

# Analyse des réseaux électriques

Autor(en): **Germond, A. / Chamorel, P.-A. / Rossier, C.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **69 (1978)**

Heft 12

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-914902>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

gences d'encombrement et d'environnement, conduit à la mise au point d'isolants, de systèmes d'isolation, d'appareillages et d'installations compacts supportant des champs électriques élevés.

Sur le plan de la recherche et du développement, il est donc nécessaire d'étudier d'une part le comportement des matériaux isolants en champ électrique élevé, d'en améliorer celui-ci et d'en proposer de nouveaux plus performants. Ce travail ne peut avancer qu'au prix de l'établissement de meilleurs liens entre les descriptions corpusculaire et macroscopique des phénomènes étudiés. Dans ce but, il est nécessaire de regrouper, sous l'impulsion d'ingénieurs électriciens: des physiciens, des chimistes et des ingénieurs des matériaux, afin de tendre vers la mise au point de superisolants. Pour vérifier expérimentalement les théories élaborées, il est nécessaire de disposer d'un laboratoire des matériaux électriques permettant d'effectuer des tests statistiques et d'analyser les résultats. D'autre part, sur le plan de la fiabilité d'exploitation des réseaux électriques, des méthodes globales doivent être développées pour la coordination de l'isolement et la compatibilité électromagnétique. Afin de fournir aux programmes de calcul des modèles réalistes, il est nécessaire de disposer d'un laboratoire HT permettant d'effectuer des essais synthétiques regroupant des sources de haute tension à haute impédance et des sources de courants intenses à basse impédance pouvant être synchronisées.

#### Adresse des auteurs

M. Aguet, Ing. dipl. EPFL-SIA, Ph. Blech, Ing. dipl. EPFL, M. Ianovici, Dr. Ing., EPFL, B. Schaedeli, Ing. ETS, Chaire d'Installations Electriques, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.

#### Bibliographie

- [1] E. Hamburger: Les installations électriques de l'institut d'électrotechnique de l'EPF-Lausanne. Bull. ASE 62(1971)4, p. 217...226.
- [2] M. Aguet: Technique de la haute tension. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Publication N° 147. Lausanne, EPFL, 1975.
- [3] M. Aguet et B. Staub: Etude des phénomènes précédant à l'apparition de la décharge disruptive à l'intérieur de la porcelaine électrotechnique à fréquence de 50 Hz. Symposium International Technique de la Haute Tension 9...13 septembre 1975 à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich. Zürich, ASE, 1975; Rapport N° 5.2-01, p. 617...621.
- [4] J.-C. Andersen: Diélectriques. Paris, Dunod, 1966.
- [5] E. Flegler: Einführung in die Hochspannungstechnik. Karlsruhe, Verlag G. Braun, 1964.
- [6] H. Steinbigler: Anfangsfeldstärken und Ausnutzungsfaktoren rotationssymmetrischer Elektrodenanordnungen in Luft. Dissertation der Technischen Hochschule München, 1969.
- [7] D. Kind: Einführung in die Hochspannungs-Versuchstechnik. Lehrbuch für Elektrotechniker. Unizext. Braunschweig, Verlag Vieweg, 1972.
- [8] H. Kärner: Die Erzeugung steilster Stoßspannungen hoher Amplitude. Dissertation der Technischen Hochschule, München 1967.
- [9] J.-C. Sabonnadière et P. Auriol: Surtections de manœuvre dans les réseaux HT et THT. Principales méthodes de calcul des régimes transitoires dans les réseaux THT. Rev. Gén. Electr. 82(1973)11, p. 718...727.
- [10] A. J. Schwab: Hochspannungsmesstechnik. Messgeräte und Messverfahren. Berlin/Heidelberg, Springer Verlag, 1969.
- [11] R. H. Golde: Lightning. Vol. 1: Physics of lightning. Vol. 2: Lightning protection. London/New York/San Francisco. Academic Press, 1977.
- [12] A. Boillot: Coordination de l'isolement et retard à l'amorçage. Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches EDF -(1971)2, p. 65...81.
- [13] M. Aguet, P. Blech et M. Ianovici: Coordination probabilistique de l'isolement des réseaux électriques à haute tension. Bull. ASE/UCS 68(1977)24, p. 1297...1303.
- [14] D. H. J. White: Electromagnetic interference and compatibility. Vol. 1...6. Germantown/Maryland, D. White Consultants, 1971...1975.
- [15] M. Aguet et U. Cavalli: Méthode de calcul de l'influence des câbles à haute tension sur les lignes de télétransmission. Bull. ASE/UCS 67(1976)16, p. 846...853.
- [16] H. Krauss: Détermination du champ électrique à des structures à symétrie de rotation, à l'aide de la méthode du papier de résistance. Bull. ASE 64(1973) 11, p. 721...725.
- [17] T. Lehmann: Méthode graphique pour déterminer le trajet des lignes de force dans l'air. La Lumière Electrique 8(1909)43, p. 103...110 et N° 45, p. 163...167.
- [18] H. Kärner: Erzeugung steilster Stoßspannungen hoher Amplitude. Bull. SEV 58(1967)24, S. 1096...1110.
- [19] M. Aguet e. a.: Influence des prises de terre durant un choc de foudre. Rapport no. R-3.12 de la quatorzième Conférence Internationale pour la Protection contre la Foudre, Gdansk, 22...26 mai 1978.
- [20] S. F. Philip: The vacuum-insulated, varying capacitance machine. IEEE Trans. EI 12(1977)2, p. 130...136.

## Analyse des réseaux électriques

Par A. Germond, P.-A. Chamorel, C. Rossier et O. Bissat

621.311.1.011.7;

*Etant donné la complexité des problèmes posés par la planification et l'exploitation des réseaux électriques actuels, l'application de méthodes modernes d'analyse et leur traitement par calculateurs numériques s'imposent. Le présent article relève la part que prend l'EPFL au développement de ces méthodes numériques et décrit les activités d'un groupe d'ingénieurs constituant le «Centre d'étude des réseaux électriques» dans les domaines de l'enseignement et de la recherche.*

*Wegen der Komplexität der sich bei der Planung und beim Betrieb der heutigen elektrischen Netze stellenden Probleme ist die Verwendung moderner Analysemethoden und deren Auswertung mittels digitaler Rechner notwendig. Der Aufsatz hebt den Anteil der ETH Lausanne an der Entwicklung der numerischen Methoden hervor und beschreibt die Tätigkeit der das «Centre d'Etude des réseaux électriques» bildenden Ingenieurgruppe in Unterricht und Forschung.*

### 1. Introduction

#### 1.1 Historique

Sous le nom de *Centre d'étude des réseaux électriques* (CERE), quelques assistants à la Chaire d'installations électriques se sont intéressés dès 1969 à développer un groupe capable de répondre aux besoins de formation des ingénieurs dans les techniques nouvelles de l'analyse numérique appliquées à l'étude des problèmes de la production, du transport et de la distribution d'énergie électrique.

L'essor de ces méthodes numériques à cette époque a été favorisé par le développement de techniques de résolution de systèmes linéaires très creux [1]<sup>1)</sup> permettant de résoudre sur ordinateur les problèmes posés par l'étude des grands systèmes d'énergie électrique [2].

<sup>1)</sup> Voir la bibliographie à la fin de l'article.

Dès 1972, un cours à option *Analyse des Réseaux Electriques de Puissance* a été inscrit au plan d'études. En 1974, un cours de formation continue, organisé par la SVIA [3], permettait à de nombreux ingénieurs de se familiariser avec ces techniques. Entre-temps, plusieurs techniques de calcul étaient développées et des programmes de calcul installés sur l'ordinateur CDC-CYBER de l'EPFL.

Enfin en 1977, un nouveau poste de professeur a été créé au Département d'électricité pour assurer la responsabilité de l'enseignement et de la recherche dans ce domaine.

#### 1.2 Domaines d'étude

L'analyse des réseaux d'énergie électrique a pour objet l'étude des modèles du réseau et des techniques de résolution permettant d'évaluer son comportement en régime permanent et perturbé d'une part, de l'optimiser et de le contrôler d'autre

part. On distingue ainsi deux grandes catégories de problèmes: les problèmes de planification et les problèmes d'exploitation et de gestion.

Le premier groupe de problèmes inclut notamment:

– L'étude de la répartition des flux de puissances dans un réseau en régime permanent. Ce type d'étude permet d'évaluer si des éléments du système de transmission sont surchargés, et si le niveau de tension est satisfaisant en chaque poste.

– L'évaluation des courants de courts-circuits pour divers types de défauts (principalement triphasés et monophasés), qui permet de dimensionner les disjoncteurs et de coordonner les systèmes de protection.

– L'étude de la stabilité statique et transitoire qui permet de vérifier que les caractéristiques et l'emplacement choisis pour les centrales et pour la protection ne provoquent pas d'oscillations de puissance non-amorties dans le réseau, pour des cas donnés de perturbations.

– L'évaluation de la fiabilité d'un système de production-transport-distribution, qui permet de vérifier qu'un système répond à un critère de qualité de service donné, p.ex. que la probabilité de défaillance est inférieure à un seuil déterminé.

Le second groupe, les problèmes d'exploitation et de gestion, représente des problèmes qui doivent être résolus en temps réel:

– L'estimation d'état, qui consiste à reconstituer à partir des mesures disponibles certaines grandeurs qui ne sont pas directement mesurées ou mesurables.

– L'analyse de la sécurité du réseau, qui consiste à détecter par simulation si le réseau est, à un instant donné, dans un état potentiellement dangereux.

– La gestion optimale de la production, qui consiste à minimiser le coût de la production d'un système donné à une période donnée.

– Le réglage de la fréquence et celui de la tension.

On constate que l'étude du second groupe de problèmes fait appel aux techniques du réglage automatique moderne et de l'optimisation. Le CERE est ainsi appelé à collaborer étroitement avec l'Institut de Réglage Automatique de l'EPFL.

## 2. Enseignement

Un enseignement réparti sur 2 semestres orienté vers les problèmes décrits ci-dessus complète l'enseignement général d'énergie et installations électriques:

Le cours «Analyse des réseaux électriques» a pour but d'initier les étudiants à l'emploi des techniques numériques pour la simulation du comportement du réseau en régime stationnaire et dynamique, notamment

- formuler les problèmes et étudier les algorithmes
- étudier la structure et l'implantation de programmes de calcul industriels
- décrire l'emploi de ces outils pour la planification des réseaux de transport et distribution d'énergie électrique.

Le cours «Exploitation des réseaux électriques» (dès 1979) a pour but d'analyser les problèmes de gestion et conduite des réseaux d'énergie électrique et d'étudier l'application des techniques d'analyse des réseaux électriques à la réalisation de systèmes pour la surveillance et la conduite des réseaux.

Ces deux cours à option peuvent être suivis également par des personnes de l'industrie. L'enseignement est complété par des projets de semestre et de diplôme.

## 3. Recherche et développement

Les principaux thèmes de recherche en cours ou qui seront abordés prochainement sont les suivants:

### 3.1 Fiabilité des réseaux

Un réseau de production-transport-distribution est un système complexe comportant des éléments (générateurs – lignes de transport – organes de collecte, transmission et traitement d'information) caractérisés par leur taux de défaillance. La probabilité de défaillance en un endroit déterminé d'un réseau dépend de sa configuration et des caractéristiques de chaque élément du système. Il est nécessaire de développer des techniques rapides et précises pour évaluer numériquement ces probabilités de défaillance et la fiabilité du réseau. Un tel outil permettra de comparer des systèmes conçus différemment du point de vue du coût à investir pour assurer une qualité de service donnée.

### 3.2 Stabilité des réseaux

*Compensation de la puissance réactive:* Les réseaux faiblement maillés, tels qu'on les rencontre fréquemment dans des pays où les centres de production sont très éloignés des centres de consommation, présentent, en général, de sérieux problèmes de stabilité. On peut y remédier par des installations produisant ou consommant de l'énergie réactive [4]. Un travail est en cours pour comparer divers aspects de cette compensation de la puissance réactive.

*Équivalents:* Des cas critiques de stabilité peuvent aussi se présenter dans des réseaux fortement maillés, compte tenu de la faible inertie des grandes unités récentes. De tels systèmes comportent souvent des centaines de machines, et l'on souhaite travailler avec un modèle simplifié, sans toutefois le faire d'une façon arbitraire. Une technique permettant d'obtenir de façon automatique des équivalents dynamiques a été développée récemment et certains aspects de cette recherche seront poursuivis [5].

*Modèles des charges:* Pour les études de réseaux à l'aide de calculateurs numériques, les éléments passifs (lignes, câbles, transformateurs) et les éléments dynamiques peuvent être convenablement représentés (génératrices, turbines). Par contre, on a considéré jusqu'à présent les charges comme des éléments passifs (courant constant, puissance active et réactive constante ou impédance constante). Cette hypothèse est discutable, surtout pour les charges importantes telles les aciéries, les cimenteries, les stations de pompage, les villes. Il s'agit donc de déterminer des modèles pour les divers types de charges qui puissent être utilisés pour des études de stabilité par exemple. Le problème est de représenter convenablement le comportement de la charge lors de variations dynamiques de tension et de fréquence du réseau. Les modèles doivent être aussi généraux que possible et leurs paramètres aisément déterminables.

### 3.3 Optimisation

La planification et l'exploitation des réseaux électriques soulèvent de nombreux problèmes d'optimisation, s'échelonnant de la minute à plusieurs années (optimisation à court, moyen et long terme). Dans le cadre du transport et de la distribution, des études ont été entreprises afin de minimiser les pertes dans les réseaux en répartissant judicieusement la production d'énergie réactive (planification à long terme) [6]. Un autre domaine de recherche est orienté vers la gestion optimale des centres de production (dispatching économique). La réso-

lution de ce problème fait appel aux techniques de programmation dynamique pour tenir compte des contraintes propres à chaque centre de production.

### 3.4 Estimation de l'état d'un réseau électrique

La complexité actuelle des réseaux de transport d'énergie électrique, l'éloignement des centres de production de ceux de consommation, les puissances installées élevées des nouvelles centrales contribuent à rendre délicate la conduite du réseau. Il est nécessaire de prendre des décisions rapidement en fonction de l'évolution de la charge afin de maintenir le réseau dans des conditions acceptables de fonctionnement.

Pour cela, il est nécessaire d'avoir une image précise du réseau, entre autres le niveau de charge des lignes et les tensions aux divers nœuds. Jusqu'à ces dernières années, on affichait directement sur le tableau synoptique du centre de dispatching les valeurs provenant de capteurs de mesure (MW, Mvar,  $I$ ,  $U$ ). Le système présente des inconvénients: d'une part, il n'est pas possible d'avoir des capteurs placés sur tous les éléments du réseau (lignes, transformateurs) et de le surveiller ainsi de façon complète; d'autre part, chaque capteur envoie une information entachée d'erreurs.

La venue sur le marché de calculateurs numériques rapides a permis le développement de programmes de calcul ayant pour tâche de faciliter la conduite du réseau. L'un des plus importants est l'estimateur d'état qui traite l'information en provenance de tous les capteurs de mesure. Il calcule l'état du réseau à un instant donné et permet ainsi d'avoir l'information complète sur tous ses éléments, même ceux n'ayant pas fait l'objet de mesures. Il détecte également la défaillance éventuelle de capteurs et avertit l'opérateur de toute anomalie.

Les critères indispensables pour qu'un estimateur d'état puisse être implanté dans un centre de dispatching sont la rapidité de calcul (travail en temps réel), le faible encombrement mémoire (implantation sur miniordinateur), ainsi que de très bonnes caractéristiques de convergence et de détection d'erreurs.

Sur la base de ces critères, le CERE a développé conjointement avec la société Hydro-Québec un estimateur d'état faisant appel au découplage actif/réactif ( $P-\theta/Q-V$ ) [7; 8]. Les techniques des matrices creuses sont largement utilisées pour diminuer l'encombrement en mémoire.

Une recherche dans ce domaine se rapporte à la détection d'erreurs de topologie. Jusqu'à présent, seules les erreurs de mesure sont décelées; il est cependant souhaitable de localiser et d'identifier le type d'erreur. Une telle détection est nécessaire non seulement pour les besoins des responsables du réseau, mais également pour les divers programmes (flux de puissances, stabilité, optimisation de la production, court-circuit, ...) qui deviennent des outils de plus en plus répandus et qui utilisent les informations de topologie et de flux de charges de l'estimateur.

### 3.5 Court-circuit

Comme déjà mentionné, le calcul des courants de courts-circuits permet de dimensionner les disjoncteurs et de coordonner la protection sélective. D'autre part, il donne une idée des efforts électrodynamiques auxquels sont soumis les conducteurs (jeux de barres, lignes aériennes, sectionneurs, ...). Pour ce calcul, le réseau est représenté au moyen des composantes symétriques. La majeure partie du travail est l'élaboration de la matrice d'impédances aux nœuds  $Z$ , représentative

de l'ensemble du réseau. Lorsque les dimensions du réseau deviennent importantes, la matrice  $Z$  ne peut plus être mémorisée intégralement. Il est donc nécessaire d'appliquer de nouveaux algorithmes [9] pour être à même de résoudre ce problème quelles que soient les dimensions du réseau étudié.

Le CERE poursuit une étude comparative de diverses méthodes de résolution.

## 4. Equipement informatique

Pour résoudre les problèmes complexes posés par les grands réseaux actuels, il est nécessaire de pouvoir disposer d'un ordinateur performant avec un ensemble de périphériques adéquats (matériel) et d'un ensemble de programmes utilitaires et d'application (logiciel).

### 4.1 Matériel

Le matériel utilisé par le CERE est essentiellement celui mis à disposition par le Centre de calcul et le Département d'électricité de l'EPFL. Il comprend notamment:

- un ordinateur CDC-CYBER 7328
- des liaisons en temps partagé sur CDC-CYBER par télétypes et consoles graphiques
- un traceur digital CALCOMP
- un terminal lourd NORSK DATA avec lecteur de cartes et imprimante, relié à la CDC-CYBER
- un terminal graphique DEC-GT40 (fig. 1) avec mini-ordinateur PDP-11-05 incorporé pour la mise au point et l'exploitation de programmes en mode graphique interactif
- un mini-ordinateur PDP-11-40

### 4.2 Logiciel

Le CERE dispose des programmes suivants:

- *Problèmes liés aux éléments des réseaux*

*Constantes de lignes et de câbles:* Calcul des constantes électriques longitudinales et transversales d'une ou plusieurs liaisons aériennes ou souterraines à partir des caractéristiques physiques et géométriques des conducteurs, basé sur la méthode de Carson pour les lignes aériennes. Une version du programme s'utilise en mode graphique interactif sur console graphique [10; 11].

*Impédances des transformateurs:* Calcul des impédances des transformateurs triphasés à deux et trois enroulements sur la base de la plaque signalétique et des procès-verbaux d'essais.

*Influences électriques:* Calcul des influences électromagnétiques et électrostatiques lors d'un parallélisme de lignes ou de câbles.

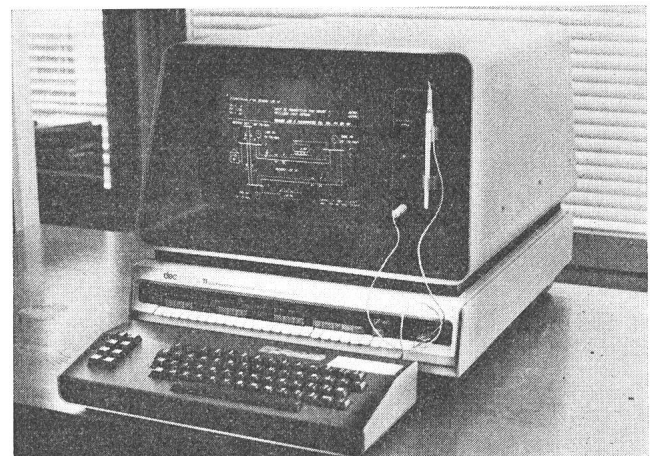


Fig. 1 Simulation d'un réseau électrique à but didactique sur un terminal graphique DEC-GT40

*Champs électriques:* Calcul du champ électrique aux environs d'une ligne aérienne (fig. 2) et du champ superficiel sur les conducteurs, basé sur la méthode des charges fictives [12; 13]. Une version de ce programme s'utilise en mode graphique interactif sur console graphique.

– *Problèmes liés aux études globales des réseaux*

*Prévisions de charges:* Calcul des prévisions de charges (modèle global) à partir d'une période d'observation (historique) suivant quatre types de croissance, soit linéaire, exponentielle, asymptotique ou logistique.

*Flux des puissances dans un réseau maillé [14]:* Calcul des tensions et de la répartition des puissances actives et réactives dans un réseau maillé symétrique en régime permanent, basé sur la méthode de Newton-Raphson. Une version de ce programme est également interactive sur console graphique [15].

*Flux des puissances dans un réseau radial:* Calcul des tensions et de la répartition des puissances actives et réactives dans un réseau radial triphasé symétrique en régime permanent, basé sur la méthode de Gauss-Seidel [16].

*Courants de court-circuit:* Calcul des courants de court-circuit symétriques et dissymétriques dans un réseau maillé ou radial triphasé en régime subtransitoire ou transitoire, basé sur la méthode des composantes symétriques.

*Stabilité:* Stabilité transitoire d'un réseau de transport, compte tenu des machines et des régulateurs de tension et de vitesse (fig. 3). Etablissement automatique d'équivalents dynamiques.

Ces 4 derniers logiciels constituent un système de programmes accédant à une banque de données commune.

*Phénomènes transitoires:* Calcul des phénomènes transitoires dans un réseau lors d'une surtension atmosphérique ou d'une surtension de manœuvre, basé sur la méthode de Bergeron. (Une version du programme s'utilise en mode graphique interactif sur console graphique).

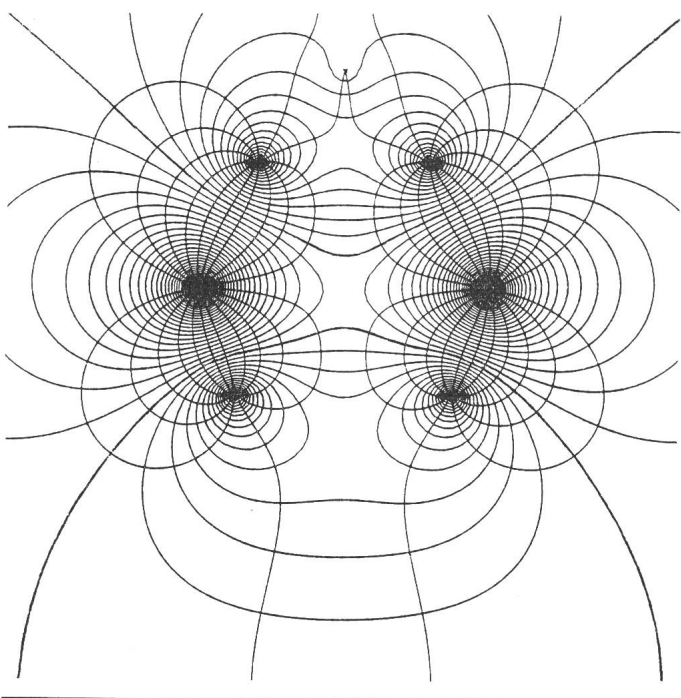


Fig. 2 Champ électrique aux environs d'une ligne triphasée 2 ternes 220 kV

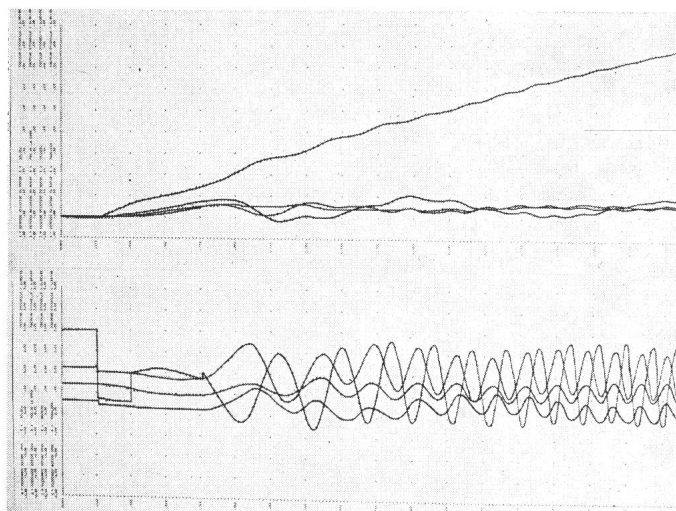


Fig. 3 Evolution de la fréquence et de la puissance active aux bornes de certains groupes lors d'une simulation d'un défaut triphasé dans un réseau à 65 nœuds

– *Problèmes liés à la conduite des réseaux*

Estimation de l'état probable d'un réseau à partir d'un ensemble redondant de mesures de tensions, de transits et d'injections de puissances basé sur la méthode du découplage actif-réactif.

La plupart des programmes ont été écrits dans le cadre des travaux du CERE, dans certains cas en collaboration avec le Laboratoire haute tension. Quelques programmes de base ont été fournis par des tiers et ont été adaptés en fonction des problèmes et du type d'ordinateur utilisé. D'autre part, des programmes sont constamment en cours d'élaboration pour résoudre de nouveaux problèmes.

**5. Conclusions**

Depuis sa création, le CERE a pris une part active au développement des nouvelles méthodes d'analyse des réseaux. Etant donné l'expansion rapide de ces techniques et la complexité des problèmes à résoudre, il est nécessaire de maintenir des contacts étroits avec les autres spécialistes suisses et étrangers.

C'est pourquoi le CERE établit et maintient des échanges avec d'autres universités, instituts de recherche et industries. Les congrès internationaux sont l'occasion de confronter les résultats de recherche du CERE avec des recherches similaires effectuées dans d'autres institutions. Ils permettent également de s'informer des derniers développements en matière d'analyse des réseaux.

L'expérience du CERE ne se limite pas au développement de nouvelles méthodes d'analyse, mais s'étend également à leur application à des cas pratiques. En effet, des mandats lui sont confiés par des industries suisses et étrangères.

L'EPFL dispose ainsi d'un groupe de spécialistes qui peut assurer une formation de pointe des ingénieurs dans le domaine de l'analyse des réseaux, participer activement à la recherche et au développement, et résoudre divers problèmes des entreprises électriques.

**Bibliographie**

- [1] W.F. Tinney and J.W. Walker: Direct solutions for sparse network equations by optimally ordered triangular factorization. Proc. IEEE 55(1967)11, p. 1801...1809.
- [2] G.W. Stagg and A.H. El-Abiad: Computer methods in power system analysis. New York, McGraw-Hill, 1968.

[3] *F. Ariatti* e.a.: Analyse des réseaux d'énergie électrique. Publication de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne N° 142. Lausanne, Editions du Bulletin Technique de la Suisse Romande, 1974.

[4] *J.J. Morf*: Problèmes fondamentaux de la production et de la compensation des puissances réactives. Symposium Production et Compensation Optimales des Puissances Réactives, 21 septembre 1976 à Lausanne, EPFL, Zurich, ASE, 1976; p. 3...34.

[5] *R. Podmore* and *A. Germond*: Development of dynamic equivalents for transient stability studies. Electric Power Research Institute: Final Report on Project 763. Palo Alto, Systems Control Inc., 1977.

[6] *H.B. Püttgen, R.L. Sullivan* and *J.-J. Morf*: Economically optimal allocation of reactive power sources using a C.A.D. technique. Proceedings of the fifth Power System Computation Conference, Cambridge, sept. 1...5, 1975. Vol. 1, paper No 1. 1/4, p. 1...15.

[7] *H.P. Horisberger, J.C. Richard* and *C. Rossier*: A fast decoupled static state estimation for electric power systems. IEEE Trans. PAS 95(1976)1, p. 208...215.

[8] *C. Rossier*: Estimation de l'état d'un réseau de transport THT par une méthode de découplage actif-réactif (P-O/Q-V). IEEE Student Papers (1976), p. 208 bis 216.

[9] *K. Zollenkopf*: Sparse nodal impedance matrix generated by the bi-factorisation and applied to short circuit studies. Proceedings of the fifth Power System Computation Conference, Cambridge, sept. 1...5, 1975. Vol. 2, paper No. 3.1/3, p. 1...15.

[10] *P.A. Chamorel* et *J.-J. Morf*: Graphique interactif appliqué au calcul des constantes de lignes aériennes. Bull. ASE/UCS 67(1976)6, p. 290...295.

[11] *P.-A. Chamorel*: Calcul des caractéristiques électriques des câbles haute tension à fréquence industrielle. Bull. ASE/UCS 69(1978)2, p. 77...82.

[12] *P.-A. Chamorel* a.o.: Interactive graphics applied to electric field computation and representation. Proceedings of the fifth Iranian Conference on Electrical Engineering, Shiraz, octobre 27...30, 1975. Vol. 1, p. 150...163.

[13] *P.A. Chamorel*: Calcul et représentation des champs électriques aux environs d'une ligne à haute tension triphasée avec conducteurs en faisceaux. Bull. ASE/UCS 67(1976)16, p. 854...858.

[14] *W.F. Tinney* and *C.E. Hart*: Power flow solution by Newton's Method. IEEE Trans. PAS 86(1967)11, p. 1449...1460.

[15] *H.B. Püttgen, P. Deruaz* and *P.-A. Chamorel*: Interactive graphics applied to electrical power network simulation. Proceedings of the fifth Power System Computation Conference, sept. 1...5, 1975. Vol. 2 paper 4.2/1, p. 1...14.

[16] *H.B. Püttgen* et *P. Deruaz*: Un algorithme de calcul de la répartition des puissances dans un réseau radial. Marché Suisse des Machines 42(1974)21, p. 40 à 41 + no. 42, p. 40...43.

#### Adresse des auteurs

Prof. *A. Germond*, Dr. sc. techn., *P.-A. Chamorel*, Ing. SIA, *C. Rossier*, Ing. dipl. EPFL, *O. Bissat*, Ing. dipl. EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Centre d'Etude des Réseaux Electriques, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.

## Evolution de l'électromécanique

Par M. Jufer

### 1. Conversion d'énergie

Les préoccupations de l'électromécanique ont principalement porté, depuis le dernier tiers du 19<sup>e</sup> siècle, sur la conversion électro-mécanique ou mécano-électrique de puissance. Pour les pionniers, il s'agissait de trouver les formes les plus efficaces pour réaliser de telles conversions. L'imagination des constructeurs, canalisée par les limites des possibilités offertes par les matériaux d'alors, a conduit à des structures très diversifiées (fig. 1) et parfois irrationnelles. Avec le début du 20<sup>e</sup> siècle, il s'est produit une décantation des solutions qui a conduit aux principales machines connues, soient:

- le moteur asynchrone à cage et à rotor bobiné;
- la machine synchrone à pôles lisses et à pôles saillants;
- les machines à courant continu;
- les moteurs à collecteur.

Outre ces machines les plus fréquentes, d'autres types de moteurs et de générateurs ont vu le jour, mais avec une diffusion moindre. Au 20<sup>e</sup> siècle, une rationalisation systématique ainsi que l'évolution de la qualité des matériaux ont conduit à des machines de puissance volumique toujours accrue (fig. 2). Simultanément, des machines de plus en plus puissantes ont été construites, en particulier dans le domaine des variantes synchrones. Cet effort s'est porté aussi bien sur les machines à pôles saillants lentes que sur les turboalternateurs rapides. Dans ce dernier domaine, l'avènement des ordinateurs a permis d'affiner les modèles de simulation et de réaliser des unités fiables très proches des limites permises par les matériaux. L'emploi de techniques telles que le refroidissement à l'hydrogène, puis à l'eau, a permis d'atteindre des puissances unitaires jusqu'à 1500 MVA (fig. 3).

D'autres technologies ont vu le jour durant les années 50. On peut citer les moteurs synchrones à démarrage asynchrone. Ces machines sont particulièrement importantes pour le réglage journalier ou saisonnier de la puissance active par le biais de groupes de pompage (fig. 4). Des puissances unitaires jusqu'à 230 MVA sont réalisées et des puissances supérieures sont projetées. Des variantes stockant l'énergie sous forme poten-

tielle par compression d'air sont également développées pour des pays plats (fig. 5).

On peut aussi citer les machines synchrones bi-vitesse permettant d'améliorer le rendement global pour des machines réversibles ou pour des hauteurs de chute fortement variables.

Une évolution importante a été provoquée par les moyens offerts par l'électronique industrielle. Des alimentations telles que des redresseurs commandés ou des redresseurs-onduleurs accroissent considérablement la souplesse d'emploi des moteurs à courant continu. Les convertisseurs de fréquence per-

621.3 : 531.8;

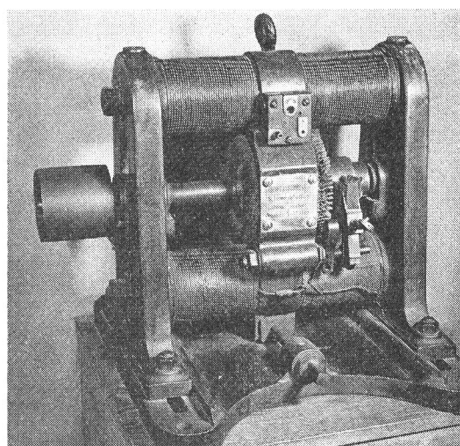


Fig. 1  
Machine à courant continu de type Gramme (1877) [1]

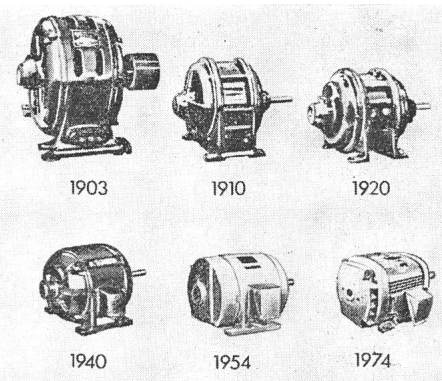


Fig. 2  
Evolution de la puissance volumique des moteurs asynchrones [2]

Tous les moteurs ont la même puissance: 15 CV, 1800 tours/min, 60 Hz, 220 V

1) Voir la bibliographie à la fin de l'article.