

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 79 (1953)
Heft: 11-12

Artikel: Les limites de la puissance des alternateurs entraînés par des turbines hydrauliques
Autor: Schneider, Jean
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-59781>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.03.2025

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

Les organes d'obturation sont constitués par des vannes sphériques à double siège, insérées dans la tubulure de liaison aux injecteurs.

5. Centrale de Reisseck (Autriche)

Cette centrale actuellement au début de sa construction sera équipée de trois turbines Pelton de 33 800 ch, sous une chute nette de 1765,3 m, dont deux sont actuellement commandées, entraînant chacune à 750 t/min un alternateur à axe horizontal de 25 000 kVA, triphasé 10 500 volts, 50 pér/sec.

Ce sera la centrale utilisant la plus haute chute du monde, puisqu'elle dépasse de quelque 25 mètres la chute de la Dixence qui détient ce record depuis plus de vingt ans.

Les groupes sont, là également, des groupes à deux paliers, disposés comme ceux de Salanfe, mais avec injecteur bifurqué. En effet, la dimension du diamètre d'entrée de l'injecteur n'est pas suffisante pour permettre la réalisation d'un injecteur rectiligne annulaire.

Pour la construction de la roue, le constructeur avait le choix entre la solution avec couronne d'aubes, disque et éclisse, utilisée à Portillon et Salanfe et la solution avec roue coulée d'une seule pièce (fig. 16). C'est cette dernière qui a prévalu; elle est en effet plus économique même si l'on fait intervenir dans la comparaison le prix d'une roue complète de rechange, alors qu'une couronne d'aubes suffit dans l'autre cas. Cette construction a été possible par le choix de la vitesse de rotation relativement élevée, ce qui réduit les dimensions et donc le poids de la roue, et par les progrès réalisés par les aciéries qui peuvent couler de telles roues, d'une pièce, en acier inoxydable. Les roues de Reisseck pèsent environ 4000 kg.

Les turbines seront alimentées par une conduite unique d'environ 4560 m de longueur et dont le diamètre passe de 1400 à 950 mm. Le collecteur sera semblable à celui de Dixence, mais avec trois dérives au lieu de cinq. Quant aux organes d'obturation, le maître de l'œuvre a examiné attentivement ce problème. Il pouvait en effet hésiter entre une solution avec organe obturateur unique, mais à double siège, par exemple vanne autoclave rectiligne et une solution avec deux organes obturateurs, l'un de service normal manœuvrable dans la règle en eau morte (vanne sphé-

rique), l'autre étant l'organe de sécurité, manœuvrable quelles que soient les circonstances sous la pleine pression (vanne coude autoclave).

C'est finalement cette dernière solution, qui a fait ses preuves depuis plus de vingt ans à Dixence, qui a été retenue.

Conclusions

Cette rapide description de ces cinq centrales, échelonnées de 1914 à nos jours, montre que, dans le domaine des turbines à très hautes chutes, les progrès réalisés ont permis :

- de passer d'une puissance par roue de 3000 ch à une puissance de près de 50 000 ch (Salanfe-Miéville);
- de passer d'une vitesse spécifique de 2,7 à 7,04 t/min, puis à 12,25, voire 14,7;
- d'abandonner la solution onéreuse d'une roue avec aubes individuelles, en acier matricé, pour la remplacer par la solution avec couronne en acier inoxydable, disque et éclisse; ou avec roue en acier inoxydable coulée d'une pièce lorsque les dimensions le permettent;
- de remplacer l'injecteur coudé par un injecteur bifurqué ou rectiligne annulaire, donc d'améliorer la qualité du jet et, partant, la tenue de l'aubage;
- d'introduire le réglage fréquence-puissance dans des centrales importantes jouant le rôle de « chef d'orchestre ».

En étudiant et en exécutant dans leurs ateliers les turbines Pelton à hautes chutes et leurs accessoires décrits dans les cinq installations susmentionnées, les constructeurs ont ainsi contribué utilement à l'essor des turbines hydrauliques.

Ceci a été possible d'une part grâce à une collaboration intelligente entre exploitants, constructeurs et métallurgistes et d'autre part grâce aux efforts déployés soit dans les bureaux d'études et les laboratoires d'essais, soit dans les ateliers où une main-d'œuvre de plus en plus spécialisée permet maintenant de réaliser des centrales puissantes, offrant des solutions techniques sûres et pratiques bien qu'elles aient pu paraître hardies au moment où elles ont été conçues et réalisées, comme ce fut le cas à Fully en 1914, puis à Dixence en 1932.

LES LIMITES DE LA PUISSANCE DES ALTERNATEURS ENTRAÎNÉS PAR DES TURBINES HYDRAULIQUES

par JEAN SCHNEIDER, ingénieur E. P. U. L.,
directeur du Bureau de Lausanne des Ateliers de Construction Oerlikon

Lorsqu'on compare la puissance unitaire des génératrices hydro-électriques du début du siècle à celle des plus grandes machines actuelles, on est frappé par l'accroissement énorme qui va de pair avec celui de la puissance installée. Citons à titre d'exemple l'usine de l'Albula de la ville de Zurich, équipée en 1907 de huit alternateurs horizontaux de 2500 kVA tournant à la

vitesse respectable, pour l'époque, de 600 t/min. Le poids total de ces alternateurs était de 210 tonnes, soit 10,5 kg/kVA et le rendement à pleine charge 92 %. L'usine fut reconstruite en 1945 et dotée de deux groupes verticaux de 14 000 kVA à 500 t/min. Malgré l'augmentation de puissance de 20 000 à 28 000 kVA, le poids total des alternateurs n'est plus que de

138 tonnes, soit 4,9 kg/kVA et le rendement à pleine charge a passé à 96,3 %. Un cas analogue est celui de l'usine de La Dernier, de la Compagnie vaudoise des Forces motrices des lacs de Joux et de l'Orbe, équipée en 1903 de cinq groupes de 900 kVA à 375 t/min, complétée au cours des ans jusqu'à totaliser neuf groupes et 14 400 kVA et reconstruite de 1944 à 1948 avec trois groupes de 10 000 kVA chacun.

Il est intéressant de chercher quelles sont les limites fixées, par les matériaux et les constructions actuels, à la puissance des alternateurs entraînés par des turbines hydrauliques.

Celles-ci se classent en trois groupes caractérisés par leurs vitesses spécifiques n_s . Ce sont :

- les turbines Pelton, à un ou plusieurs jets, dont le n_s va de 10 à 30, pour des chutes de 200 à 1500 m et plus. L'axe est en général horizontal et les roues sont souvent montées en porte-à-faux de part et d'autre de la génératrice ;
- les turbines Francis, à faibles, moyennes et grandes vitesses, dont le n_s va de 75 à 400, pour des chutes de 20 à 400 m. On rencontre aussi bien la disposition verticale que l'horizontale ;
- les turbines Kaplan avec aubes fixes ou mobiles, dont le n_s est supérieur à 400, pour des chutes de 2 à 50 m. L'axe est presque sans exception vertical. Les roues Kaplan à aubes orientables accusent des rendements élevés aux charges partielles, avantage qu'elles partagent avec les roues Pelton.

Pour les alternateurs à grandes vitesses, à pôles saillants, des usines à haute chute, les dimensions du rotor sont fixées par la puissance, la vitesse et par le moment d'inertie requis pour le réglage. Les vitesses périphériques admissibles à l'essai d'emballement sont données par l'attache des pièces polaires du rotor. Pour les grandes unités à faible nombre de pôles, on utilise la fixation à « peigne », qui permet des vitesses de 160 m/s à l'emballement. On se fera une idée des forces exercées sur l'attache des pôles par l'exemple d'un alternateur de 15 000 kVA, 6-pôles, 1000 t/min où cette force est de l'ordre de 2000 tonnes par pôle.

Dans ce genre de machines, le rotor est formé d'une série de disques en acier à haute résistance, entièrement usinés (fig. 1), assemblés en un bloc compact au moyen de tirants ajustés, posés à chaud. Les bouts d'arbre sont rapportés sur le rotor au moyen de fortes brides boulonnées. Les bobines d'excitation, imprégnées de compound et pressées à chaud, sont introduites sur les bras du rotor. Ceux-ci sont alors fermés par les pièces polaires, assurées à l'aide de clavettes rondes

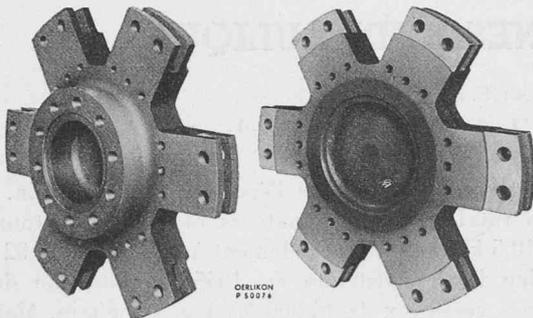


Fig. 1. — Disques élémentaires en acier coulé d'un rotor « à peigne » à six pôles.

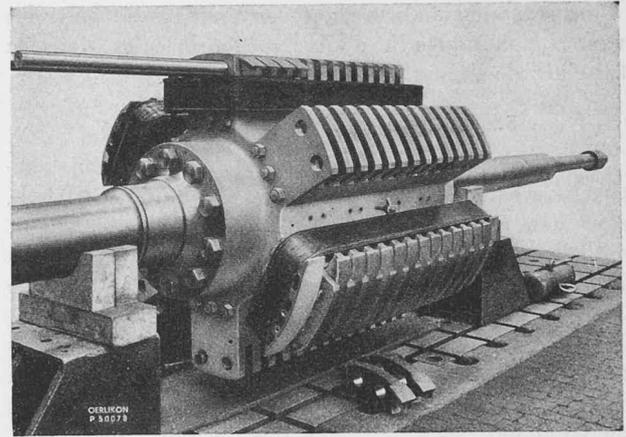


Fig. 2. — Rotor d'alternateur à peigne, en montage.

(fig. 2). Les efforts tangentiels sur les longs côtés des bobines sont pris par des cales en V, laissant circuler l'air pour le refroidissement des parties médianes du rotor et du stator. Pour augmenter la section de passage de l'air et du même coup réduire le poids des pôles et les contraintes mécaniques, il est avantageux d'exécuter les bobines polaires en deux couches de cuivre plat enroulé sur champ, écartées l'une de l'autre. Les têtes de bobines sont maintenues par des calottes en acier non magnétique. C'est cet élément qui limite actuellement la puissance réalisable de ce genre de machines (fig. 3).

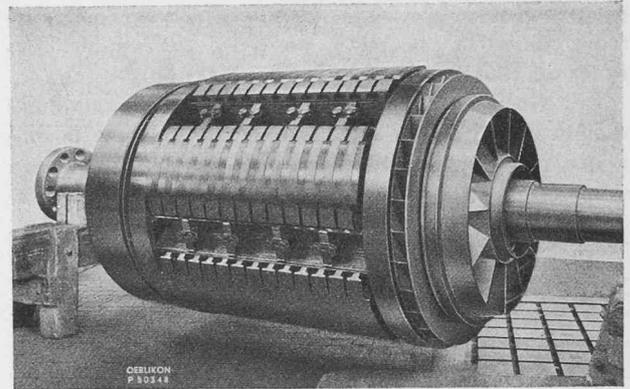


Fig. 3. — Rotor figure 2 terminé. Les extrémités des bobines polaires sont maintenues par des calottes.

Le tableau I indique pour différentes vitesses nominales et pour une vitesse d'emballement 1,8 fois supérieure, la puissance réalisable aujourd'hui avec cette construction. La dernière colonne du tableau indique les puissances considérées il y a un quart de siècle comme des maxima.

TABLEAU I
Alternateurs avec rotor à « peigne »

Nombre de pôles $f=50$ pér/s	Vitesse nominale t/min	Vitesse d'emballement t/min	Puissance maxima (en 1953) kVA	Puissance maxima (en 1926) kVA
4	1 500	2 700	10 000	2 500
6	1 000	1 800	48 000	6 000
8	750	1 350	84 000	13 000
10	600	1 080	111 000	20 000
12	500	900	147 000	30 000
14	428	700	150 000	40 000

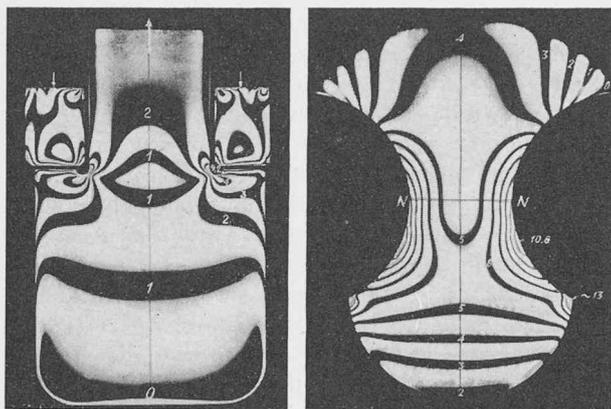


Fig. 4. — Répartition des tensions dans les griffes de fixation de pôles d'alternateurs.

Ces puissances sont déjà demandées dans certains cas par les hydrauliciens qui ne sont plus retenus que par des problèmes de cavitation.

Lorsque les efforts sur les pôles sont plus modérés, on utilise la fixation à « griffes ». Les pôles eux-mêmes sont en acier forgé ou en tôles d'acier empilées. Il importe d'éviter toute variation brusque de section aux attaches, soit sur le pôle, soit sur le moyeu. Comme le montre la figure 4, la répartition des tensions est meilleure dans la griffe circulaire, figure 5 A, que dans la griffe à faces parallèles, figure 5 B. Le diamètre du moyeu en une seule pièce du rotor est limité par le gabarit des chemins de fer à 4,2 m. La vitesse périphérique atteint 82 m/s en service et $82 \times 1,8 = 156$ m/s à l'emballement. Ce genre de construction permet de réaliser une puissance de 125 000 kVA environ à 500 t/min en service normal. La figure 6 représente une machine de ce type pour 40 000 kVA à 500 t/min.

Dans les usines à basse chute, les turbines sont presque exclusivement à axe vertical. L'alternateur possède dans la règle deux paliers de guidage. Le pivot qui doit supporter le poids des masses tournantes et la poussée de l'eau est logé généralement dans la poutre de guidage supérieure, construite suffisamment rigide à cet effet. Pour réduire la hauteur de levage du pont

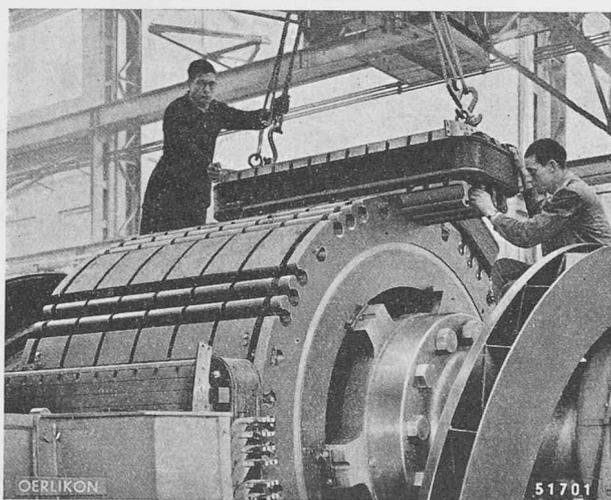


Fig. 6. — Alternateur 40 000 kVA, 500 t/min en montage.

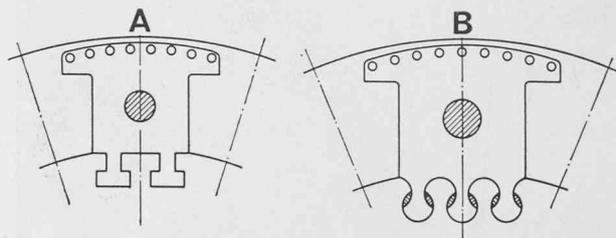


Fig. 5. — Griffes de fixation de pôles d'alternateurs.

A griffe à faces parallèles
B griffe circulaire

roulant, on tronçonne l'arbre et l'on monte le groupe par étages successifs, ce qui permet d'abaisser le plafond de l'usine et d'en réduire le coût surtout s'il s'agit d'une caverne. Dans le même but, on cherche à placer le pivot directement sur la bêche de la turbine, ce qui rend d'ailleurs l'alternateur très accessible. Il semble toutefois qu'au-dessus de 300 t/min on se heurte à d'insurmontables difficultés d'équilibrage mécanique et magnétique.

Les rotors des grands alternateurs à marche lente sont formés de plusieurs anneaux en acier à haute résistance d'une épaisseur de 200 mm environ, constitués eux-mêmes de segments démontables usinés sur toutes leurs surfaces. Les joints ont la forme d'escaliers et sont assemblés par des boulons ajustés très exactement (fig. 7). On commence à adopter chez nous la construction américaine de rotors formés d'anneaux en tôles de 3 à 4 mm d'épaisseur, dont les segments estampés sont assemblés également par des boulons ajustés. Les alternateurs de 28 000 kVA à 68 t/min en construction pour l'usine de Birsfelden sur le Rhin seront de ce type et les segments seront empilés en anneaux dans la centrale même. Les pôles sont fixés par des boulons passant entre les anneaux rotoriques (fig. 8). On peut dévisser les boulons de l'intérieur de la jante et, si nécessaire, démonter un pôle sans sortir le rotor. La vitesse périphérique admissible à l'emballement avec ce genre de fixation va jusqu'à 100 m/min.

La carcasse du stator est démontable pour le transport en deux ou plusieurs parties. Elle est en tôles soudées, de même que les poutres et croisillons. Soit

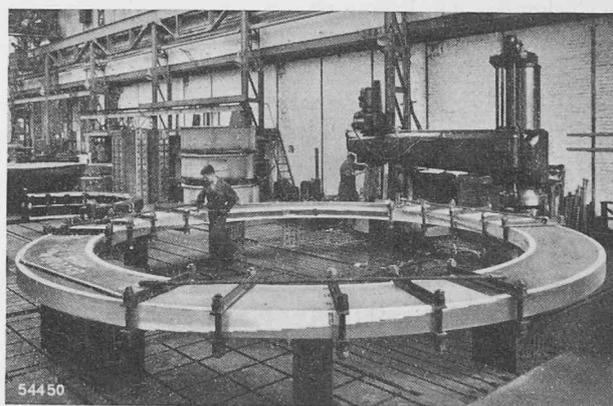


Fig. 7. — Anneau rotorique composé de segments assemblés en escalier.

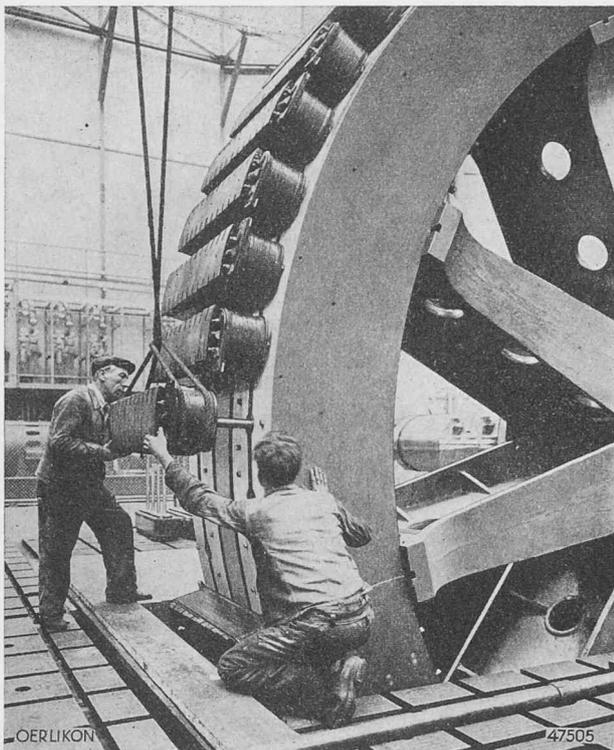


Fig. 8. — Montage d'un pôle fixé par boulons passant entre les anneaux rotoriques.

dit en passant, la soudure n'est utilisée qu'exceptionnellement pour les rotors et seulement là où les contraintes sont toujours de même sens. On attribue aujourd'hui une grande importance au serrage des tôles du circuit magnétique, qui doivent former un bloc compact, lié aussi rigide que possible à la carcasse.

Les enroulements des très grands alternateurs sont du type enchevêtré, à deux couches. Les barreaux, isolés de la masse par une gaine de micanite enroulée sans interruption, sont introduits complètement terminés dans les encoches ouvertes et soigneusement calés (figure 9). La combinaison du mica avec les résines synthétiques nouvelles permet d'espérer de nouveaux progrès dans l'isolation des enroulements statoriques.

Il est essentiel d'amener de l'air en quantité suffisante à toutes les parties de l'alternateur susceptibles de s'échauffer. On balaye donc séparément les têtes de bobines et on amène par les deux bouts du rotor un courant d'air qui est réparti uniformément sur toute la hauteur du circuit magnétique à l'aide des ailettes de ventilation situées entre les anneaux rotoriques. Les grands alternateurs sont de plus en plus refroidis en circuit fermé. Des réfrigérants d'air à circulation d'eau sont disposés sur le pourtour du stator, aux orifices de sortie d'air chaud. Ce système possède toute une série d'avantages : propreté des bobinages qui gardent leur isolement et leur capacité d'évacuer la chaleur,

absence de bruit et facilité de régler la température dans la salle des machines, possibilité de protéger l'alternateur contre l'incendie par un dispositif à CO_2 .

Le courant de la roue polaire est fourni par une excitatrice principale, excitée à son tour par une excitatrice pilote du type shunt à champ constant. On réalise ainsi un réglage stable, tant manuel qu'automatique. Les deux excitatrices sont normalement montées sur le même arbre que l'alternateur. Pour les machines lentes de grande puissance, ces excitatrices deviennent coûteuses et volumineuses, de sorte que l'on a tendance à revenir à des groupes d'excitation séparés, à grande vitesse. Toutefois, pour conserver les avantages des excitatrices en bout d'arbre, on alimente le moteur du groupe d'excitation à l'aide d'un alternateur auxiliaire avec excitatrice à aimant permanent, ces deux dernières machines étant montées sur l'arbre de l'alternateur principal. C'est le système adopté pour l'usine de Birsfelden mentionnée plus haut.

Les plus grandes génératrices à marche lente exécutées à ce jour sont, sauf erreur, les alternateurs de 108 000 kVA fournis par Westinghouse pour l'usine de Grand Coulee. La vitesse en est de 120 t/min en marche normale et 1,83 fois cette valeur à l'emballement. Il semble donc bien que dans le cas des alternateurs à moyennes et à faibles vitesses, les constructeurs de turbines aient le champ libre pour réaliser des machines aussi puissantes qu'ils le désirent, surtout si, comme les Américains, ils se contentent de vitesses d'emballement modérées.

Quant à savoir jusqu'à quel point les puissances maxima sont désirables, c'est ce que d'autres considérations, en particulier les besoins de l'exploitation et la nécessité de disposer d'une réserve doivent permettre de décider.

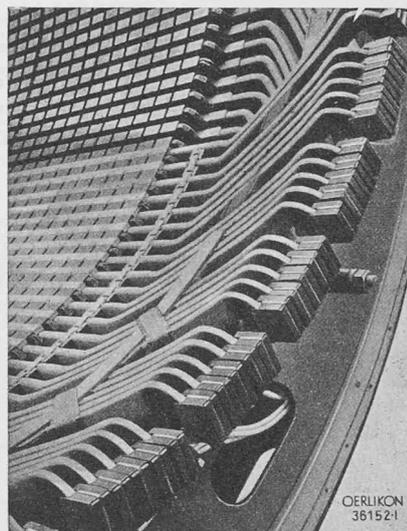


Fig. 9. — Enroulements enchevêtrés.