Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 52 (1960)
Heft: 5-6

Artikel: Le développement des alternateurs et des transformateurs
Autor: Dutoit, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-921743

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: 11.07.2025

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

Le développement des alternateurs et des transformateurs

A. Dutoit, professeur EPF, Zurich

DK. 621.313/4

LES ALTERNATEURS

Introduction

La civilisation technique a dû résoudre parmi beaucoup d'autres les problèmes de la production d'énergie et de son utilisation. La chaleur a constitué pendant longtemps la seule source d'énergie utilisable industriellement et se trouve être encore à la tête des «matières premières énergétiques».

Les besoins industriels ne se limitant pas à l'utilisation de chaleur, mais pour une grande part à celle d'énergie mécanique, une transformation est nécessaire à partir du stade primitif, mais elle devient rapidement onéreuse pour des installations fixes de petites puissances. Le nombre des consommateurs fixes pouvant être très élevé, l'idée de distribution de l'énergie mécanique devait naître dans l'esprit des inventeurs qui n'eurent qu'un succès relatif mais tenace au cours du temps, par l'emploi de systèmes mécaniques de transmission. Le principal inconvénient était l'entretien coûteux des transmissions et leur mauvais rendement. Dès que les moteurs électriques de petites puissances eurent atteint un développement suffisant, la «distribution» d'énergie mécanique pouvait se faire par l'intermédiaire de l'énergie électrique, d'une manière identique à celle appliquée deux ou trois décennies plus tôt pour la distribution de l'éclairage électrique par petits foyers lumineux à incandescence.

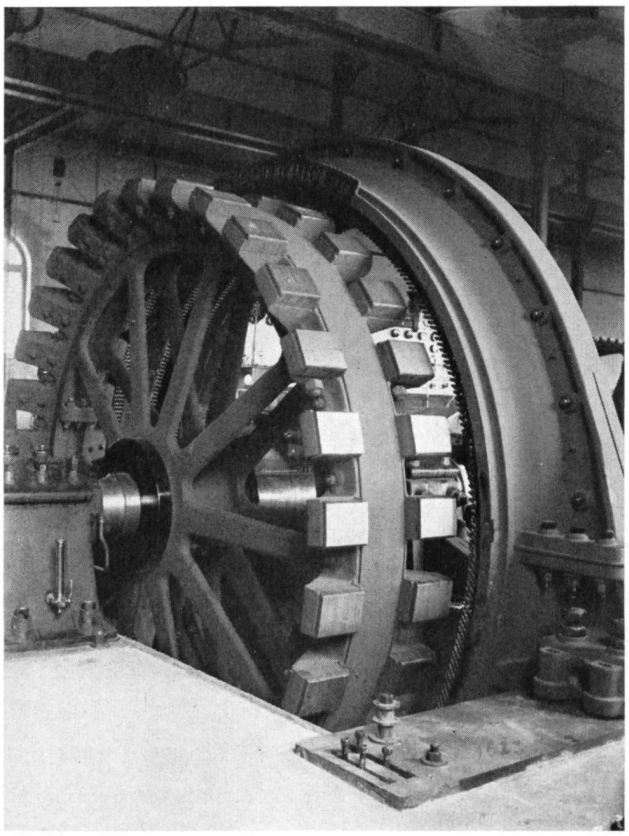


Fig. 1 Alternateur synchrone de 640 ch du type homopolaire, ayant été pendant longtemps en service à la centrale de Letten, à Zurich, à partir de 1896 (Photo MFO)

De là en est résulté un besoin croissant d'énergie électrique, créée à partir d'énergie mécanique, à son tour produite par de la chaleur. L'élimination de cette double transformation constitue encore à l'heure actuelle un problème auquel s'attachent de nombreux chercheurs, dans le but de produire directement de l'énergie électrique, à partir d'une réaction chimique ordinaire, sans même passer par l'intermédiaire de la chaleur. Cette utilisation «idéale» des combustibles naturels, ou même de matières non considérées comme telles ordinairement, a accompli récemment de grands progrès après environ 60 ans de piétinements. Toutefois, l'état actuel de ces développements laisse encore de larges terrains d'extension au système classique, utilisant l'énergie mécanique.

Si l'énergie électrique, qui ne constitue qu'un stade transformé d'une source primaire, a pris une telle importance dans l'industrie, cela tient avant tout à sa facilité de réglage, dénommée souvent «souplesse», et au bon rendement de sa distribution, comparé à celui de distributions d'autres natures. Les distributions de gaz naturel récemment édifiées ne serait susceptibles de concurrencer les distributions électriques que dans les cas où la forme d'énergie à la consommation serait adaptée à la nature de la distribution. Partant de celle-ci, l'idée surgit de «diviser» l'énergie captée en des consommateurs toujours plus nombreux, consommant toujours moins. Les simples fils conducteurs représentent pour ces cas une solution parfaitement acceptable, à laquelle, vu les applications domestiques de l'électricité et d'autres encore, il serait impossible de renoncer. Ce sont même les applications domestiques de l'énergie électrique qui comptent souvent comme facteur d'expansion des centrales. Il est alors simple de conclure que le développement des machines électriques elles-mêmes sera très fortement influencé par celui des applications, au fur et à mesure de l'extension de l'industrie dans des pays toujours plus nombreux.

Il n'est pas nécessaire d'indiquer ici les raisons qui ont fait porter le choix du genre de courant électrique sur le système alternatif triphasé, elles sont parfaitement connues de chacun; par contre il est intéressant de constater que pour la création de courants alternatifs seuls les alternateurs synchrones participent à la production d'énergie à grande échelle. La comparaison de ces machines avec celles du type asynchrone facilitera en outre la recherche des facteurs qui ont présidé aux développements de la construction des alternateurs.

Alternateurs synchrones

Contrairement à d'autres réalisations de la technique, l'alternateur synchrone a assez rapidement trouvé une forme stable quant à sa conception générale. Le type homopolaire (Fig. 1) ne comportant que des enroulements fixes, a rapidement fait place au type hétéropolaire, dont l'enroulement d'excitation est tournant (Fig. 2) (ce qui pose des problèmes de résistance des matériaux et de dilatation très ardus), par le fait que l'uti-

lisation de la masse de fer magnétique est bien supérieure à celle du fer de la machine homopolaire.

La vitesse angulaire, en général fixée par les caractéristiques du moteur d'entraînement de l'alternateur, conduira à équiper celui-ci d'un nombre de pôles permettant l'obtention de la fréquence du réseau. Un grand nombre de pôles donne à la roue polaire une grande symétrie de son moment d'inertie par rapport à des axes perpendiculaires à l'axe de la roue et garantit une marche stable, car la flexion de l'arbre portant sur les paliers est indépendante de la position du rotor. Les grandes vitesses angulaires obligatoirement obtenues sur les turbo-alternateurs conduisent à réduire le nombre de pôles au minimum de deux, ce qui fait disparaître la symétrie d'inertie précédemment atteinte. Les flexions d'arbre sont alors dépendantes de la position du rotor et des vibrations mécaniques apparaissent sur les paliers [1]*. Ces vibrations seraient absolument intolérables si les rotors bipolaires étaient munis de pôles saillants, comme en montrent les figures 1 et 2. Une faible dissymétrie résiduelle, donnant lieu à des vibrations d'amplitude acceptable, est obtenue par la construction à pôles noyés, appliquée pour la première fois par C. E. L. Brown en 1903. Dès lors, les deux types de constructions son restés classiques et leur développement a porté d'une part sur leurs dimensions pour ensuite se concentrer sur des éléments de détail et sur les problèmes nouveaux, ayant fait leur apparition à la suite de l'augmentation des dimensions.

Le choix définitif de la disposition consistant à mettre l'enroulement d'excitation sur la roue polaire et l'induit fixe sur les tôles du stator est dû à des raisons bien connues, comme celle de rendre possible la production de hautes tensions sur l'induit. En dehors de ces raisons, il en existe deux qui ne sont généralement pas mentionnées dans les articles techniques mais qui valent la peine d'être examinées, car elles expliquent en partie l'abandon des machines asynchrones pour la production d'énergie. Le flux du circuit d'excitation étant continu, les pôles peuvent être massifs et la tenue mécanique d'un tel rotor est meilleure que s'il était feuilleté. Cette qualité est d'autant plus accentuée que le nombre de pôles est plus faible, ou ce qui revient au même, que la vitesse de rotation est plus élevée. Un rotor de turboalternateur à 3000 t/min en tôles feuilletées serait impossible à maintenir longtemps en service pour peu que ses dimensions dépassent environ 2 m de longueur. La seconde raison rarement mentionnée est que la captation de la puissance sur un induit tournant, au moyen de balais de charbon frottant sur des bagues serait irréalisable pour des puissances actuellement en jeu ou causerait alors un encombrement et des pertes prohibitifs. Enfin, pour compléter cette comparaison avec les machines asynchrones, il est une grandeur qu'il y aura toujours avantage à conserver faible en valeur absolue dans ces dernières, c'est l'entrefer. Les petits et moyens diamètres s'accommodent facilement de petits entrefers, car le centrage de la roue est facile dans des paliers de faible diamètre, et les déformations mécaniques en fonction de la température sont faibles, ce qui ne laisse aucune crainte de dissymétrie des attractions magnétiques entre roue et stator en cas d'excentrage. Il n'en est plus de même aux grands diamètres où le décentrage peut être assez grand et où même le stator ne peut être construit parfaitement circulaire. L'entrefer n'est plus constant le long de la périphérie et des efforts périodiques radiaux prennent naissance et provoquent des vibrations. L'énergie réactive à fournir à la machine asynchrone croît avec l'entrefer et son augmentation exigerait une onéreuse production de cette sorte d'énergie. Au contraire, la machine synchrone exige relativement à sa parente un entrefer beaucoup plus grand, de sorte que le défaut précité est grandement atténué. Il est donc compréhensible que la plus grande partie de l'énergie électrique produite, le soit à l'aide de machine synchrone.

* Les chiffres entre crochets renvoyent à la liste bibliographique en fin d'article

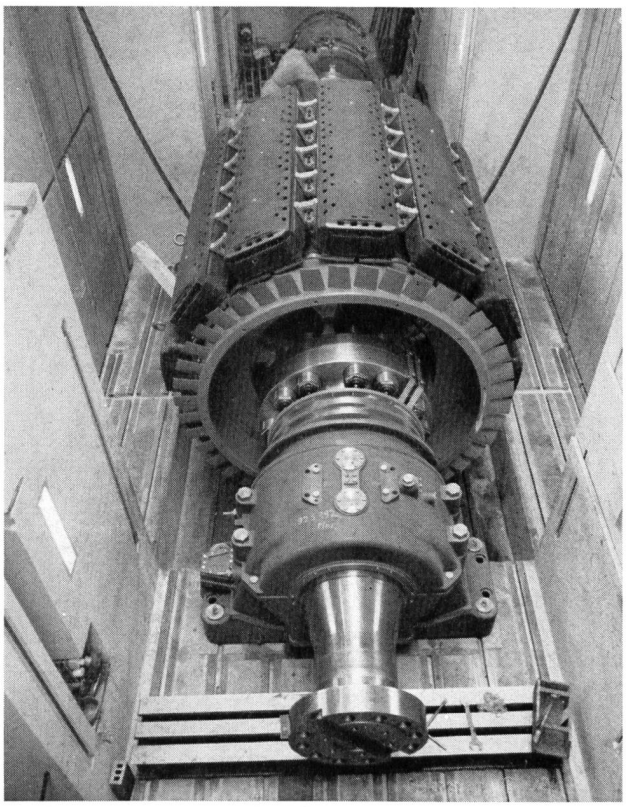


Fig. 2 Rotor d'alternateur hétéropolaire, construction 1958, 80 MVA, 500 t/min. pour la centrale de Nendaz des forces motrices de la Grande Dixence
Les orifices visibles sur les bords longitudinaux des pôles servent à évacuer l'air de refroidissement circulant dans les bobines polaires à deux couches (Photo Sécheron)

Evolution des parties électriques et magnétiques des alternateurs

Cette évolution a suivi la tendance générale à améliorer le rendement global des alternateurs, en même temps que celle, contradictoire de la première, qui recherche l'augmentation de la puissance spécifique.

Comme pour les transformateurs qui seront passés en revue plus loin, la plupart des pertes électriques et magnétiques relatives diminuent avec les dimensions linéaires de la machine. Toutefois, certaines d'entre ces pertes croissent et fixent par là même un dimensionnement dit «à puissance limite» de la machine. Des constatations identiques pourront être faites en ce qui concerne les pertes mécaniques.

L'augmentation de rendement recherchée a donc abouti comme pour tous les genres de machines en général à augmenter la puissance unitaire. Une seconde étape a consisté à faire usage de tôles magnétiques à pertes réduites, exigence que la métallurgie actuelle est en mesure de remplir. Les tôles ordinaires de dynamo, de 2,3 W/kg à 50 périodes par seconde et à 1 Wb/m² d'induction magnétique ont progressivement été remplacées par des tôles de 2,0 puis 1,7 à 1,3 et 1,1 W/kg. L'emploi de tôles à cristaux orientés permet de réduire encore plus les pertes de fer globales, mais leur répartition à l'intérieur du fer de la machine est difficile à rendre régulière par l'apparition de zones où le champ ne peut avoir, de par la géométrie même du circuit magnétique, la même direction que les cristaux. Les résultats obtenus sont néanmoins satisfaisants, surtout à la fréquence de 60 périodes par seconde, si l'on exepte la prise en considération du prix élevé de ces tôles par rapport à la qualité 2,3 W/kg et des inconvénients résultant de l'étampage, qui modifie sur une certaine distance de la limite de découpage, simultanément la perméabilité et les pertes magnétiques, bien entendu dans un sens défavorable.

Un autre paramètre important ayant permis une forte diminution des pertes relatives est le choix des isolations, tant des tôles magnétiques que des conducteurs des enroulements. L'isolation des tôles au papier, utilisée jusqu'en 1950, a fait place peu à peu à l'isolation à base de laques spéciales ou de vernis émail. Les compositions utilisées varient selon les constructeurs, mais toutes doivent répondre aux conditions relatives aux températures, tenue aux pressions pulsantes répétées pendant des dizaines d'années de service sans s'effriter, protection antirouille des tôles, régularité de la couche isolante etc. L'avantage principal de l'isolation au vernis est une conductibilité thermique en travers des tôles de presque le double de celle obtenue avec le papier. La chute de température entre le milieu et les extrémités d'un paquet de tôle en est donc diminuée et comme ce sont les températures des points les plus chauds de la machine qui font foi en matière de garantie de durée et de conditions de service, chaque degré gagné doit être pris en considération. Il serait cependant faux de penser que l'isolation au vernis puisse être appliquée à n'importe quelle qualité de tôle. Son extrême minceur (0,02 mm environ) peut facilement laisser subsister d'assez grandes surfaces de tôles n'entrant pas en contact avec leurs voisines, pour peu que l'épaisseur des tôles soit irrégulière. Il sera donc exclu d'utiliser des tôles laminées à chaud à cet effet, à cause de leur irrégularité d'épaisseur.

Un autre avantage à tirer de l'isolation au vernis est le meilleur facteur de remplissage des tôles, qui s'accroît de quelques centièmes, ce qui permet d'augmenter d'autant la puissance nominale de la machine. Enfin, l'application de l'isolation au vernis a entraîné chez les constructeurs un remaniement complet des méthodes de fabrication des noyaux magnétiques et exigé des investissements très importants pour l'achat de machines à enduire automatiques. Le vernissage à la main est exclu à cause de son irrégularité.

L'isolation des conducteurs d'induit a diminué de moitié en épaisseur par rapport aux anciennes isolations, non pas tant par l'emploi de nouveaux matériaux que par la possibilité «d'homogénéiser» l'isolation. Les matériaux de bases étant toujours du mica et des liens mécaniques sous forme de feuilles ou de bandes, il est nécessaire de combler les vides à l'aide d'un isolant fusible parfaitement stable et homogène, de façon à éliminer complètement les bulles d'air et arrêter entièrement des rentrées d'humidité à l'intérieur de l'isolant. Le montage des barres ou des bobines dans les encoches exigeant le plus souvent de fortes déformations mécaniques de l'isolation, celle-ci ou plutôt la matière de remplissage, constituée le plus souvent de gomme-laque ou de vernis à base d'asphalte, devrait être plastique, afin de ne pas se fendre ou se casser au cours du montage. Les grandes dimensions des bobines de bien des machines font apparaître lors des variations de charge des dilatations différentielles entre le fer et le cuivre à l'intérieur des encoches et provoquent le phénomène connu sous le nom de rampement (creeping) de l'isolation [2]. Les conséquences, graves pour le service de la machine puisqu'il est à craindre qu'un percement de l'isolation ne survienne, doivent être éliminées par des procédés sûrs dès que les dimensions de la machine, particulièrement la longueur de son empilage de fer, dépasse environ 2 à 3 mètres. La méthode choisie par l'ensemble de tous les constructeurs est de rendre l'isolation élastique et non plus plastique, compte tenu de la dilatation même de l'isolation sous l'effet de la température. L'isolation élastique devra pouvoir subir les déformations différentielles résultantes sur les machines les plus longues sans se fêler. De très nombreux essais, effectués par les constructeurs de machines comme par les fabricants d'isolants ont convergé vers l'utilisation de matières synthétiques en lieu et place de l'ancienne gomme-laque. De plus, les paillettes de mica, ordinairement de 8 à 12 cm² de surface, sont souvent remplacées par des paillettes très petites obtenues par voie chimique à partir du mica brut. Les paillettes microscopiques, pressées et séchées, peuvent être débitées en plaques, bandes, feuilles, servant après ramollissage éventuel, à l'isolation de base des conducteurs. La matière synthétique liquide servant au remplissage des vides est durcie le plus souvent par addition d'un catalyseur approprié, provoquant à vitesse lente, sans formation de bulles, la solidification de l'ensemble de l'isolation.

Des précautions spéciales doivent être prises pour le montage des bobines qui ne peuvent plus alors supporter des déformations mécaniques importantes. Ces

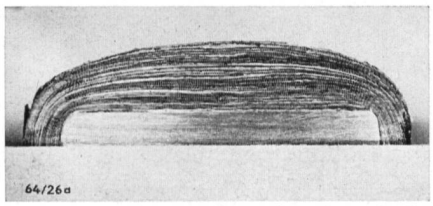


Fig. 3 Gonflement de l'isolation à la gomme-laque d'une barre à l'intérieur d'un évent de stator

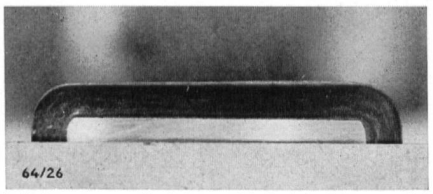


Fig. 4 Stabilité de l'isolation type micafolium lié à la résine synthétique, placé dans les mêmes conditions que l'échantillon de la fig. 3 (clichés MFO)

surplus de travaux d'usinage sont compensés d'une part par la résistance de l'isolation aux dilatations différentielles et par la possibilité d'obtenir des classes d'isolations supérieures à la classe B, comme les classes F et H, dont les températures maxima admissibles atteignent 180° C en permanence.

Ainsi, bien qu'indirectement, les nouvelles technologies des isolants permettent une augmentation du rendement des machines par le plus faible encombrement des isolants, qui laissent plus de place disponible pour le cuivre, et, toutes choses égales d'ailleurs, à température maxima du cuivre de l'enroulement donnée, permet une augmentation de densité de courant, étant donné la meilleure conductibilité thermique d'une faible épaisseur d'isolant.

La matière de remplissage n'est pas seule à entrer en lice pour l'amélioration des isolants, mais le diélectrique de base comme indiqué plus haut et également le support mécanique: le bandage ou la feuille (Folium). Le support de papier fait place aux toiles ou aux fibres de verre, qui, elles-mêmes, sont combinées soit avec des papiers d'amiante très minces, ou des papiers synthétiques, de même nature que la matière de remplissage solidifiée.

Les expériences faites jusqu'à ce jour avec ces nouveaux genres d'isolation sont encore trop brèves pour y porter un jugement définitif par comparaison avec les anciennes isolations, mais la probabilité est grande de voir les résultats confirmer les espoirs mis en les qualités des nouveaux isolants, dont, pour être complet, il est bon de mentionner que les caractéristiques de pertes diélectriques $\Delta \mathrm{tg}\, \vartheta / \Delta u$ ou variation de l'angle de perte par kV d'augmentation de la tension appliquée à l'isolant sont couramment plus favorables que pour les anciennes isolations. Enfin, les matières synthétiques durcies par catalyse présentent une structure homogène qui donne à l'épaisseur entière de la gaîne isolante la solidité d'un bloc plein. Ne présentant aucune surface «collée» l'isolation ne peut foisonner et par là même assure en principe une longévité plus grande de la machine (Fig. 3 et 4).

Parallèlement à l'enroulement induit, l'enroulement d'excitation a profité également des nouvelles isolations, en ce sens qu'à la place de micanite servant à isoler entre elles les spires de profil nu des bobines polaires, les toiles de verre ou papier d'amiante imprégnés de résines synthétiques remplissent parfaitement leur rôle d'isolant de plus faible épaisseur que précédemment et tenant une température plus élevée. Des problèmes de dilatations différentielles, analogues à ceux rencontrés pour le stator, se posent avec encore plus d'acuité pour les bobines polaires, étant donné les forces centrifuges considérables qui agissent sur elles, et déforment plastiquement même le cuivre. Les machines anciennes, de faibles puissances relatives, étaient également assez restreintes dans leurs dimensions et ces problèmes ne se présentaient pas. Les grandes longueurs d'empilage entrant actuellement en ligne de compte exigent des solutions à ces problèmes de dilatation qui ont été résolus pour une bonne partie par un renforcement de la ventilation des bobines d'une part (Fig. 5) et par l'utilisation de cuivre allié à une très faible proportion d'argent. L'alliage possède une élasticité appréciable qui élimine en grande partie les dilatations résiduelles et par suite augmente la longévité de l'enroulement.

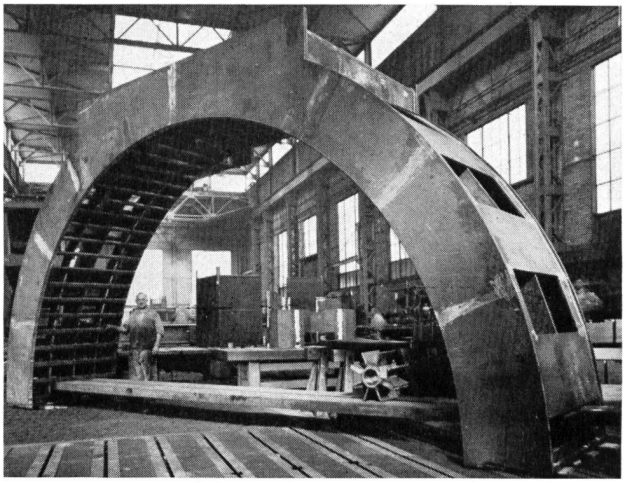


Fig. 5 Demi-stator d'alternateur à axe vertical, de construction soudée, avant son usinage (Photo Sécheron)

Il subsiste un facteur qui laisse encore libre la disposition d'une certaine marge d'action susceptible d'augmenter le rendement de la machine; c'est l'induction d'entrefer. Par une étude approfondie des formes et courbure à donner aux extrémités des pôles et de l'empilage du stator, l'induction d'entrefer peut être poussée un peu au-dessus de 0,9 Wb/m². Les pertes fer peuvent n'augmenter que dans le même rapport que l'augmentation d'induction prévue si l'on a soin d'augmenter les sections magnétiques, dans la même proportion. Les dimensions extérieures seules seront légèrement plus grandes.

Evolution des parties mécaniques des alternateurs

Le point le plus important à considérer du point de vue mécanique, à part les questions de résistance des matériaux, est la grandeur des pertes mécaniques.

Elles sont toujours de deux ordres: Frottements des paliers et brassage d'air et ventilation, les pertes dues à l'entraînement de machines auxiliaires comme les pompes à huile, l'excitation, etc. ne comptant pas directement dans l'expression du rendement-même de la machine, mais seulement pour le calcul du rendement total du groupe. Les frottements des paliers créent des pertes relatives décroissant à mesure de l'augmentation des dimensions de la machine, car le diamètre des tourillons de l'arbre croît plus lentement que le poids du rotor, augmentant lui-même moins rapidement que la puissance. Ici donc le rendement mécanique va également croissant avec les dimensions principales. Il n'en n'est plus de même des pertes par brassage d'air. Celles-ci augmentent comme le cube de la vitesse périphérique et constituent comme les pertes fer et les paliers, des pertes constantes, indépendantes de la charge de la machine. Il y a donc pour chaque puissance de machine un compromis à choisir entre les pertes par brassage d'air et le diamètre admissible en conformité des sollicitations mécaniques des matériaux et d'autres conditions indépendantes de la conception de la machine du point de vu électrique, comme par exemple le moment de gyration, souvent prescrit par le constructeur du régulateur de turbine et celui de la conduite forcée.

Afin de ne pas augmenter les pertes relatives par brassage d'air, il sera nécessaire de rendre la machine plus longue plutôt que d'agrandir son diamètre. C'est

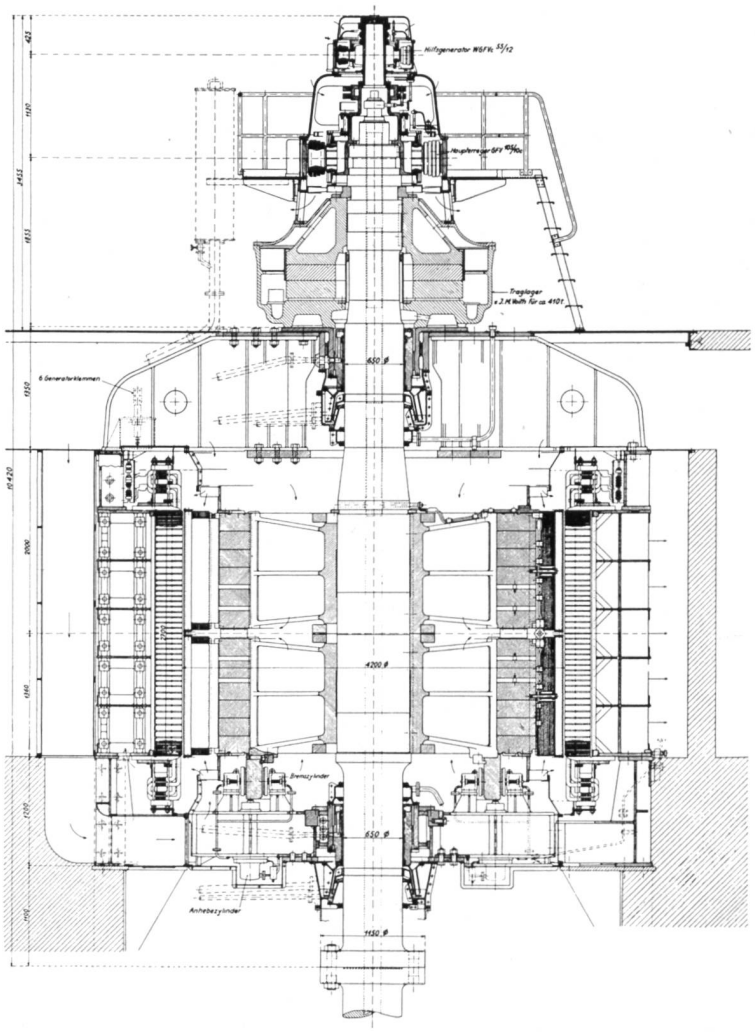


Fig. 7 Construction de grand diamètre d'un alternateur à axe vertical, dont l'arbre traverse entièrement la machine.
Puissance 55 MVA, 333,3 t/min., Centrale de Witznau/Schluchsee (BBC)

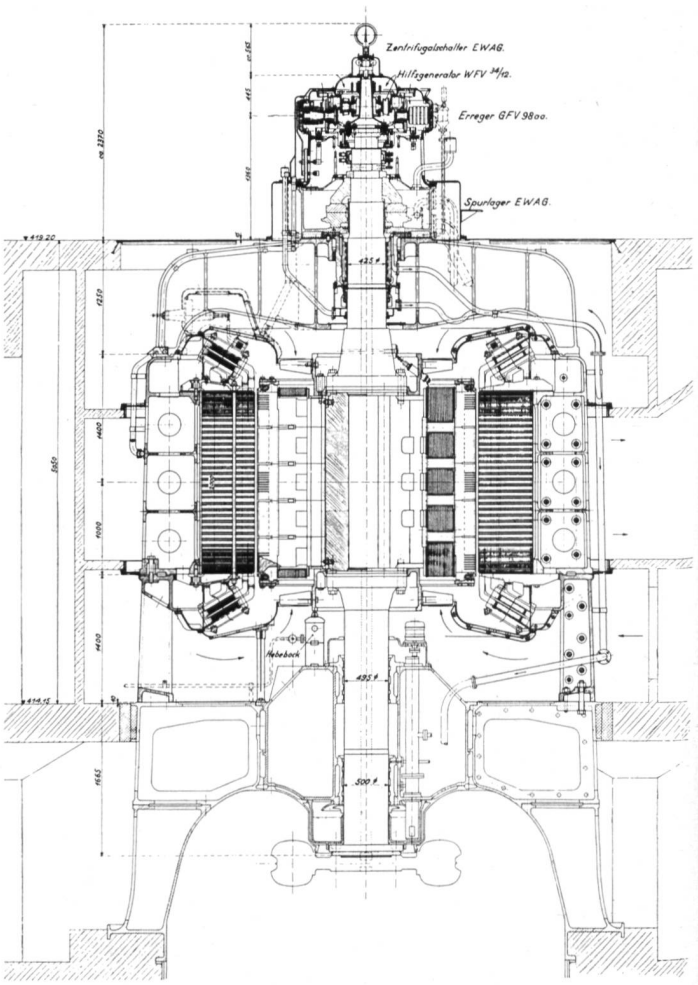


Fig. 8 Alternateur à axe vertical comportant un rotor à moyen d'acier coulé, sur lequel les bouts d'arbre sont vissés par des boulons.
Puissance 18 MVA, 500 t/min., Centrale de l'Etzel (BBC)

alors sur un abaissement de la vitesse critique qu'il faut compter et sur des difficultés accrues de refroidissement. Laissant de côté cette dernière question qui sera examinée plus loin, il faut considérer le cas où la vitesse critique minima étant atteinte, toute augmentation de puissance exigera une augmentation du diamètre, simultanément à la longueur. Le taux des pertes constantes aura tendance à augmenter, puisque le brassage d'air varie comme le cube du diamètre, et la courbe de rendement aura en toute vraisemblance un caractère ascendant encore au-delà de la charge nominale. Tenant compte de ce facteur ou pour d'autres raisons également, la tendance qui se manifeste est d'allonger les machines rapides et de raccourcir les machines lentes. Cela implique des améliorations du refroidissement pour les premières et des perfectionnements de construction aux jantes pour les secondes, celles-ci ayant alors des vitesses périphériques plus élevées.

En même temps que les pertes indépendantes de la charge sont maintenues le plus bas possible par l'allongement de la machine, les pertes supplémentaires par courant de Foucault dans les plaques de serrage augmentent en valeur relative avec l'allongement de la machine, car la densité superficielle de courant est artificiellement accrue pour les grandes unités afin d'augmenter la puissance spécifique. Les variations de ces facteurs tendront à déplacer le maximum de rendement vers les faibles charges puisqu'ils augmentent les pertes variables avec la charge. Pour les centrales fournissant la puissance de base d'un réseau, le rendement maximum devra être placé aussi près que possible de la pleine charge, tandis qu'il y aura lieu de placer ce point à la charge partielle la plus probable pour les centrales ayant à fournir les appoints d'amplitude normale et de durée relativement longue.

Il est malgré tout difficile de prévoir de nettes différences entre des machines possédant d'une manière prépondérante, l'un ou l'autre des caractères précités, du fait qu'il n'est qu'exceptionnel que la puissance mécanique à l'arbre soit mesurée, ou que des statistiques suffisamment serrées des régimes de services soient tenues à jour pour évaluer avec précision les pertes totales obtenues. Ce sera plutôt dans le capital à investir que les différences seront sensibles et c'est souvent ce côté-là du problème qui dictera les valeurs à donner aux paramètres constructifs des alternateurs [3]. Ce sera particulièrement le cas pour le rapport de court-circuit, qui fixe en quelque sorte le prix de la machine pour des conditions de service et de stabilité données, et qui, bien qu'étant une donnée d'origine électrique, exerce une grande influence sur les dimensions des parties mécaniques.

Les dimensions générales des parties essentielles déterminent à leur tour l'ampleur à donner aux ouvrages

de génie civil comme les fondations de béton, ou architecturaux comme le bâtiment des machines. Les dispositions modernes ont pour but essentiel non seulement de tendre à restreindre l'encombrement propre des machines mais aussi leur encombrement lors du montage et des revisions. Ce facteur acquiert une certaine importance dans les centrales souterraines où les excavations sont onéreuses. Même pour les centrales à ciel ouvert, il est intéressant de n'avoir que de faibles encombrements dans le but de simplifier et d'accélérer la manutention des grosses pièces qui sont alors très lourdes.

D'une manière générale, les perfectionnements d'ordre électrique ont conduit à modifier et à améliorer la construction mécanique des alternateurs. Celle-ci a profité de son côté des dernières performances de la métallurgie et permet finalement d'accéder aux grandes puissances exigées par les projets hydrauliques en exécution ou à l'étude.

Pour illustrer certaines des améliorations conçues du point de vue mécanique, c'est par quelques exemples que celles-ci seront le plus facilement mises en évidence.

La carcasse du stator en tôle d'acier soudée date de 1925 environ. Cette construction permet un allègement de 15 à 25 % par rapport à la fonte grise et même pour des exécutions à plusieurs exemplaires, est plus économique. La disposition classique comporte une série d'anneaux découpés au chalumeau et réunis par des entretoises axiales aussi bien extérieures qu'intérieures aux anneaux. Les entretoises internes recevront et maintiendront les tôles magnétiques en place.

Les stators d'alternateurs à entraînement hydraulique sont pratiquement toujours construits de la manière précitée (Fig. 5), à l'encontre des stators de turboalternateurs où souvent le noyau de paquets de tôles est indépendant de la carcasse et relié à celle-ci par des biellettes ou des ressorts à lames, permettant d'absorber la pulsation due à l'attraction magnétique des deux seuls pôles du rotor sans les transmettre à la carcasse.

Les paquets de tôle eux-mêmes ont toujours été munis d'évents et les exécutions actuelles sont restées inchangées à cet égard.

Enroulement induit:

L'unique disposition adoptée actuellement pour les grandes puissances est l'enroulement en tambour, qui présente les meilleures qualités de résistance aux efforts mécaniques, engendrés par les court-circuits et ne crée que les plus faibles pertes supplémentaires dans les plaques de serrage, par rapport aux autres dispositions (Fig. 6).

Les problèmes posés par le schéma même de l'enroulement ont été en partie résolus par l'emploi, lorsque les pôles sont en grand nombre, d'enroulements ondulés à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et phase. Grâce à eux les irrégularités des courbes de champ des divers pôles sont en partie compensées, et certains harmoniques impossibles à éliminer sans cela par raccourcissement du pas arrivent à disparaître. Enfin, le nombre de connexions reliant les groupes de bobines ou de barres peut être souvent très réduit et n'encombre pas l'espace compris entre le fer du stator et les bâches d'extrémité. Le travail de bobinage en est facilité comme aussi les réparations.

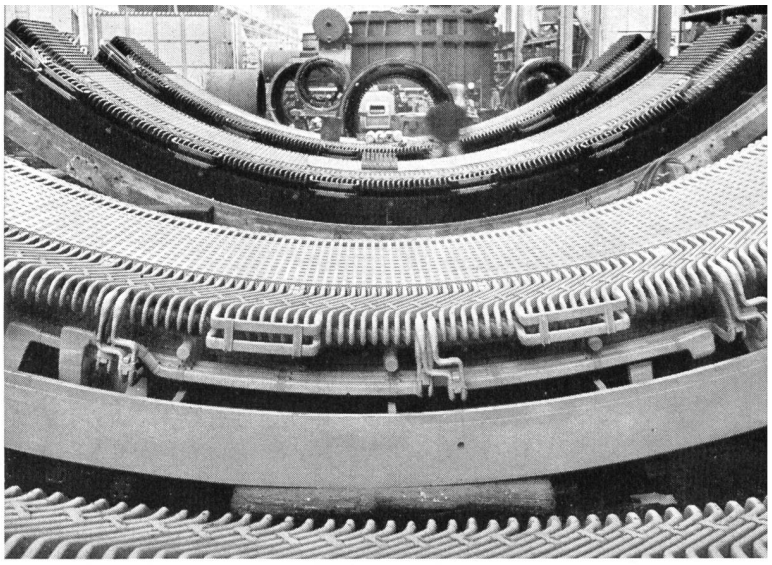


Fig. 6 Disposition en «tambour» des têtes de bobines sur un stator en plusieurs parties
On remarquera entre les divers groupes de bobines des «connexions» qui, dans un bobinage bien étudié doivent être en nombre aussi restreint que possible (Photo MFO)

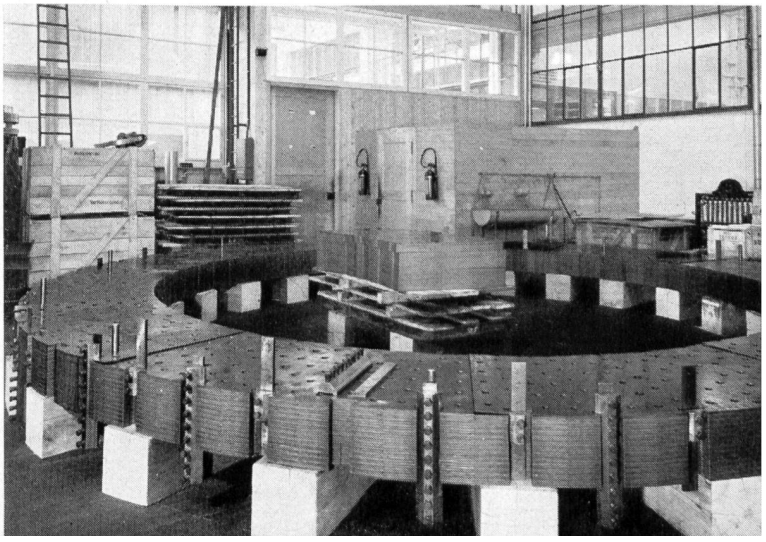
Rotor

Les arbres traversants, d'une seule pièce entre les deux paliers ne se rencontrent que pour les machines de grand diamètre (Fig. 7). Dans les autres cas, des bouts d'arbres vissés sur brides, sont fixés au corps du rotor en acier coulé, les arbres étant naturellement en acier forgé (Fig. 8). Cette disposition est évidemment moins onéreuse qu'un arbre traversant et permet éventuellement d'exécuter des rotors non percés ou ne comportant que l'alésage d'inspection, ce qui augmente le diamètre exécutable possible, à vitesse donnée.

Des procédés modernes de fabrication ont fait leur apparition il y a une vingtaine d'années, qui se sont étendus au rotor de grands diamètres, par leur construction en tôles empilées et segmentées, réunies par des boulons de serrage (Fig. 9). Cette disposition représente véritablement une révolution dans ce genre de construction, car du même coup le transport des plus grands diamètres concevables peut se faire avant l'assemblage du rotor, en expédiant des tôles en caisses. Le montage à pied-d'œuvre est simple, n'exige aucune machine-outil, et les tôles étant parfaitement homogènes le contrôle du matériau par essai d'emballement est superflu, ou s'effectue sur l'alternateur même.

Les nouvelles techniques de soudure par induction à moyenne fréquence, ou aussi les chalumeaux à atmosphère protectrice permettent d'autre part la fabrication des bobines polaires par soudure bout à bout, à

Fig. 9 Montage d'une jante feuilletée de 7,5 m de diamètre avant la mise en place des tiges de serrage (Photo BBC)



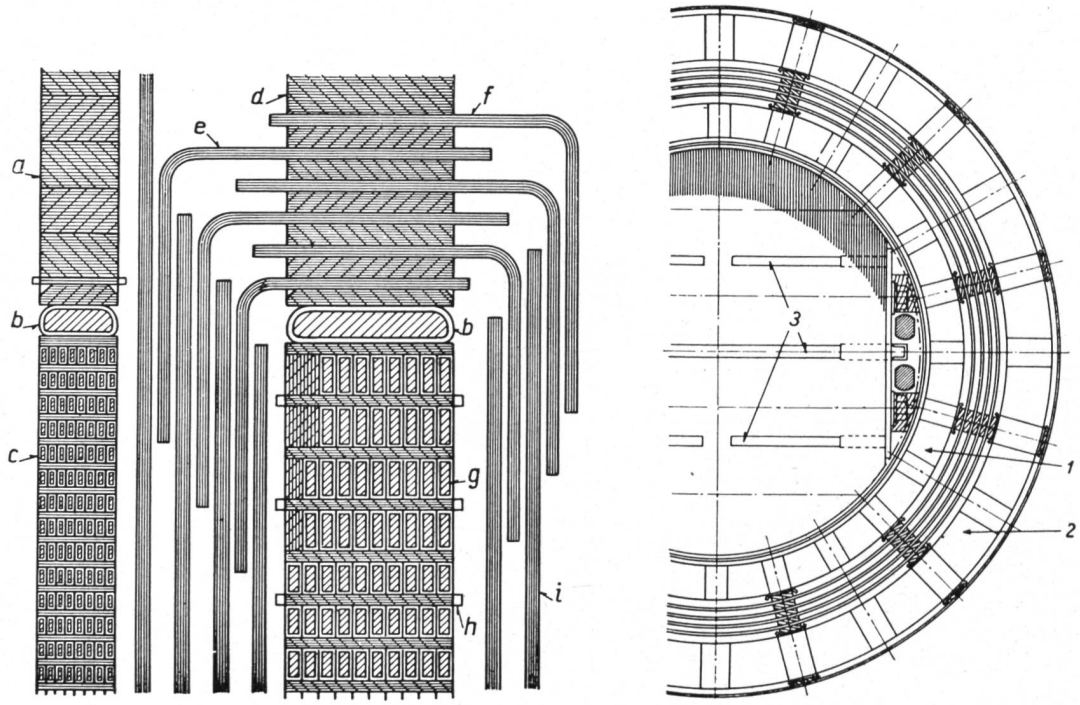


Fig. 12 Exemple d'isolation d'extrêmité de bobines de transformateur, utilisant des manchettes de presspan

Légende:
- a Anneau d'appui
- b Anneau de garde
- c Bobinage basse tension (1)
- d Cales d'écartement
- e Collier à profil en équerre } Isolation contre culasse
- f Capots d'isolation } Isolation contre culasse
- g Bobinage haute tension (2)
- h Guidage des cales d'écartement
- i Cylindre isolant
- – Canaux réfrigérants (3)

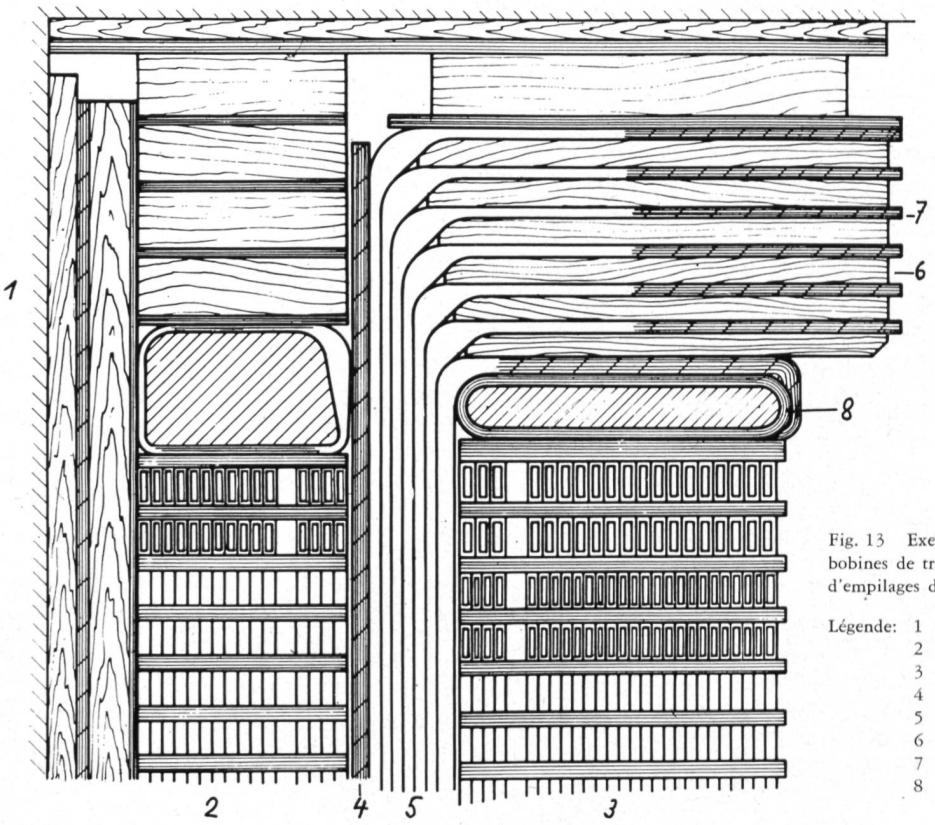


Fig. 13 Exemple d'isolation d'extrêmité de bobines de transformateur, utilisant des écrans d'empilages de papier

Légende:
1 Fer
2 Bobinage basse tension
3 Bobinage haute tension
4 Ecran isolant en carton bakélisé
5 Ecrans d'empilages de papier
6 Cales intermédiaires
7 Brides d'empilages de papier
8 Anneau de garde (métallique, isolé)

angle droit, du profil de cuivre des bobines polaires. Malgré un léger supplément de poids du cuivre par rapport à l'ancienne construction à profil soudé sur champ, la régularité d'épaisseur du cuivre, même aux soudures en fait des bobines très stables mécaniquement et rapidement exécutables, avec un minimum d'heures de main-d'œuvre.

Croisillons et paliers

La construction soudée a remplacé, comme pour les carcasses de stators, l'acier coulé, et permet des combinaisons judicieuses de bras de croisillons d'un seul tenant avec la cuve du pivot. Celui-ci, longtemps constitué par des patins reposant soit sur des ressorts, soit sur un matelas de tôles de laiton garantissant une certaine élasticité, se voit remplacé peu à peu pour les grandes valeurs de poussée par des patins montés indépendamment sur vérin à vis différentielle contenant un micromètre ou un extensomètre électrique. Il devient possible de régler avec certitude la charge sur chacun des patins. Cette évolution a suivi celle des turbines et de l'accroissement des puissances qui de quelques MVA il y a une cinquantaine d'années a passé à plus de 100 et même 200 MVA et où les poussées se sont accrues de quelques dizaines de tonnes à 2000 tonnes environ.

Pour les paliers de guidage, l'autograissage par rainures hélicoïdale de visco-pompage d'huile supplante très souvent l'alimentation d'huile par pompe, qui exige des conduites encombrantes devant contourner l'alternateur du haut en bas.

Disposition générale

Non seulement pour des raisons esthétiques ou architecturales mais économiques, les alternateurs verticaux sont maintenant presque toujours noyés ou semi-noyés dans les fondations. Tout le volume de la salle des machines devient disponible pour les manutentions, d'où économie de volume, sensible surtout pour les centrales souterraines (Fig. 10).

De plus en plus souvent, en outre, le stator de l'alternateur repose non plus sur le béton des fondations mais sur un anneau de portage solidaire de la bâche de la turbine. Tous les efforts mécaniques sont alors transmis au béton par le bâti de la turbine. L'ancrage du groupe entier est reporté sur les parties les plus profondes des fondations. La rigidité du groupe est sinon meilleure, du moins mieux déterminée qu'avec la fixation sur béton, et d'autre part l'ajustage et le centrage réciproque des deux machines se faisant en atelier, le montage du groupe en est facilité.

Les groupes à axe horizontal comptent en général deux roues Francis ou Pelton en porte-à-faux aux extrémités de l'arbre de l'alternateur, qui ne possède que deux paliers. Cette disposition, adoptée depuis vingt-cinq ans environ, est quasi générale actuellement. Il est très rare de rencontrer encor des groupes à 3 paliers de construction récente. Il ne se pose donc pas de problème de centrage de précision lors du montage (Fig. 11).

En dehors des considérations purement techniques, les deux dernières figures font ressortir également le souci des créateurs des projets de vouloir associer les exigences de la technique avec un certain équilibre de forme et de dimensions des machines et de leur voisinage.

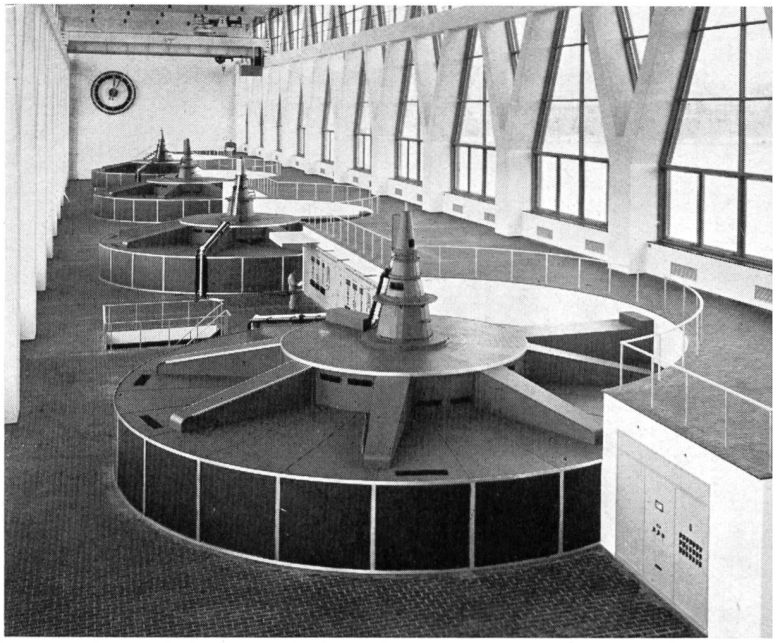


Fig. 10 Vue générale de la salle des machines de la centrale de Birsfelden, équipée de 4 groupes verticaux semi-encastrés (Photo MFO)

LES TRANSFORMATEURS

Ne comprenant aucune pièce rotative, le transformateur devrait suivre un développement d'un autre ordre que celui des machines. Dès les premières exécutions à la fin du siècle dernier le problème des pertes dans les tôles constituait déjà la cible sur laquelle allaient être pointés tous les efforts d'amélioration du rendement. Dès 1902 [4] les tôles d'alliage au silicium étaient connues et leurs pertes spécifiques allaient progressivement en diminuant jusque vers 1930. Ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale que l'emploi de tôles lami-

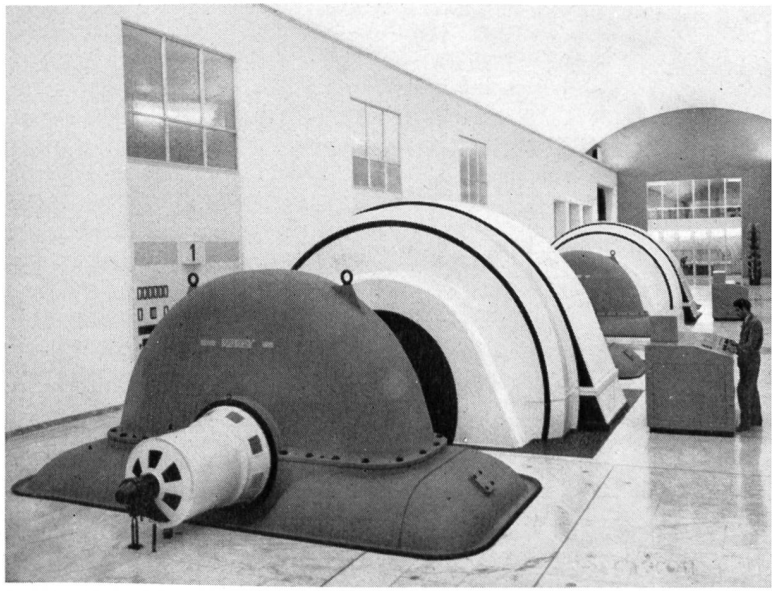


Fig. 11 Centrale de Peccia. Groupes à axes horizontaux à 300 t/min. de 28 MVA, actionnés de chaque côté par une roue Pelton (Photo Sécheron)

nées à froid, à cristaux orientés, a fait son apparition. Un saut brusque des pertes de 1,1 à 0,7 et même 0,6 w/kg à 1 wb/m² d'induction magnétique et 50 périodes par seconde représentait une amélioration extrêmement importante qui a permis un large essor des constructions d'unité de forte puissance. Bien que le transformateur à pertes minima ne soit pas simultanément celui de prix minimum, il est néanmoins indispensable, de par le rôle même que les transformateurs doivent jouer, que leur rendement reste maximum. Sur l'ensemble d'un réseau de distribution, le nombre de transformateurs peut être très élevé et leur puissance moyenne faible. Leur coefficient d'utilisation est relativement bas puisqu'ils alimentent des consommateurs dont la charge n'est pas régulièrement répartie au cours de la journée, de la semaine, ou même de l'année, mais qui se concentre sur les heures de pointe. Le temps de marche à vide de ces transformateurs est long et leurs pertes à vide abaissent fortement le rendement moyen. Ainsi contrairement aux machines où une baisse de rendement aux petites puissances unitaires ne présente pas d'inconvénient majeur dans l'économie de l'exploitation, les petites unités transformatrices ont de bonnes raisons d'avoir un rendement poussé au maximum. Il est intéressant de noter que des dispositifs de déclenchement automatique avaient déjà été inventés en 1899 pour couper le courant à vide en l'absence de charge et ainsi supprimer une partie des pertes. De tels systèmes ne sont plus même pensables aujourd'hui, d'une part pour des raisons de simplicité et de sécurité de service et aussi par le fait qu'il est rare de voir fonctionner un transformateur de distribution réellement à vide ou sous quelques centièmes de sa charge. L'extension de l'usage des appareils ménagers contribue à améliorer le diagramme journalier de charge de ces transformateurs. Le problème se pose d'ailleurs avec des acuités différentes en Europe et en Amérique du Nord. Sur le premier continent les transformateurs de distribution alimentent un quartier dense en population et en consommateurs, sous une tension de 220/380 V. Leur territoire d'alimentation peut être alors assez étendu, mais pour les distributions à 110 V des réseaux américains, l'étendue est plus restreinte et les maisons souvent dispersées, donc une faible densité de consommateurs. Il est clair que les diagrammes de charge seront moins favorables dans ce dernier cas que dans le premier.

L'avantage du bon rendement aussi pour les petites unités transformatrices est certainement un des facteurs qui ont stimulé les efforts faits en vue d'obtenir des tôles à très faibles pertes.

C'est donc un double intérêt qui a suscité le développement de transformateurs, puisque les petites comme les grandes puissances doivent répondre à des conditions de rendement de poids et de prix qui peuvent être réalisés par les mêmes développements technologiques.

Alors que l'élaboration des petites unités pose avant tout des problèmes de fabrication et d'utilisation de matériaux adéquats, celle des très grandes unités doit répondre à des conditions très sévères quant à l'isolation, le poids et surtout les dimensions. Dans cet ordre d'idée, il se détache deux tendances qui pour l'instant progressent parallèment. L'une pose comme condition nécessaire à l'accession d'une utilisation maximale des matériaux, la construction du type «mobile» (Wandertransformator) qui est entièrement monté en atelier, y compris les réfrigérants, l'huile, et les bornes haute tension. Seules les bornes basse tension sont enlevées pour le transport. L'autre tendance recherche l'amélioration des groupes monophasés, qui réunis par trois, donnent une puissance triphasée 3 fois supérieure à celle d'une unité monophasée.

Si la recherche d'un maximum d'utilisation des matériaux semble plus rationel dans le cas d'un transformateur triphasé qu'une unité monophasée, son transport limite sa puissance à peu près au tiers de celle d'un groupe monophasé. Le dernier sera cependant seul à pouvoir être utilisé pour les transmissions à 380 kV pleinement utilisées, car la puissance d'une telle ligne est de l'ordre du GVA tandis que la puissance limite de transformation est un peu supérieure à 300 MVA. Il faudra donc des unités monophasées si une telle ligne venait à être alimentée par un seul groupe de transformation.

Isolation des transformateurs

L'isolation entre enroulement et masse constitue un problème qui est lié au mode de refroidissement du transformateur, puisque le fluide remplissant la cuve doit servir en même temps à l'isolation et au refroidissement. La loi selon laquelle les distances entre parties sous tensions différentes varient avec cette tension est d'ordre 1,5, c'est-à-dire que la distance à maintenir entre les parties considérées varie comme la puissance 1,5 de la tension. Les nombreuses recherches entreprises dans ce sens ont conduit des constructeurs à ren-

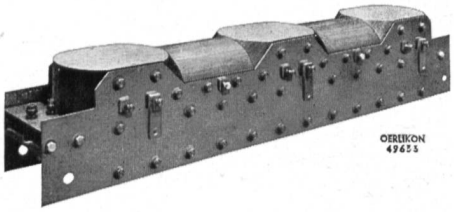


Fig. 15 Culasse à section semi-cylindrique du côté des enroulements, pour transformateur triphasé

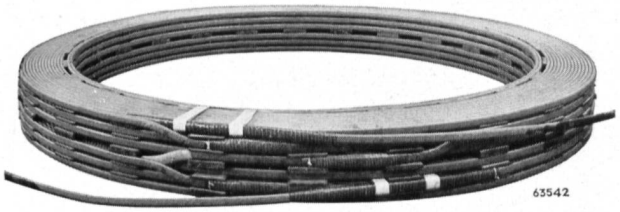


Fig. 16 Groupe de bobines de transformateur à enroulements enchevêtrés

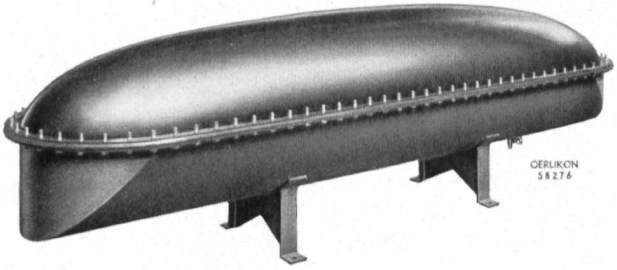


Fig. 17 Conservateur d'huile pour transformateur, avec membrane de fermeture en caoutchouc. (Position de gonflement maximum de la membrane)

forcer l'isolation des extrémités d'enroulements à haute tension par des manchettes en forme de gouttière (Fig. 12 et 13), d'une part, et à augmenter la distance, ou tout au moins à abaisser les valeurs maxima de champ électrique en donnant aux pièces aussi bien à la terre que sous tension des arrondis de rayon aussi grand que possible d'autre part. Il en est résulté la construction à tôles radiales (Fig. 14), qui permettent sans augmentation d'encombrement extérieur de rendre les distances entre parties sous tension et masse plus élevées, et celle à culasses à tôles parallèles et de section semi-circulaire (Fig. 15). Les deux constructions se prêtent parfaitement à l'exécution d'unités monophasées, qui pour les centrales hydrauliques en montagne, sont souvent les seuls types entrant en ligne de compte, du fait des gabarits très étroits des routes d'accès.

Il est intéressant de remarquer que si l'augmentation linéaire des dimensions d'un transformateur fait croître sa puissance avec l'exposant 4 de celles-ci, les distances d'isolation elles, peuvent fortement rabaisser ce chiffre. Néanmoins, le stade atteint actuellement est de l'ordre de 1 kg de poids brut des transformateurs (y compris l'huile) par KVA de puissance apparente, du moins pour les très grandes puissances.

En dehors de l'isolation en service ou sous tension d'essai à fréquence de service, le problème de la tenue aux ondes mobiles et aux décharges atmosphériques est celui qui est le plus difficile à résoudre de tous ceux qui se rencontrent sur un transformateur.

Avant de pouvoir trouver des solutions satisfaisantes, il fallait arriver à analyser les phénomènes de surtension de tout genre en laboratoire. Ce n'est que depuis une quinzaine d'années que cette analyse a pu être entreprise scientifiquement, grâce aux derniers perfectionnements apportés aux oscillographes cathodiques.

L'effet des surtensions est de solliciter non seulement l'isolation à la masse, mais aussi celle entre spires.

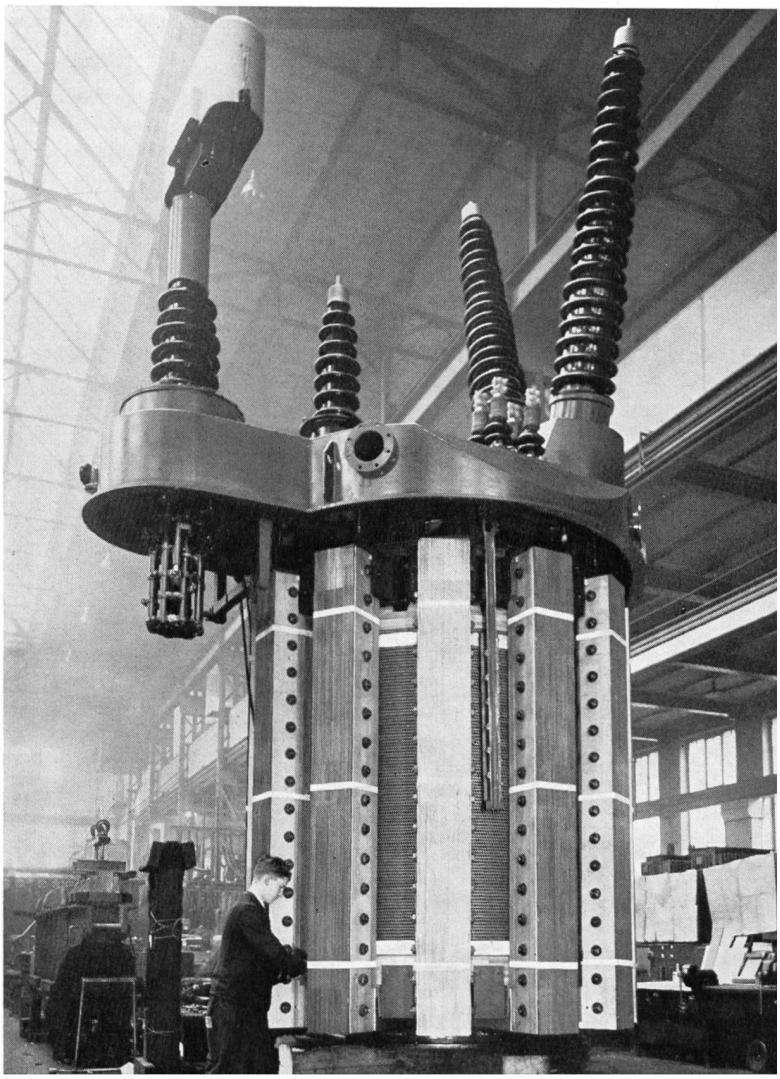
Les nombreuses solutions proposées montrent la complexité du problème. Presque tous les constructeurs cherchent à répartir la capacité entre spires de telle façon que les sollicitations diélectriques soient les plus uniformes possible entre chaque spire, le système consistant à renforcer l'isolation des premières spires vers les bornes se rencontre de moins en moins, par contre l'augmentation des capacités sous forme d'écrans entre les premières spires est recherchée, mais le réaliser est un problème difficile à résoudre d'une façon simple par suite de l'encombrement des capacités elles-mêmes. Par l'enchevêtrement des enroulements partiels des bobines entre eux, il est possible également d'uniformiser la répartition du champ le long de l'enroulement lors d'une surtension de courte durée, car les courants de charge des capacités ainsi formées déterminent des potentiels plus élevés sur des spires de rang supérieur et moins élevés sur les premières spires elles-mêmes, d'où compensation de l'effet habituel des fortes chutes de potentiel entre les premières spires (Fig. 16).

Enfin un autre point important de l'isolation des transformateurs est la conservation de l'huile. Tout d'abord au point de vue de sa stabilité chimique, il n'y a pas de difficulté spéciale à surmonter, mais ce que les unités de grande puissance doivent posséder, c'est une protection efficace de l'huile contre l'absorption d'humidité. Le système à conservation d'huile relié à l'atmosphère par une capsule de silicagel donne satisfaction dans la plupart des cas. Le surplus de protection contre l'humidité consistant à sceller la cuve en permettant la dilatation de l'huile sous un coussin de gaz neutre sec est largement mis en échec par l'absorption du gaz par l'huile et sa restitution sous forme des bulles, spécialement dans les pompes de circulation. Il en résulte, selon les spécialistes, une baisse de rigidité diélectrique de 20 à 60%. Quelques transformateurs ont été exécutés, dans lesquels la séparation de l'huile d'avec le gaz ou l'atmosphère se fait par membrane déformable en matière plastique ou en caoutchouc (Fig. 17).

Résistance aux court-circuits

Depuis 1911, époque à laquelle les dispositifs de serrage de bobines par ressorts ont été introduits, bien des recherches ont été entreprises dans le but de diminuer les forces agissant sur les bobines, et cela en les disposant selon des bobinages autres que simplement concentriques. Dans la pratique, la valeur des courants de court-circuits, si elle peut être déterminée, est une quantité aléatoire, qui peut en effet survenir à brève échéance ou jamais. Il est bien entendu qu'il y aura toujours des court-circuits sur un réseau, mais la question difficile à trancher est celle de la valeur maximum du courant de court-circuit qui surviendra avec une probabilité donnée. C'est pour cela que les méthodes de calcul-même des efforts dynamiques des courants de court-circuits sur les bobinages n'ont pas été poussées

Fig. 14 Transformateur monophasé à noyau de tôles radiales (Photo BBC)



à fond dès le début et que c'est grâce à la possibilité qu'offrent les machines à calculer électroniques et aussi à une reprise de l'importance du problème pour les grandes unités transformatrices que de nouvelles recherches ont été entreprises. Leur conclusion ne fournit pas de solution véritable au problème, mais permet de situer l'ordre de grandeur des courants de court-circuits admissibles pour un bobinage donné, maintenu par serrage à ressorts selon la conception classique. Les efforts électrodynamiques étant pulsatoires à la fréquence double de celle du réseau, il était assez naturel de penser à amortir toute oscillation pouvant survenir sur le système bobinage-ressorts. Sur certains transformateurs les ressorts sont montés à l'intérieur de chambres cylindriques remplies par l'huile de la cuve et qui constituent, grâce à des ouvertures calibrées en communication avec leur extérieur, des amortisseurs d'oscillation devant limiter l'amplitude des mouvements éventuels des bobines.

Refroidissement des transformateurs

Du fait du double rôle mentionné que doit jouer l'huile, les transformateurs seront à quelques rares exceptions près, encore longtemps refroidis par ce liquide. Toutefois, le danger d'incendie oblige le montage des transformateurs de moyenne puissance dans des cellules ignifuges s'ils ne sont pas en plein air. Les huiles incombustibles fournissent bien une solution quant à la suppression du danger d'incendie, mais donne lieu à la formation de chlore à la suite d'un arc interne à la cuve. Pour éviter ce défaut, d'autres systèmes sont envisagés, comme le refroidissement par gaz comprimé et la vaporisation. Ce dernier système peut être extrêmement efficace mais l'agent réfrigérant en général un fluorure de carbone, est d'un prix extraordinairement élevé, ce qui a retenu jusqu'à présent les constructeurs dans la fabrication de tels systèmes. Le gaz comprimé peut également donner lieu à un refroidissement très efficace, à condition d'être en circulation à la surface des bobines sous une pression relativement élevée. Il en résulterait pour les grandes unités des poids de cuve prohibitifs qui ont fait renoncer jusqu'à présent à ce genre de refroidissement.

En outre, comme l'huile n'est qu'un agent intermédiaire de refroidissement, car la chaleur est définitivement éliminée du transformateur par de l'air ou de l'eau, il y a deux chutes de températures principales à provoquer, l'une entre parties actives du transformateur et huile, l'autre entre huile et réfrigérant extérieur, qui, elles, laissent encore aux constructeurs des voies ouvertes vers de nouvelles conceptions.

Appareillage accessoire

Des simples tôles ondulées servant d'ailettes au refroidissement naturel de la cuve, le système réfrigérant d'un transformateur s'est compliqué de plus en plus, quoique ne faisant intervenir pour des raisons de sécurité, pendant très longtemps et encore maintenant que la convection naturelle, pour aboutir finalement à tout un assemblage de pompes assurant la circulation d'huile dans le noyau de fer et dans les bobines, et de ventilateurs brassant l'air autour des radiateurs. La mise en panne de l'un ou l'autre de ces organes serait dangereux pour le transformateur, aussi les pompes et les ventilateurs sont-ils toujours conçus pour permettre à une convection naturelle de prendre naissance en cas de défaillance de leur fonctionnement et permettre au transformateur d'être maintenu en service sous charge réduite.

Conclusions générales

La presque totalité des développements techniques tendent vers un extremum que l'esprit des chercheurs affine au cours du temps.

Pour l'aviation l'extremum est la légèreté. Pour les courants faibles et télécommunications ce sera la «miniaturisation» et pour le courant fort on peut réellement parler de gigantisme de puissance et de dimensions. Cela tient probablement au fait que l'énergie électrique n'étant qu'un simple stade servant à la transmission et à la distribution, est trop précieuse pour la gaspiller et qu'une rationalisation à outrance s'avère nécessaire. Le passage à de petites, puis à de plus grandes machines ou transformateurs s'opérait autrefois par extrapolations par petits bonds. Une fois les effets physiques des augmentations des dimensions connus, il a été possible d'accroître l'ampleur des bonds le développement technique, mais en plus il devient possible de prévoire sa valeur limite, à partir de laquelle d'autre principes physiques ou d'autres procédés devront être employés. Le refroidissement à l'hydrogène des alternateurs en est un exemple.

Il faut toutefois ne pas perdre de vue que si les conceptions deviennent plus audacieuses à mesure que les procédés de calcul et l'usinage se perfectionnent, il est indispensable d'accroître la vitesse de fabrication, déjà à partir du calcul-même, car en considérant le temps pris actuellement pour l'élaboration d'un projet et l'exécution d'une centrale hydraulique par exemple, les machines qui y seront installées ne présenteront plus, au jour de leur mise en service définitive, l'état le plus avancé de leur developpement technique, mais auront déjà perdu quelques années durant lesquelles d'autres perfectionnements seront apparus. Il en est bien entendu de même dans beaucoup d'autres domaines de la technique, mais ce fait ne dispense pas de rechercher à minimiser cet écart par des efforts de recherches toujours plus intenses.

Il aurait fallu, pour être complet, exposer le développement des alternateurs de petite puissance, destinés aux groupes électrogènes noyés des usines marémotrices par exemple, des alternateurs actionnés par moteurs Diesel ou à gaz, des systèmes d'excitation et du développement pris par leur réglage. D'autres informations encore auraient dû également figurer dans le chapitre des transformateurs, cependant le manque de place l'interdit.

Bibliographie :

[1] Biegeschwingungen einer unrunden, rotierenden Welle horizontaler Lage, von W. Kellenberger.
Ingénieur-Archiv Bd. 26, 1958, Nr. 4, p. 302—318.

[2] Recherches pour améliorer la résistance au vieillissement de l'isolation statorique des grands alternateurs, par K. Abegg, Ch. Caflisch et F. Knapp.
Rapport CIGRE 1958, No 129.

[3] Répercussions économiques sur le choix des paramètres électriques, par J. Chatelain.
Bull. SEV No 7, 1960, p. 347.

[4] Geschichtstafeln der Elektrotechnik 1881—1931.
Elektrotechnische Gesellschaft, Frankfurt a. M.