epfl.ch

Philippe Allenbach, ing. dipl. EPFL, Laboratoire de machines électriques, EPFL, 1015 Ecublens, philippe.allenbach@epfl.ch

¹ R&D: Research and Development

² DSP: Data Signal Processing

³ FACTS: Flexible Alternative Current Transmission System

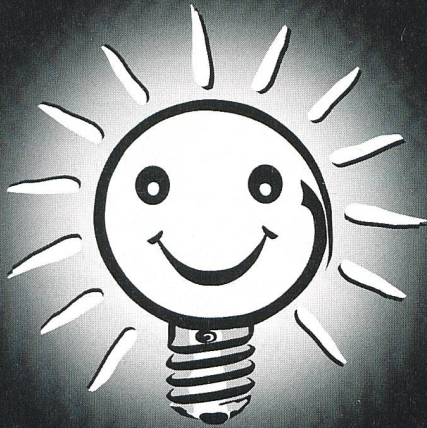
⁴ UPFC: Unified Power Flow Controllers

Simulation elektrischer Netze und Antriebssysteme

Simsen – eine modular aufgebaute, erweiterungsfähige Software

Das Maschinenlaboratorium der ETH Lausanne hat im Laufe der letzten Jahre eine Simulationssoftware zur Untersuchung und Optimierung stationärer und transients Vorgänge in elektrischen Netzen und Antrieben entwickelt, die auf beliebige Topologien angewendet werden kann. Im vorliegenden Beitrag werden einige Applikationsmöglichkeiten vorgestellt.

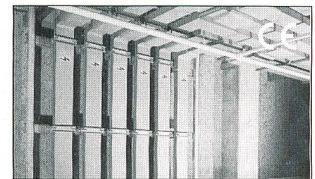
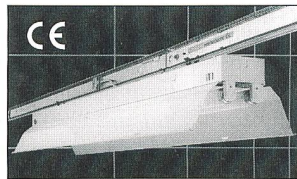
**Damit Ihre Sicherheit
gewährleistet ist.**



Innovativ in Technik und Design

ALMAT[®]
Notlichtsysteme

ALMAT AG • 8317 Tagelswangen
Tel. 052 355 33 55 • Fax 052 355 33 66 • www.almat.ch



Canalisations électriques LANZ L'assortiment complet:

LANZ livre les canalisations électriques les plus modernes 25 – 8'000 A/ 1 – 245 kV, IP 54 et IP 68 homologués selon les normes CE/CEI:

- canalisations électriques d'éclairage pour la pose de luminaires
- canalisations électriques pour le transport d'énergie entre les transformateurs et les installations de distribution
- canalisations électriques pour l'alimentation de machines
- canalisations électriques pour les zones montantes
- canalisations électriques d'allège «kb» avec 2 réseaux 230 V et 400 V/63 A et blocs de sortie enfichables à volonté
- canalisations électriques écrannées satisfaisant aux exigences EMV les plus strictes
- canalisations électriques non-corrosives LANZ HE IP 68 à imprégnation de résine coulée pour une sécurité maximale des personnes et un risque minimal d'incendie dans les bâtiments, ouvrages souterrains, tunnels, galeries et installations off-shore.

Nous avons de l'expérience, des produits de qualité et une production «just-in-time» certifiée ISO 9001, et livre des canalisations électriques dans le monde entier.

lanz oensingen sa Tél. 062/388 21 21 Fax 062/388 24 24

e-mail: info@lanz-oens.com

- ☐ Les canalisations électriques LANZ m'intéressent! Veuillez me faire parvenir votre documentation.

☐ Pourriez-vous me rendre visite, avec préavis, s.v.p.?

Nom/adresse/tél.



lanz oensingen sa
CH-4702 Oensingen • Téléphone ++41/62 388 21 21

Eine modular erweiterbare
USV-Lösung mit hoher Redundanz
und Flexibilität speziell für Ihre
Kommunikationssysteme



USV von 1,5 bis 18 kVA

MODULYS®

THE BEST WAY TO GROW UPS

MODULYS® Flexibel und Wirtschaftlich

Ein ausbaufähiges Baukastensystem, das mit Ihrem Unternehmen und den Anforderungen wächst:

- Unterschiedlichste Basiskonfigurationen und Nennleistungen
- Modulare Erweiterung der Leistungsstufen und Überbrückungszeiten
- keine Wartung erforderlich

MODULYS® Sicher und Zuverlässig

Notstromversorgung, wann immer Sie diese brauchen:

- Redundanz durch interne Parallelschaltung
- Hohe Zuverlässigkeit durch Hybrid-technologie
- 2 Netzeinspeisungen

MODULYS® Bedienerfreundlich

Das System, für einfache Handhabung entwickelt, könnte gar nicht leichter zu bedienen sein:

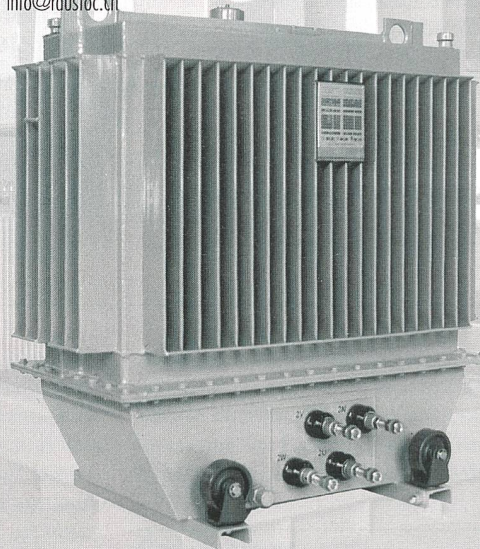
- Plug-in-Module mit intuitiver Bedienung
- Verlängerte Lebensdauer der Batterie durch neueste Ladetechnologie
- Kommunikation über Internet oder SNMP
- E-Mail Service



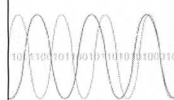
SICON SOCOMECE AG • Industriestrasse 17
CH - 4415 Lausen • Tel. 061 - 921 33 00 • Fax 061- 921 33 11
E-mail: sicon-socomec@bluewin.ch • www.sicon-socomec.de

RAUSCHER & STOECKLIN AG
ELEKTROTECHNIK
POSTFACH
CH-4450 SISSACH
Tel. +41 61 976 34 66
Fax +41 61 976 34 22
Internet: www.raustoc.ch
E-Mail: info@raustoc.ch

**RAUSCHER
STOECKLIN**



**Wir bauen Transformatoren
nach Mass.**



BULLETIN

1/2000

des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
de l'Association des entreprises électriques suisses

Fr. 12.-



Informations- und Energietechnik
Techniques de l'information et de l'énergie



Innovations-Forum in Winterthur
Eine Data-Warehouse-Applikation für Elektrizitätswerke
Réseaux de distribution en environnement ouvert