

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: 69 (1978)

Heft: 12

Artikel: Evolution de l'électromécanique

Autor: Jufer, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-914903>

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: 04.05.2026

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

[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^e 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^e 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^e 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 sans 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;

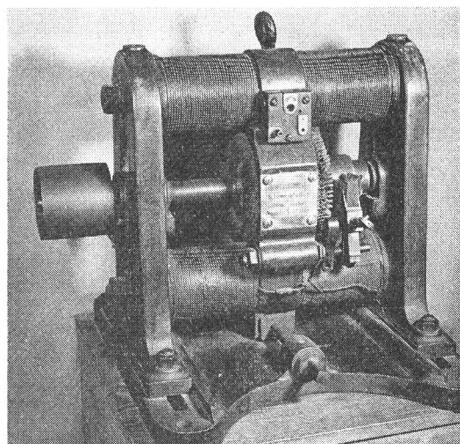


Fig. 1
Machine à courant continu de type Gramme (1877) [1]

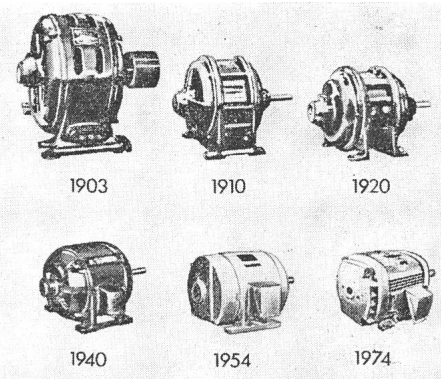


Fig. 2
Evolution de la puissance volumique des moteurs asynchrones [2]

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.

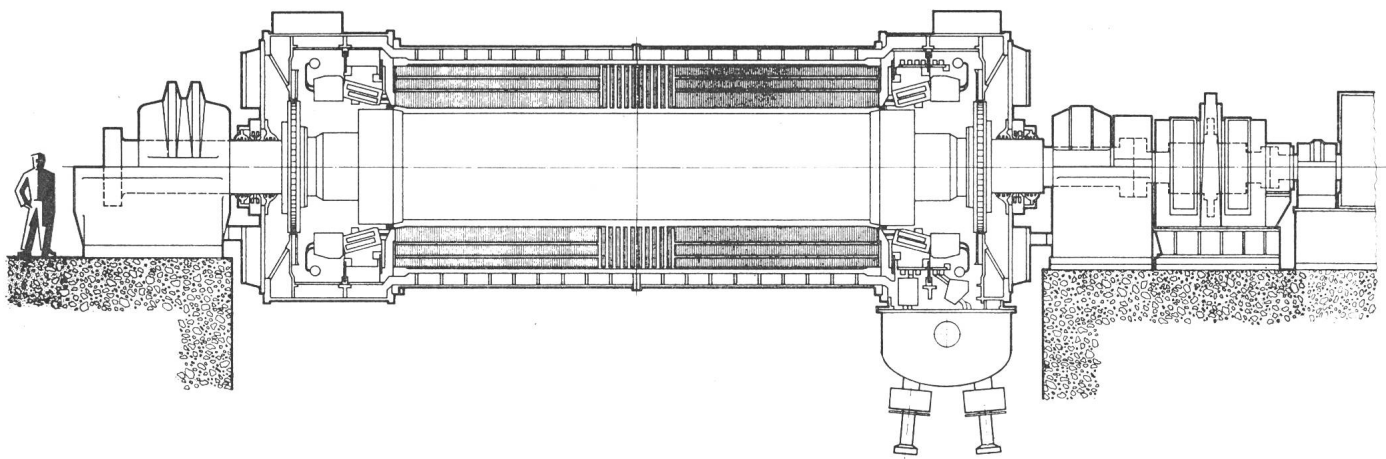


Fig. 3 Coupe d'un turbo-alternateur de 1500 MVA [3]

mettent de réaliser un contrôle de vitesse en circuit ouvert (moteurs synchrones) ou fermé (moteurs asynchrones). Cependant, le coût de ceux-ci reste particulièrement élevé et en limite l'emploi.

On peut mentionner le moteur linéaire, qui a vu une mode se développer dans le courant des années 60. C'est la possibilité de simulation offerte par les ordinateurs qui a permis de modéliser ces moteurs, principalement en variante asynchrone, et d'en améliorer les performances. Les principaux besoins étaient définis par la traction à très grande vitesse (fig. 6). Toutefois, les problèmes économiques de cette dernière ont entraîné un ralentissement des développements en cette matière. Néanmoins, de nombreuses réalisations moins spectaculaires – ouvertures de portes, manutention, positionnement, oscillateurs, etc. – se développent peu à peu (fig. 7).

C'est le développement des ordinateurs sous toutes leurs formes, du calculateur à grande capacité au micro-processeur, qui a provoqué une évolution rapide de la conception et de l'utilisation des transducteurs.

Les premiers actionneurs sont antérieurs aux moteurs classiques. L'électroaimant agissant sur un relais, une vanne ou un contacteur remplit une fonction d'information et de commande digitale. Actuellement, l'élément clé dans le domaine des actionneurs est le moteur pas à pas. Pratiquement inconnu il y a vingt ans, il s'implante systématiquement comme élément de conversion d'information, de positionnement et de commande. De façon générale, les actionneurs doivent répondre aux impératifs suivants:

– fiabilité dans la conversion d'information, aussi bien en position qu'en vitesse. Il s'agit donc d'un caractère synchrone;

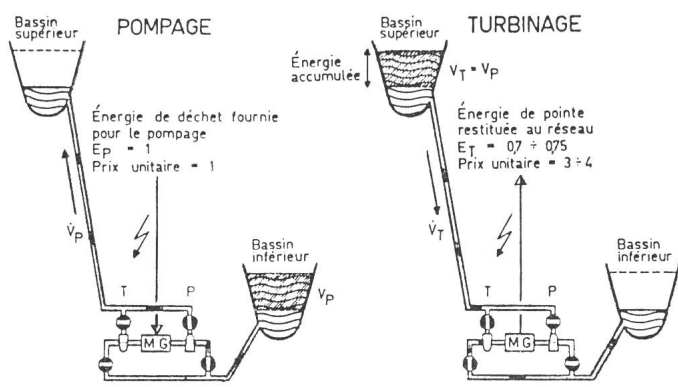


Fig. 4 Principe de fonctionnement d'une installation de turbinage-pompage journalier [4]

2. Conversion d'information

Parallèlement aux développements spectaculaires des machines électriques visant l'amélioration des puissances limites, de la souplesse ou de la fiabilité, une évolution plus importante encore a touché le domaine des transducteurs électromécaniques. Un transducteur électromécanique réalise une conversion d'énergie électromécanique ou inverse. De plus, il assure une *conversion d'information*. Dans le sens électromécanique, on parle d'un *actionneur* ou d'un *moteur*. Dans le sens inverse, il s'agit d'un *capteur*.

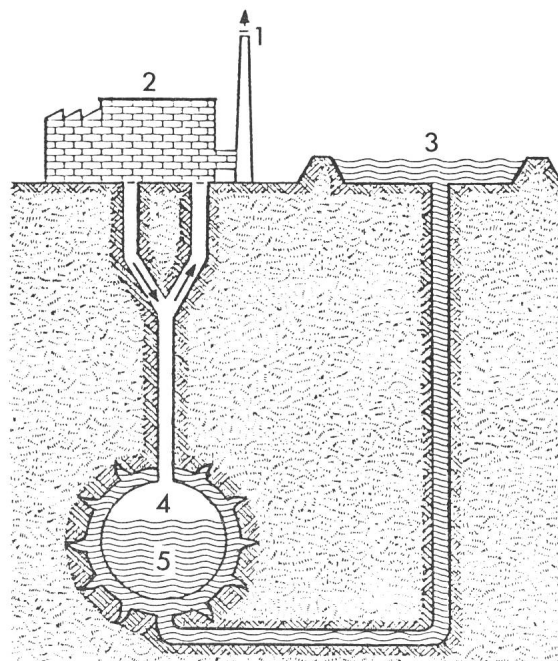


Fig. 5 Représentation schématique d'une centrale à turbines à gaz avec réservoir d'air à pression constante [5]

- 1 Echappement
- 2 Centrale à turbines à gaz
- 3 Bassin d'eau de compensation
- 4 Air
- 5 Eau

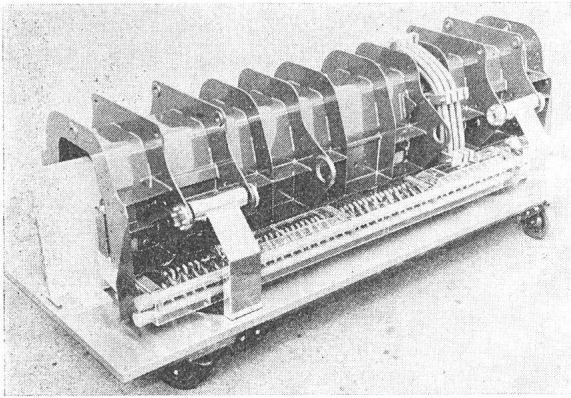


Fig. 6 Moteur linéaire du véhicule expérimental Grumann 500 km/h, 4000 CV, refroidissement à eau

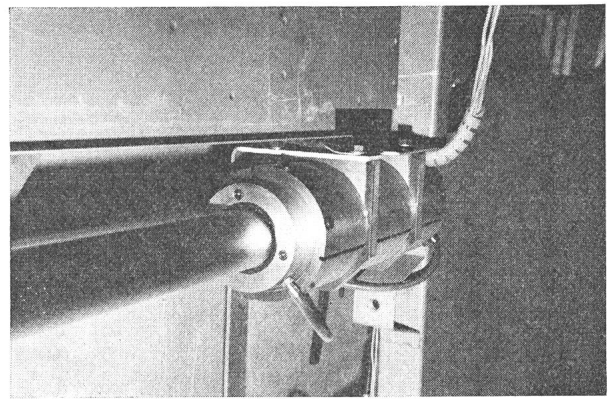


Fig. 7 Moteur linéaire tubulaire pour ouverture de porte (ETEL SA)

- bon rendement énergétique, principalement à cause d'impératifs thermiques;
- constantes de temps électrique et mécanique les plus faibles possibles;
- énergie de maintien en position minimum.

Pour les capteurs, la possibilité de recourir à des amplificateurs rend les aspects énergétiques secondaires. En revanche, la linéarité, la fiabilité et l'insensibilité aux paramètres indépendants sont déterminants.

De nombreux actionneurs et capteurs sont munis d'un aimant permanent. Ce composant permet d'obtenir un comportement linéaire et de réaliser des éléments de petites dimensions avec un bon rendement. La réalisation d'aimants de haute énergie volumique, tels que les alliages terres rares-cobalt, permettent d'accroître les performances limites ou de réaliser des structures nouvelles.

3. Les moteurs pas à pas [6]

Les moteurs pas à pas sont caractéristiques de l'évolution des performances et des possibilités des transducteurs. Un moteur pas à pas est une machine synchrone qui présente généralement une démultiplication de la vitesse de rotation par rapport à celle du champ tournant (fig. 8). D'autre part, un tel moteur est commandé par des impulsions de tensions appliquées à un bobinage polyphasé. A basse fréquence, il se produit une succession d'incrément angulaires, présentant un temps de pause entre chaque nouvelle impulsion. A haute fréquence, le mouvement est pratiquement continu, avec une légère oscillation de vitesse. On assure ainsi un contrôle de la position dynamique et simultanément un contrôle de la vitesse.

Contrairement à la plupart des machines électriques, les performances d'un moteur pas à pas ne dépendent pas de façon intrinsèque de ses caractéristiques. L'alimentation (appliquant la tension aux phases du moteur et assurant l'extinction du courant) ainsi que la commande (assurant la commutation des phases) définissent les performances du système (fig. 9a). La fréquence de démarrage et la fréquence limite absolue, les gradients d'accélération et de décélération, la stabilité et les oscillations parasites peuvent être modifiés par les divers composants du système d'entraînement. Un asservissement en position (fig. 9b) peut être adjoint à la commande,

afin d'accroître les performances ou la fiabilité. Il peut s'effectuer également par le biais des courants du moteur.

Des fréquences de 20000 pas par seconde sont actuellement atteintes. En conséquence, un tel moteur ne peut pratiquement plus être piloté que par un micro-processeur à de telles fréquences.

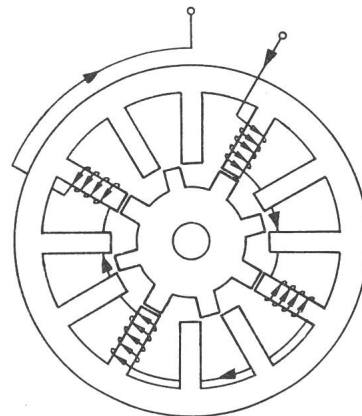


Fig. 8 Moteur pas à pas réluctant triphasé
Bobinage d'une seule phase dessiné

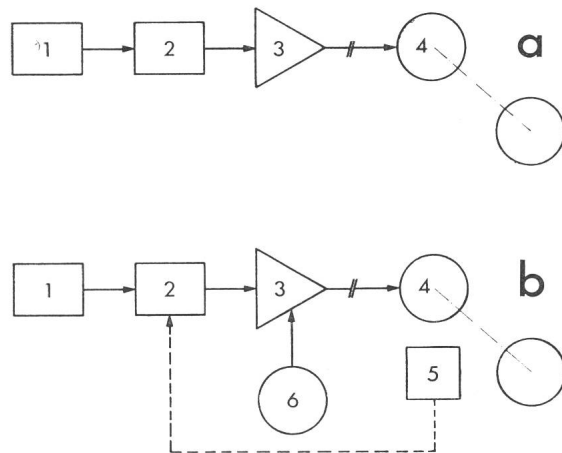


Fig. 9 Schéma bloc de l'alimentation et de la commande d'un moteur pas à pas

a en circuit ouvert b asservi

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1 Système de commande | 4 Moteur pas à pas |
| 2 Commande du moteur | 5 Capteur de position |
| 3 Amplificateur | 6 Source de tension |

Semestre	5	6	7	8
Matière	c e l	c e l	c e l p	c e l p
Electromécanique	2 1	2		
Machines électriques		2 1	2 1 2	
Laboratoire-option			4	
Projets-option			8	10
Projets-option			8	10
Régimes transitoires dans les machines électriques-option			2	
Simulation des champs-option			2	
Dimensionnement des machines électriques-option			2	2
Essais spéciaux sur machines électriques-option				1 1
Traction électrique-option				2
Moteurs à induit massif-option				2

c cours; e exercices; l laboratoires; p projets

On peut constater que, de façon similaire à l'évolution des premières machines électriques, le développement des moteurs pas à pas n'a pas encore atteint une phase de rationalisation permettant de définir les solutions optimales. Celles-ci ne sont pas aisées à déterminer, par suite des interdépendances du moteur, de son alimentation et de sa commande. Une opération de «décantation» doit encore intervenir.

Certains moteurs pas à pas ont été développés dans le sens d'une miniaturisation poussée. On peut citer p.ex. les micro-moteurs pas à pas de montres, d'une puissance de l'ordre de $2 \mu\text{W}$. Des tailles de 4 mm de diamètre et de 2 à 2,5 mm d'épaisseur sont atteintes actuellement (fig. 10). Il s'agit de moteurs monophasés à aimant permanent tournant. De tels moteurs, alimentés à 1 Hz sous 1,35 V, présentent des rendements de 20 à 30%.

Les techniques permettant de réaliser de tels transducteurs font appel à des connaissances des domaines de l'électronique et de la logique aussi bien que le l'électromécanique et du magnétisme. Cette évolution des besoins a influencé l'enseignement de l'électromécanique et des machines électriques à l'EPFL.

4. Enseignement de l'électromécanique

L'enseignement de l'électromécanique à l'EPFL poursuit principalement deux buts:

– l'acquisition des méthodes spécifiques à l'étude des transducteurs et des machines électriques. Il s'agit principalement de l'analyse des circuits électriques et magnétiques, de la conversion électromécanique, des aimants permanents, des régimes transitoires, des lois de similitude et de la machine électrique généralisée;

– l'étude des principaux transducteurs et des principales machines électriques, simultanément dans un but d'application des méthodes et afin d'acquérir la connaissance de ces machines du point de vue de leur utilisation. Parmi les transducteurs, les systèmes réductants, électrodynamiques, électromagnétiques et réductants polarisés sont abordés, ainsi que l'ensemble des problèmes spécifiques des moteurs pas à pas. En ce qui concerne les machines électriques, le transformateur, les moteurs asynchrone et à courant continu ainsi que la machine synchrone sont étudiés.

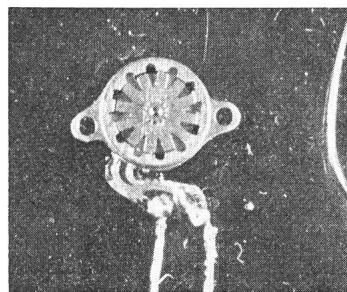


Fig. 10

Moteur pas à pas de montre à quartz

(Société Suisse pour l'Industrie Horlogère SSIH)

Ces enseignements sont complétés par des exercices et des laboratoires. De plus, des cours à option sont offerts sans ce domaine au cours de la dernière année.

Actuellement, l'enseignement de l'électromécanique et des machines électriques des ingénieurs électriciens se présente selon le tableau I. Si cet enseignement est présenté dissocié de l'ensemble du plan d'études, c'est pour des raisons de simplification de la description. Une formation orientée vers ces disciplines doit être complétée par des cours à option des domaines de l'électronique industrielle, du réglage automatique et des installations électriques. Il est en effet important pour des ingénieurs suisses d'acquérir principalement des méthodes leur permettant de se spécialiser ou de changer de domaine d'activité, de préférence à une spécialisation poussée, mais limitée.

Bibliographie

- [1] M. Ponte: Un billet d'entrée pour le Musée de l'Electricité. Revue Française de l'Electricité 46(1973)240, p. 6...9.
- [2] P.L. Alger and R.E. Arnold: The history of induction motors in America. Proc. IEEE 64(1976)9, p. 1380...1383.
- [3] J. Grünwald et E. Hugentobler: Essais de fonctionnement d'un alternateur quadripolaire de grande puissance destiné à la Tennessee Valley Authority (USA). Revue Brown Boveri 65(1978)1, p. 29...35.
- [4] J.-E. Graeser: Revalorisation de l'énergie par accumulation hydraulique. Bull. Techn. Suisse Romande 102(1976)6, p. 104...107.
- [5] O. Weber: La centrale à turbine à gaz avec réservoir d'air. Revue Brown Boveri 62(1975)7/8, p. 332...337.
- [6] Journée d'information et de discussion sur les moteurs pas à pas. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale, le 5 octobre 1977. Zurich, ASE, 1977.

Adresse de l'auteur

Prof. M. Jufer, Laboratoire d'électromécanique, Département d'Electricité EPFL, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.