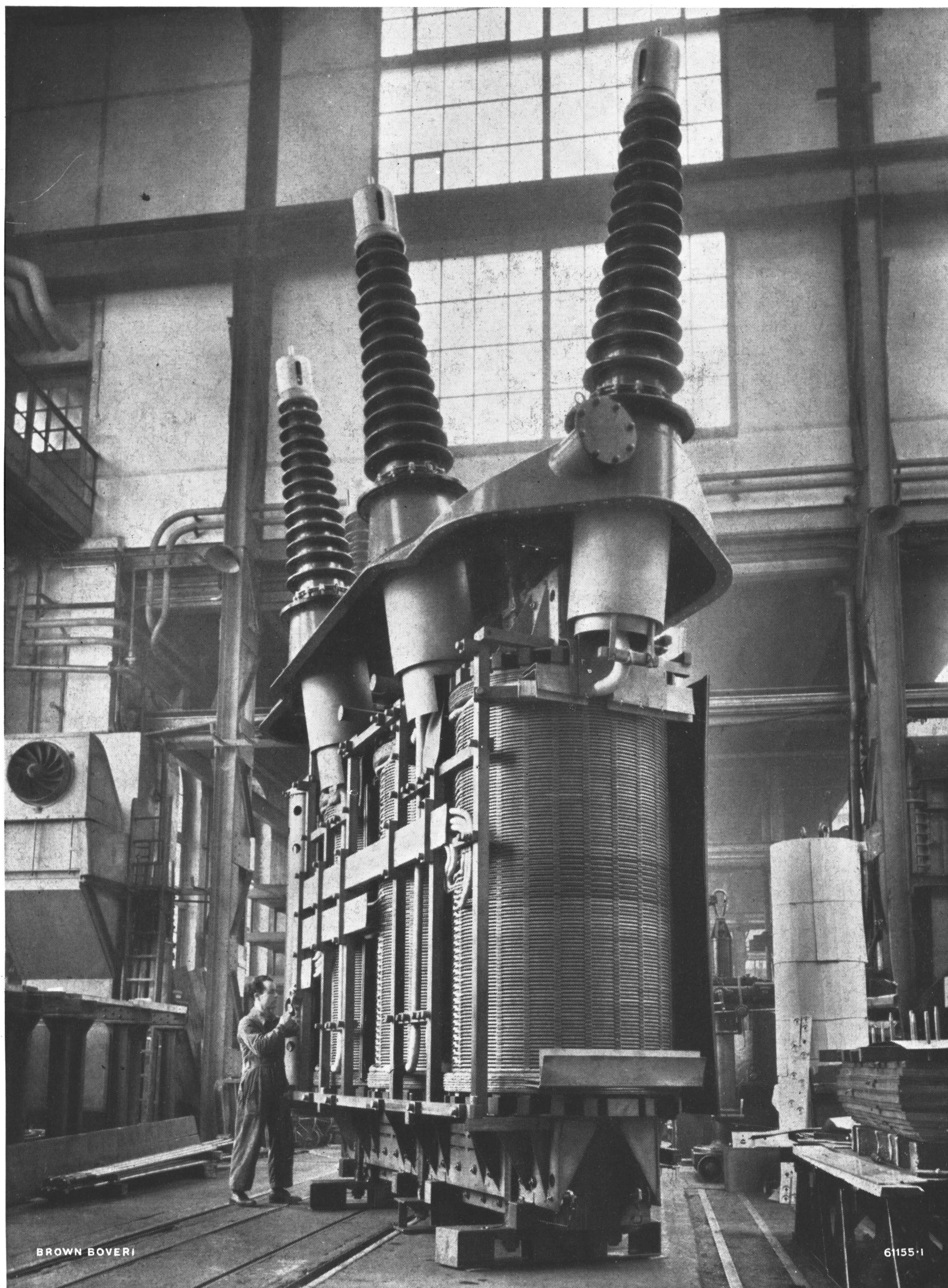


---

# REVUE BROWN BOVERI

---



**Un des deux transformateurs triphasés pour l'usine électrique de Lucendo.**

Ils sont exécutés pour montage à l'extérieur et la puissance unitaire est de 31 000 kVA.

(Voir description page 406)



# Les relais thermiques

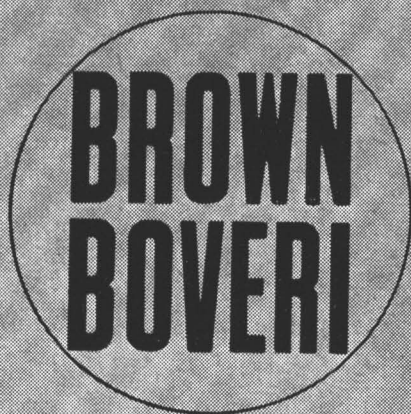
vous permettent d'utiliser au maximum et sans aucun risque de détérioration vos installations électriques. Ils suppriment tout danger pour l'isolation en signalant ou déclenchant à temps les surcharges inadmissibles.

Les génératrices d'un réseau, protégées par relais thermiques, peuvent être surchargées et assurer ainsi la continuité de service dans le cas de défaillance de l'une d'entre elles. Remplacez donc les relais ampèremétriques des génératrices par des relais thermiques.

Les transformateurs peuvent, dans certaines limites, supporter sans autre des surcharges. Les relais thermiques permettent toute surcharge admissible grâce à leur grande constante de temps adaptée à celle des transformateurs.

Les moteurs avec démarrage dur ou service intermittent ne peuvent être protégés correctement qu'avec des relais thermiques.

La longévité d'un câble est maximum lorsqu'il est surveillé par des relais thermiques.



**BROWN  
BOVERI**

Le bon renom de nos relais est le résultat d'efforts suivis, basés sur une longue expérience.



# REVUE BROWN BOVERI

PUBLIÉE PAR LA SOCIÉTÉ ANONYME BROWN, BOVERI & C<sup>IE</sup> A BADEN (SUISSE)

XXXI<sup>me</sup> ANNÉE

DÉCEMBRE 1944

N° 12

La Revue Brown Boveri paraît mensuellement. La reproduction d'articles ou d'illustrations est permise, à condition de citer leur provenance. Prix de l'abonnement annuel pour la Suisse Fr. 10.—, prix du fascicule pour la Suisse Fr. 1.—, port et emballage non compris.

## SOMMAIRE:

	Pages		Pages
De l'échauffement et de la ventilation des machines électriques	383	Le dixième anniversaire de la désignation « Mutateur »	402
La protection des alternateurs contre les défauts à la terre	392	Essai de survitesse fait avec succès sur une grande roue polaire	404
La suralimentation avec turbine à gaz d'échappement pour les moteurs Diesel des véhicules routiers	400	Transformateurs triphasés à huile pour l'usine électrique de Lucendro	406
Bref mais intéressant:		Un aubage à réaction est comme neuf après 18 ans de service	406
Transformateur portatif pour dégeler les conduites d'eau	402	Table des matières — année 1944	407
		Liste des illustrations hors texte — année 1944	408

## DE L'ÉCHAUFFEMENT ET DE LA VENTILATION DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Indice décimal 621.313.017.7

*Premièrement l'auteur expose quelques points essentiels pour évaluer les températures-limites des isolants ainsi que les méthodes employées jusqu'à ce jour pour mesurer les températures des grandes machines électriques. Ensuite l'auteur examine, sur la base de résultats d'essais, les obstacles qui empêchent de calculer exactement l'écoulement de la chaleur dans une machine électrique et il indique, par des exemples pris dans la pratique, quelques modes de refroidissement qui conviennent bien.*

*Les avaries qui surviennent aux machines doivent être imputés plutôt aux différences de températures et non aux températures élevées. En partant de cette constatation, on décrit les mesures prises pour augmenter la sécurité de service; celles-ci ont fait entièrement leurs preuves en pratique. Ensuite l'auteur remarque que la longévité des grands alternateurs a été surprenante.*

### *Anciennes règles et notions nouvelles.*

Les règles concernant les essais des machines électriques fixent d'une part les valeurs-limites de l'échauffement, admissibles pour les différentes classes des isolants, et d'autre part les valeurs-limites pour l'agent réfrigérant. La somme de ces deux valeurs donne la température-limite.

L'expression «valeurs-limites admissibles» peut faire supposer qu'il s'agit de températures au delà desquelles toute machine serait mise en danger ou même dans l'incapacité de fonctionner. D'après ce point de vue toute machine qui atteint ces températures maxima travaille aux limites fixées par les règles. On n'admet aucune tolérance de mesure et l'acheteur est en droit de refuser une machine qui dépasserait de peu de degrés ces limites ou d'exiger une pénalité excessive. Ce point de vue est encore renforcé par les règles anglaises qui recommandent d'admettre le rendement maximum à 80% de la puissance nominale, ce qui veut dire implicitement que la machine devrait travailler en général à la puissance qui correspond au meilleur rendement et non à la charge nominale correspondant aux valeurs-limites de température.

Dans la littérature technique on a aussi émis l'avis que les valeurs-limites indiquées par les règles sont trop élevées, tout spécialement pour les grands alternateurs. Par suite quelques usines électriques de premier plan prescrivent des températures plus basses, dans l'espoir, souvent mal fondé, d'obtenir ainsi une plus grande sécurité.

En examinant le comportement thermique d'un isolant on ne trouve pas une température-limite bien déterminée à laquelle une matière de ce genre puisse devenir subitement inutilisable, mais on relève, en augmentant la température, un changement plus ou moins rapide de ses propriétés physiques, ce qui a été exprimé par la notion de longévité.

Quand il faut utiliser en pratique des résultats d'essais exécutés sur des éprouvettes, on doit tenir compte qu'il n'y a que quelques types de machines qui marchent continuellement à pleine charge. De plus la température de l'agent réfrigérant reste en général bien inférieure à la limite fixée par les règles. Suivant les géographes, il n'existe sur la terre que peu d'endroits où la limite de 35° C, fixée par les règles allemandes, puisse durer longtemps.

Depuis que l'on utilise le système de refroidissement en circuit fermé, on a fortement mis à contribution la réserve contenue dans les températures de l'agent réfrigérant. En effet, on admet toujours pour l'air froid la température maximum admissible, afin que le dispositif réfrigérant soit le meilleur marché possible; cette température ne varie pas pendant d'assez longues périodes vu la grande stabilité de la température de l'eau. Cependant ce serait une erreur de principe que de laisser la capacité de charge d'un



groupe dépendre de dispositifs auxiliaires de dimensions trop justes. Ceci est valable surtout pour le réfrigérant, puisqu'en abaissant la température on réduit les pertes ohmiques, ce qui compense le supplément de prix d'un réfrigérant plus grand, en outre on augmente ainsi la longévité et la capacité de surcharge de l'alternateur.

Il est certainement plus grave d'avoir, dans un système réfrigérant à air libre, un refroidissement qui diminue par suite d'un encrassement que d'admettre les effets dus à une température de 10 à 15° C plus élevée pour l'air froid d'un système réfrigérant en circuit fermé. Une telle diminution de refroidissement est d'autant plus dangereuse qu'elle a lieu progressivement et par suite le personnel de service s'y habitue. On arrive donc à une forte différence entre les réactions produites d'une part par un suréchauffement pendant le service et d'autre part par un échauffement inférieur qui pourrait se produire pendant les essais de réception. Le suréchauffement dû à un encrassement et aux surcharges augmente parfois jusqu'à laisser douter que les valeurs-limites fixées dans les règles soient bien celles qui permettent de juger sur une base réelle le comportement thermique de la machine.

On peut expliquer *la longévité inattendue aux hauts échauffements* en examinant l'état des isolants des vieilles machines. Après une sollicitation excessive de longue durée, on relève que l'isolement du papier placé entre les tôles a encore des caractéristiques tout à fait satisfaisantes. Au point de vue chimique, le papier peut à peine être reconnu comme tel, mais ses résidus forment, avec le verre soluble employé pour le coller, un film adhérent et bien isolant, ce qui est suffisant. Les défenseurs de l'isolation au papier se basent sur ces résultats pratiques, pour attaquer l'isolation à la laque, qui est plus favorable par rapport au comportement thermique, mais désavantageuse sous d'autres rapports. La situation est la même pour les revêtements en mica des bobines du stator. Nous avons fabriqué dans nos usines des revêtements en micafolium et pour en accélérer le processus de vieillissement, elles ont été soumises pendant un certain temps à de très hautes températures. A la fin des essais, le papier constitué avec la matière bitumeuse servant de ciment une masse plastique, qui maintient en forme le mica, et il en résulte avec ce dernier un isolant de caractéristiques diélectriques qui donne entière satisfaction, même en cas de grandes déformations.

La conclusion, qui ressort de nos observations, est que *les températures-limites fixées par les règles résultent plutôt d'un système conventionnel que d'un système rigoureusement basé sur des lois physiques*. Par conséquent lorsqu'on parle d'un échauffement admissible, il faut entendre que c'est un échauffement conforme aux règles, mais ce n'est pas un échauffement qui est en concordance exacte avec le comportement thermique de la machine.

Il est bon de ne pas perdre de vue ces définitions sinon on pourrait s'imaginer qu'il s'agit de principes

techniques, quand en réalité il y a seulement lieu de décider si l'on doit satisfaire à une convention ou non. Ces accords avaient été conclus en admettant implicitement un certain degré d'évolution de la construction et de la technique des isolants, tel qu'il existait au temps où les commissions, qui rédigeaient ces règles, siégeaient.

En plus des conventions sur les températures-limites, il a fallu en conclure d'autres sur la façon de faire les mesures, car là aussi il n'existe aucune base absolue. Nous y trouvons d'abord une curieuse recommandation qui n'est généralement pas observée lors des essais, c'est-à-dire de ne pas prolonger l'essai jusqu'à ce que la température finale soit atteinte, mais de relever une courbe des échauffements et d'extrapoler les valeurs finales. L'erreur commise en extrapolant serait donc estimée être plus petite que celle résultant des variations de la charge et de la température de l'agent refroidissant ainsi que des bonds dus au réglage et d'autres phénomènes semblables. En fait, malgré des mesures faites avec le plus grand soin, il se produit parfois des perturbations qui peuvent provenir en partie de changements dans le circuit thermique.

Contrairement à cette recommandation mentionnée dans les règles, on poursuit toujours les essais jusqu'à la température finale. Quelle que soit la cause des bonds dans l'échauffement, ils sont mis sur le compte du fabricant de la machine, sans exception et sans aucune tolérance, car il faut admettre suivant cette interprétation que les valeurs des normes sont des valeurs-limites qui doivent toujours être respectées.

#### *Méthodes usuelles pour mesurer les températures.*

Il existe trois méthodes différentes pour mesurer les températures. La méthode *par résistance*, celle *par thermomètres* enfin la seule utilisée aujourd'hui pour les grandes machines soit celle *par couples thermoélectriques*.

Les couples thermoélectriques doivent être insérés entre les barres, quand l'enroulement a deux barres par encoche. Ils indiquent donc de très près la température moyenne du cuivre des barres avant et arrière. Par contre si on les insère entre la bobine et les tôles ou entre la bobine et la cale, la température qu'ils indiquent diffère fortement de celle existant réellement dans le cuivre. Pour pouvoir mettre les indications, qui sont différentes suivant le genre de montage du couple thermoélectrique, à un dénominateur commun, les règles stipulent des corrections qui cependant ne doivent être considérées que comme des indications très approximatives.

Les résultats des *mesures des échauffements des tôles à l'aide des couples thermoélectriques* ne sont pas bien meilleurs que ceux obtenus pour les enroulements. Cependant cette méthode est supérieure à celle des simples thermomètres, surtout si on oblige le constructeur, comme c'est souvent le cas, à percer un trou dans le sens des couches des tôles pour y loger un thermomètre.



C'est toujours avec une certaine appréhension que le constructeur voit des couples thermoélectriques insérés dans sa machine. Leur isolation contre les tôles est relativement faible, surtout s'ils sont placés au fond des encoches. S'il se produit, par suite de détériorations mécaniques à cette isolation ou de son vieillissement, un contact métallique entre tôles, il s'ensuit une brûlure car il suffit, pour provoquer cette avarie, d'un contact de quelques millimètres carrés entre tôles.

Pour connecter ces couples thermoélectriques, à la sortie des encoches qu'ils occupent, on est obligé de tolérer de fins fils dans un fort courant d'air, à côté de bobines qui doivent avoir le maximum de résistance mécanique et diélectrique. En Europe les raccordements des couples thermoélectriques aux instruments du tableau sont exécutés sans prendre aucune précaution de protection. Nous ne plaçons pas ces couples thermoélectriques à des endroits de tension élevée, mais sur les bobines tout près du point neutre; cependant en cas d'avarie, il n'est pas impossible d'avoir même à ces derniers endroits des tensions dangereuses.

Quand il s'agit de couples thermoélectriques montés provisoirement et sous une surveillance compétente, ils sont d'une utilité indéniable pendant les essais ou la réception. Par contre il est difficile de justifier de les laisser insérés dans la machine dans le but de pouvoir faire des contrôles. En effet il n'est plus possible de parler d'un contrôle quand il existe plusieurs milliers de dents statoriques qui sont thermiquement indépendantes les unes des autres et quand on ne relève que quelquefois par jour ou par mois la température que de deux ou trois dents. La situation n'est guère meilleure en ce qui concerne l'enroulement du stator, puisque sur une longueur totale des conducteurs d'environ 50 000 cm on a, quand tout va bien, environ 100 cm c'est-à-dire 2<sup>0</sup>/<sub>100</sub> sous contrôle.

En plus, *la fragilité mécanique des couples thermoélectriques* fait réfléchir et spécialement celle des fins éléments constituant la résistance dont un pourcentage relativement élevé devient défectueux après une période plus ou moins longue. Comme ils sont difficilement accessibles, il est presque impossible de les reviser ou de les remplacer.

Au début, on a cru que l'emploi des couples thermoélectriques était un moyen pour pouvoir faire débiter les alternateurs au maximum quand la charge varie. On espérait, par exemple, pouvoir pousser aussi fortement que possible la charge d'un alternateur, en partant de l'état froid, jusqu'à ce que l'échauffement maximum admissible fut atteint. Mais on a dû très rapidement abandonner cette conception surtout pour les grandes machines. En effet, on s'est aperçu que les phénomènes connexes aux variations répétées de la charge avaient une plus forte influence sur la longévité des machines que ceux résultant d'une charge constante, même quand les pointes des variations ne dépassent pas la charge nominale.

Puisque l'emploi de ces couples thermoélectriques n'a qu'incomplètement répondu à ce qu'on en attendait, nous espérons que ces organes étrangers insérés dans les alternateurs seront bientôt supplantés par nos relais thermiques.

#### *De l'écoulement de la chaleur dans les alternateurs.*

Vu la précarité des mesures décrites ci-dessus, on a raison d'examiner la valeur des méthodes pour calculer les échauffements. Les techniciens américains ont attaqué ce problème d'une façon très simplifiée. La partie la plus chaude d'un enroulement se trouve habituellement dans l'encoche et sa place peut être facilement prévue. Après avoir obtenu par des essais précis à l'endroit le plus chaud, sur des alternateurs terminés, la différence de température entre le cuivre et le fer, ils ont été amenés à la notion d'une conductibilité totale de l'isolant dite du type «tout compris». Bien entendu celle-ci n'est valable que pour une zone restreinte. Des essais de contrôle faits dans nos laboratoires de physique ont donné, d'une façon frappante, presque les mêmes valeurs pour nos constructions, que celles obtenues par les Américains.

On a essayé de remédier, en faisant des recherches exactes, à cet état de chose très peu scientifique, mais malgré d'immenses travaux, on n'est pas arrivé à sortir du domaine empirique. On est seulement arrivé, pour ainsi dire, à connaître les dangers qui peuvent surgir quand on quitte le terrain connu.

Si l'on voulait se servir des valeurs de la conductibilité relevées empiriquement sur une paroi de 4 à 5 mm d'épaisseur pour les appliquer à un isolant de 1 mm d'épaisseur, la proportionnalité basée sur la loi de l'écoulement de la chaleur ne serait pas confirmée en ce qui concerne la chute de température; en effet, il s'en faut de beaucoup que cette chute diminue dans les deux cas suivant le rapport des épaisseurs. Il est facile de se rendre compte qu'une des causes en est le film d'air dû au jeu nécessaire pour placer la bobine dans l'encoche.

Même quand il n'y a aucun jeu mesurable, on relève au passage d'une surface à l'autre, aussi quand ces surfaces ont été soigneusement polies, de fortes résistances, à moins d'avoir des pressions de contact extraordinairement élevées, mais qui ne sont pas réalisables en pratique. La résistance de passage est instable quand les pressions de contact sont faibles. Notre laboratoire de physique a pu réduire de moitié la chute de température sur une éprouvette de 1 mm d'épaisseur en augmentant la pression de 0 à 20 kg/cm<sup>2</sup>. En diminuant avec précaution la pression jusqu'à zéro, il a été possible de maintenir la chute de température à la moitié de sa valeur antérieure, mais à la moindre secousse elle doubla brusquement pour revenir à sa valeur primitive. Quand on remarque des perturbations dans les courbes d'échauffement d'une machine, celles-ci ne proviennent donc pas nécessairement d'influences extérieures.



Même les physiciens n'ont pas encore pu surmonter les difficultés dues aux résistances de passage. En Angleterre, le National Physical Laboratory a fait, en collaboration avec le National Research Association, des essais très poussés avec les instruments les plus différents sur plusieurs centaines d'éprouvettes.

Vu le comportement irrégulier de la conductibilité thermique sur des éprouvettes d'épaisseurs décroissantes, on a été amené à examiner minutieusement *les résistances de passage des surfaces en contact*. On a pu, en amalgamant ces surfaces, éluder seulement une partie des causes inexplicables. Même en employant de plus fortes pressions, on n'a pas pu fixer exactement la conductibilité thermique réelle, et pas même au point de vue du physicien. Les résultats mesurés ont varié entre eux jusqu'à 50 %.

Pour réduire la résistance de passage des matériaux lamellés, par exemple du micafolium, les Américains ont traité les surfaces de contact à la vaseline. Nous procédons de même pour les pièces lamellées en tôle, afin d'augmenter la conductibilité thermique perpendiculairement au plan des feuilles. En traitant les tôles isolées au papier au moyen d'une laque plastique, on peut tripler la conductibilité. Nous avons relevé, dans notre laboratoire, sur une pièce lamellée de 15 mm d'épaisseur, constituée par des tôles sans revêtement de 0,5 mm d'épaisseur, une conductibilité atteignant seulement  $\frac{1}{50}$  de celle d'une même pièce en fer massif. L'influence de la résistance de passage était si forte, qu'après avoir collé notre isolant habituel en papier, la conductibilité n'en a pas été notablement diminuée. Le facteur de remplissage rapporté à l'épaisseur totale des tôles sans revêtement ne varie également que de 1 à 2 % en employant pour les machines des pressions de 5 à 10 kg/cm<sup>2</sup>.

*L'influence des couches* peut déjà être discernée sur le mica brut, en effet la résistance au passage de la chaleur, mesurée perpendiculaire aux feuilles qui forment la structure lamelleuse du mica, est cinq fois plus grande que celle mesurée parallèlement aux feuilles. Pour des isolants préparés avec des feuilles de mica, le rapport de la résistance au passage de la chaleur, mesurée perpendiculairement aux couches, à celle mesurée parallèlement aux couches atteint jusqu'à 10:1.

Le tableau ci-dessous donne une comparaison des valeurs relevées dans deux cas, comme exemple concret; on peut remarquer combien l'effet d'un film d'air, entre l'isolant et le fer, peut être différent. On y compare une bobine de stator, isolée pour environ 11 000 V, tension composée, à une bobine de rotor isolée pour environ 220 V, tension d'excitation, exécution courante aujourd'hui pour les rotors des turbo-alternateurs.

#### *Influence des films d'air sur la chute de température entre cuivre et fer.*

Il est évident que *la conductibilité thermique est très sensible aux films d'air*. Par conséquent, il semble indiqué de s'efforcer avant tout *d'éliminer le film d'air*; en effet il existe toute une série de brevets relatifs à des procédés pour améliorer ou pour maintenir le contact au point de vue thermique. Cependant ils ont presque tous le même défaut c'est-à-dire d'être irréalisables. En plus ils ne tiennent pas assez compte que, le plus souvent, nous avons à faire à des matières plastiques qui s'échappent en coulant quand elles sont soumises à une pression permanente, même si cette pression n'est de loin pas aussi élevée que celle qui serait nécessaire pour maintenir une conductibilité thermique satisfaisante.

Nous avons déjà mentionné qu'il subsiste une résistance de passage même sans film mesurable, et elle peut atteindre la moitié de la résistance de passage calculée pour un isolant de 1 mm d'épaisseur, en supposant un cas idéal et avec des pressions qui pourraient être atteintes et admises en pratique.

Il ne faut pas attendre un résultat important de la suppression du film extérieur d'air d'une bobine de stator; si l'on voulait améliorer une telle bobine, on devrait d'abord s'attaquer à l'isolant. En choisissant pour le micafolium un agglomérant approprié et des feuilles de mica aussi fines et flexibles que possible, puis en comprimant soigneusement le tout, on peut diminuer ainsi la résistance thermique. Les pertes diélectriques sont réduites en proportion. Mais il y a des limites. Pour bien faire adhérer entre elles les différentes feuilles, il faut donner au « micafolium » une

	Stator	Rotor type turbo	Unités
Matière isolante . . . . .	Micafolium, feuilleté	Amiante bakérisée, homogène	
Résistance thermique spécifique . . . . .	150	150	° C/W cm
Surcroît dû à l'état feuilleté . . . . .	450 } = 600	— } = 150	
Épaisseur de l'isolant . . . . .	0,4	0,1	cm
Watts à évacuer par cm <sup>2</sup> de surface . . . . .	0,1	0,4	W/cm <sup>2</sup>
Chute de température dans l'isolant . . . . .	$600 \cdot 0,4 \cdot 0,1 = 24$	$150 \cdot 0,1 \cdot 0,4 = 6$	° C
Résistance thermique spécifique d'un film d'air externe . . . . .	4000	4000	° C/W cm
Chute de température dans un film d'air de 0,01 cm d'épaisseur . . . . .	$0,01 \cdot 0,1 \cdot 4000 = 4$	$0,01 \cdot 0,4 \cdot 4000 = 16$	° C
Chute totale de température . . . . .	= 28	= 22	° C



résistance suffisante à la traction afin qu'il puisse supporter le travail fait sur les machines qui servent à revêtir les bobines d'une gaine isolante. On ne peut pas y parvenir avec des feuilles trop minces ou, ce qui revient au même dans ce cas, lorsque la teneur en mica est trop élevée. C'est pour cette raison que le « micafolium », qui a la teneur en mica la plus élevée, ne permet pas d'obtenir les meilleurs résultats à la compression.

La diminution du film extérieur d'air dans le bobinage du rotor donne de meilleurs résultats. Il y a environ dix ans<sup>1)</sup>, nous avons éliminé, au moyen d'une isolation spéciale, les films d'air les plus apparents à l'intérieur et à l'extérieur des bobines; il s'ensuivit une importante réduction du nombre des heures de travail, une meilleure utilisation des matériaux et une plus grande sécurité de construction. Il faut encore mentionner un profit tout spécial que nous en avons tiré. En effet cela nous a amené à remplacer les rotors massifs par une construction faite en assemblant plusieurs pièces et de réaliser ainsi une idée qui nous préoccupait depuis plusieurs années. Comme les canaux de ventilation qui affaiblissaient la pièce n'étaient plus nécessaires, on a ainsi trouvé la place nécessaire pour un tirant.

#### Essais faits pour étudier la transmission de la chaleur.

Pour étudier le problème de l'échauffement des rotors des turbo-alternateurs, on a fait plusieurs séries d'essais sur des isolants, des bobines, des rotors au repos ou tournant librement; à part la conductibilité thermique entre surfaces de corps solides, on a attaqué aussi le problème de la transmission de la chaleur à l'air ambiant.

On pouvait évidemment espérer que les résultats obtenus sur des rotors tournant hors de leurs stators se rapprocheraient beaucoup de la réalité; mais comme on ne sait pas exactement quelle est la valeur de la température ambiante qu'il faut prendre comme point de départ, il n'est pas possible d'employer tels quels ces résultats lorsque ces rotors sont placés dans leurs stators. Le gradient de la température qui règne dans la couche d'air entraînée par le rotor en mouvement est très élevé (fig. 1). A première vue il semble raisonnable de prendre la température de l'air dans une couche dont la distance à la surface est égale à la moitié de l'entrefer. Pour nous libérer de toute incertitude, nous avons essayé de relever la température exacte de la surface à l'aide d'un pyromètre à radiation que nous avons construit nous-mêmes; mais au début sa sensibilité de mesure laissait à désirer.

On a rarement l'occasion de pouvoir mesurer les échauffements des grands rotors placés dans leurs stators car il n'est pas possible à la plate-forme d'essais d'atteindre les charges voulues. Elles ne se présentent qu'exceptionnellement dans une usine électrique, où

<sup>1)</sup> Voir Revue Brown Boveri n° 1 de 1936, p. 15.

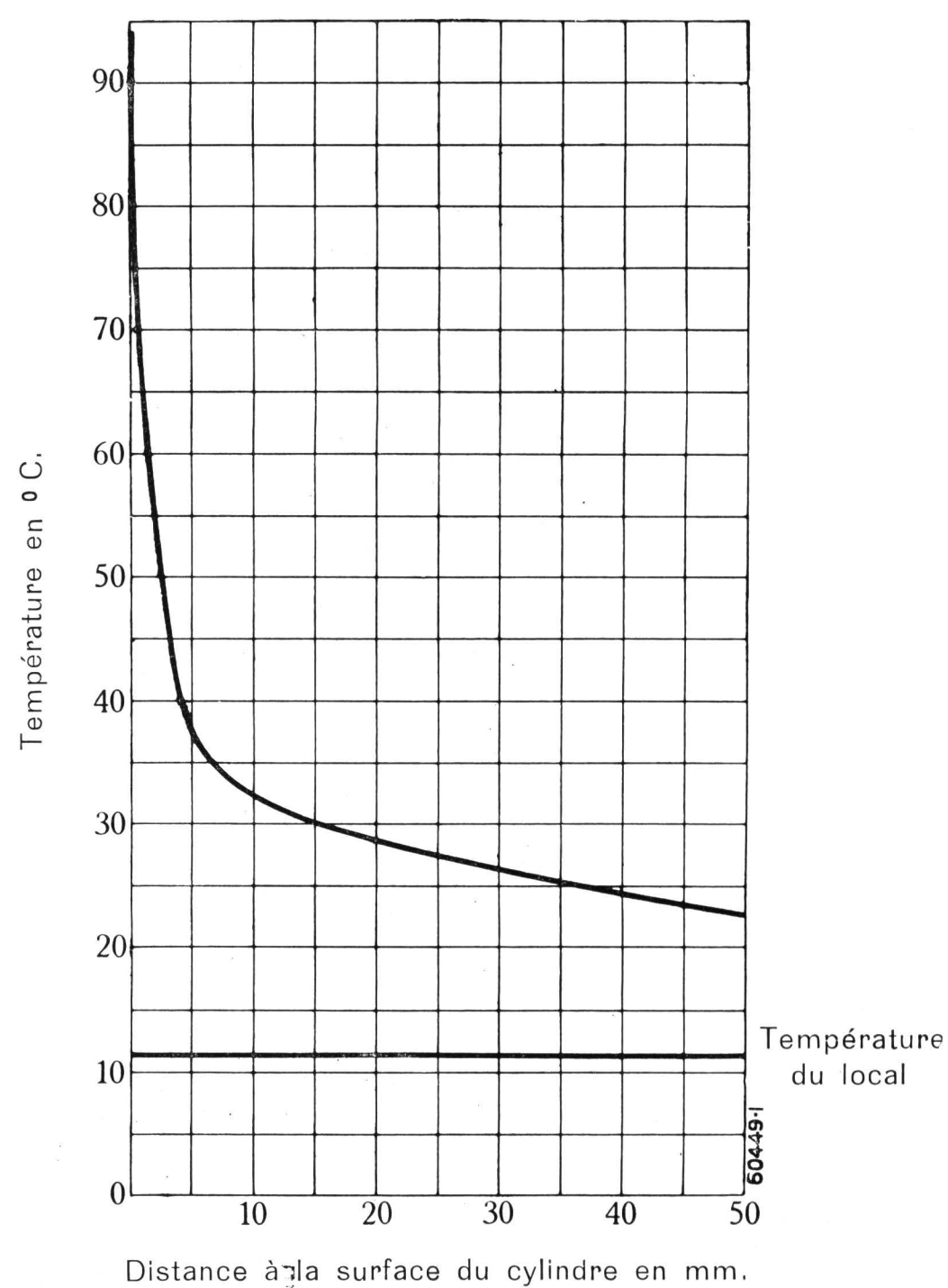


Fig. 1. — Courbe de la température près de la surface d'un cylindre tournant à 3000 t/min.

Température de la surface = 94°C. La température de la couche d'air entraînée par la rotation de la machine diffère beaucoup de la température du local, même jusqu'à une distance assez grande de la surface du cylindre.

du reste l'ingénieur qui fait les essais n'a pas la liberté nécessaire pour les mener d'une traite. Les conditions d'un essai à l'autre ne sont jamais les mêmes et les résultats peuvent être influencés par exemple par des variations dans la ventilation, des différences d'encoche, des pertes aux surfaces, des charges asymétriques, des influences d'usinage et des erreurs de mesure.

En conclusion de ces essais nous avons été amenés à perfectionner les méthodes, déjà très poussées, d'usinage des encoches, ce que nous avons pu faire en construisant des outils spéciaux. En plus de l'avantage d'avoir un échauffement plus régulier, on a obtenu un meilleur équilibrage, ce qui ne peut être assez apprécié, et par suite une marche plus régulière, même pour les machines les plus longues.

On se demandera, peut-être, quelle est la raison qui nous pousse à suivre avec un tel acharnement dans la voie épineuse dont le but est de faire passer la chaleur à travers l'isolant pour atteindre le fer, puis l'air réfrigérant. Dans les milieux des spécialistes on prône en général le refroidissement direct du cuivre, qui est considéré comme beaucoup plus efficace; un grand nombre de constructeurs croyaient que c'était une idée supérieure. Nous avons en 1910 et de nouveau en 1925 réalisé quelques exécutions de ce genre pour obtenir des résultats pratiques. Cependant, malgré des succès thermiques indiscutables, nous n'avons pas perdu de vue les



complications que l'on pouvait prévoir au cours du développement de ces machines. La construction de la figure 2, représentant le type du refroidissement direct par le cuivre, avait nécessité les plus grands sacrifices en travail et numéraire, consentis pour appliquer ce principe. Le refroidissement s'opère le long des deux flancs de la bobine, dans des conduits pratiqués dans les tôles des dents du rotor. Ce genre de refroidissement est excellent aux deux extrémités,

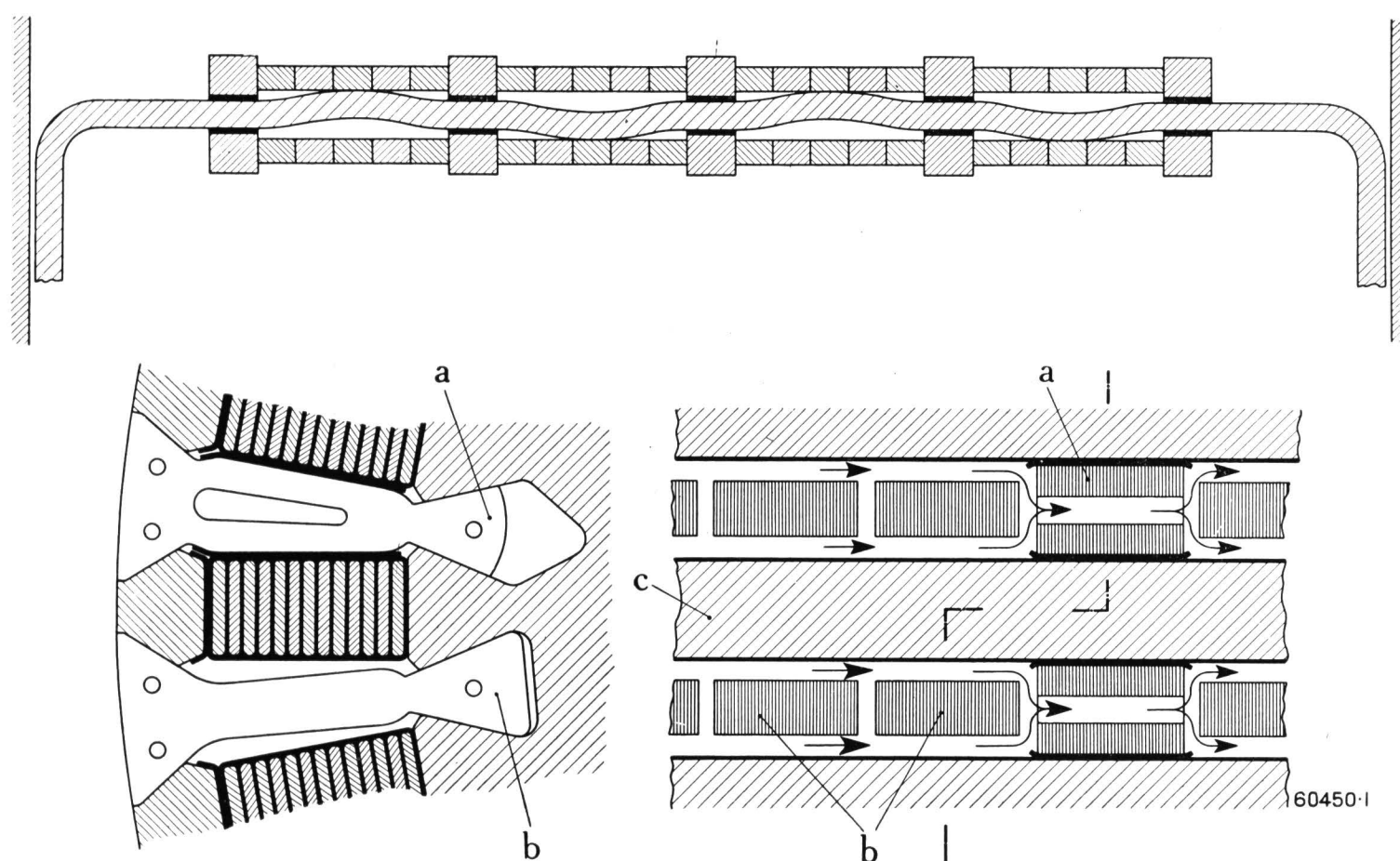


Fig. 2. — Représentation schématique d'un rotor avec refroidissement direct du cuivre.

En haut: Quand, contrairement à l'exécution des rotors Brown Boveri, le cuivre du rotor n'est pas guidé sur toute sa longueur par les parois de l'encoche, il se produit des renflements qui peuvent causer des mises à la masse.

En bas: Schéma du circuit de l'air dans les encoches.

a = Dent de fixation. p = Dent normale. c = Cuivre.

tout au moins tant qu'il ne survient aucun encrassement des surfaces des bobines ou une obstruction des étroits canaux d'air. Cependant il faut toujours envisager de tels inconvénients, même avec de l'air réfrigérant en circuit fermé, et qui peuvent se produire en peu de temps, quand, par exemple, on a oublié de fermer une porte ou une ouverture conduisant à un local poussiéreux. Lorsqu'il s'agit de machines de grande longueur, la section de l'entrée de l'air aux deux extrémités est trop juste, par suite l'air réfrigérant s'échauffe fortement dans la partie médiane. La température moyenne peut paraître encore acceptable, bien que quelques endroits soient surchauffés.

Le point faible de l'enroulement ne provient pas des dangers thermiques que risque l'isolant, mais il est de nature mécanique. Nous avons relevé dans les publications d'une société d'assurance pour machines un croquis (voir fig. 2 en haut) qui indique les déformations auxquelles sont soumises les bobines d'une telle construction. Par suite des forces centrifuges très fortes et aussi des bandages en fils sur les têtes des bobines, ces dernières ne peuvent pas suivre librement les allongements dus à la température. Il se produit dans la matière des renflements qui, même très petits pour chaque cycle d'échauffement, s'additionnent avec le temps et ils engendrent des déformations dangereuses. Les trop rares dents de fixation ne suffisent pas pour empêcher ces renflements du cuivre. C'est parmi

de tels phénomènes qu'il faut aujourd'hui rechercher la cause principale des avaries dues aux enroulements et non par suite de la carbonisation des isolants.

Les sections des bobines des rotors, construits comme indiqué à la figure 3 a, sont encore grandes et l'on peut admettre qu'elles résistent aux déformations. Par contre les enroulements du rotor de la figure 3 b, avec deux bobines par encoche, inspirent moins de confiance. Le canal d'air, entre ces deux étroites bobines, est très étroit et les risques de déformation, comme ceux d'encrassement, sont beaucoup plus grands.

Un autre exemple est donné par l'encoche de la figure 3 c qui a été publiée dans le numéro du jubilé de l'ÉTZ en 1936. Comme l'amenée d'air latérale n'a pas été estimée suffisante, elle a été complétée par de petits orifices percés dans les câbles fermant les encoches. Les bobines sont fraisées en forme de trapèze et leur usinage présente les mêmes difficultés que celui des encoches demi-fermées. Pour un grand rotor de ce type, il faut enlever, en fraisant dans la masse, 1000 kg de matière de plus que pour usiner un rotor Brown Boveri. En outre, les risques de déformation et d'encrassement sont aussi élevés que pour l'exécution suivant la figure 3 b; de plus, vu que la section des dents a dû être réduite pour avoir la place nécessaire aux canaux de ventilation, il s'en suit encore d'autres désavantages.

Parmi les problèmes concernant l'échauffement, *la transmission de la chaleur des surfaces à l'air en mouvement*

joue un rôle prépondérant, outre celui de la conductibilité thermique. Nous avons relevé dans la littérature technique des résultats d'essais, relatifs à cette question, qui concordent avec nos mesures. Nous avons jugé nécessaire de les contrôler pour vérifier si une partie de l'échauffement d'un rotor de turbo-alternateur n'était pas due à un écoulement insuffisant de la chaleur à la surface du rotor. En même temps, nous voulions nous faire une idée de la grandeur réelle de l'amélioration apportée en augmentant les surfaces au moyen de rainures, procédé très estimé de quelques-uns, et sur la forme à donner à ces rainures pour obtenir le maximum de refroidissement. Il n'a pas été possible de conduire ces essais qu'au point de vue de l'effet de refroidissement, parce que les rainures ont une influence sur les pertes de frottement et surtout sur les pertes par les courants de Foucault sur les surfaces, question encore discutée.

Nous avons relevé une diminution des pertes causées par les harmoniques à « courtes » ondes c'est-à-dire par les pulsations dues aux dents et une augmentation des pertes provoquées par les harmoniques à ondes « longues » dues aux enroulements, c'est-à-dire les 5



et 7 harmoniques. S'il n'y a pas de pertes supplémentaires, le dégagement de chaleur croît à peu près proportionnellement à l'augmentation de surface résultant des rainures. On a remarqué que la forme des rainures avait une influence insignifiante. On a constaté que la chute de température à la surface de nos rotors est assez faible par rapport à celle qui est causée par les résistances internes à la chaleur. Les travaux entrepris pour éliminer ces dernières sont

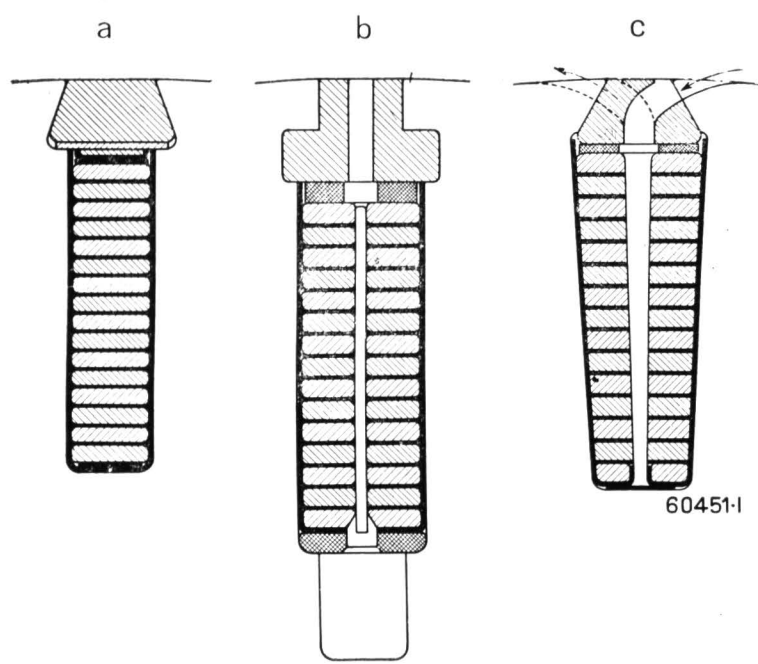


Fig. 3. — Coupes de bobines de rotors de différentes constructions.

- Transmission par conduction de la chaleur du cuivre à travers l'isolant jusqu'au fer et de là à l'air ambiant par la surface du rotor. Construction Brown Boveri.
- Refroidissement direct des bobines subdivisées par un canal d'air, qui est très étroit et qui sera donc facilement obstrué. Il peut aussi se produire des renflements du cuivre dans les conducteurs.
- Modèle avec encoches trapézoïdales et refroidissement direct du cuivre par l'air. On a prévu dans les cales des encoches de petits orifices pour renforcer la circulation d'air. Dans ce cas il est aussi possible d'avoir une obstruction des canaux d'air et des renflements du cuivre.

donc plus profitables que ceux faits pour exécuter les rainures.

On possède des résultats d'essais très poussés sur la *transmission de la chaleur à de l'air en mouvement dans des tubes*. Ils contiennent des écarts assez grands mais cela n'est pas d'une importance capitale, parce que nous avons à faire à des alternateurs dans lesquels les flux d'air ne sont pas soumis à des conditions bien réglées, mais absolument désordonnées. La vitesse de l'air varie de point en point de même que sa direction. Le constructeur doit résoudre les problèmes magnétiques, électriques et mécaniques avant qu'il puisse chercher à améliorer la ventilation et intervenir pour mettre le tout au point.

#### *Le volume d'air réfrigérant nécessaire*

est déterminé en fonction des pertes de l'alternateur et des valeurs expérimentales pour l'échauffement admissible de l'air. Les premières valeurs ont été relevées sur des turbo-alternateurs qui, dès le début, ont été des machines fermées dites types à ventilation forcée; comme le volume d'air pouvait être modifier relativement facilement, il était possible d'observer l'effet de ces variations. Pour ces alternateurs on admet, comme base, un échauffement de l'air d'environ  $25^{\circ}\text{C}$ , valeur trouvée empiriquement, qui est quelquefois adoptée à tort pour d'autres genres de machines.

En suivant par le calcul l'influence des variations du volume de l'air, par exemple sur l'échauffement du stator d'un turbo-alternateur, on s'aperçoit qu'il ne faut plus s'attendre, à partir d'une certaine limite, à ce qu'une augmentation du volume de l'air réfrigérant accroisse l'effet de refroidissement qui plutôt diminuera, vu qu'il se produit un surcroît d'échauffement dans le ventilateur.

Les conditions sont semblables lorsqu'on réduit les sections des canaux tout en maintenant le débit d'air, dans l'espoir d'augmenter l'effet de refroidissement en augmentant la vitesse de l'air; le surcroît préalable d'échauffement de l'air surpasse l'effet dû à l'augmentation de vitesse, quand le débit d'air dépasse une certaine limite.

Même avec des débits d'air choisis trop justes, on ne peut pas éviter que l'air des grandes machines s'échauffe dans un rapport disproportionné dans le ventilateur. En chiffre rond, un quart de l'échauffement disponible de  $25^{\circ}\text{C}$  est absorbé par le ventilateur; par suite l'air est déjà chaud avant d'arriver en contact avec les parties qu'il doit refroidir.

#### *La ventilation par aspiration est préférable à celle par refoulement.*

En aspirant l'air, au lieu de le refouler, on évite complètement son échauffement préalable et l'effet de refroidissement croît d'une manière continue quand le débit ou la vitesse de l'air augmente. Cet avantage a été obtenu pour les grands turbo-alternateurs en employant la *ventilation indépendante*; cette dernière permet d'obtenir une augmentation du rendement du ventilateur séparé de l'alternateur, une diminution de la longueur de l'alternateur, une simplification dans la construction et encore d'autres avantages.

Ce principe de ventilation par aspiration peut aussi être réalisé dans le cas des petits turbo-alternateurs de construction Brown Boveri pour autant qu'il soit encore possible de les exécuter avec un seul ventilateur axial, placé sur un côté du rotor. De même pour les machines à vitesse lente, de faible et moyenne puissance, la ventilation par aspiration d'air, au moyen d'un ventilateur placé sur un seul côté de la machine, est de plus en plus adoptée, parce qu'elle permet d'employer des ventilateurs d'un diamètre plus grand, sans que le démontage en soit rendu plus difficile. On obtient ainsi une forte ventilation dans les machines pour lesquelles il aurait fallu lutter, sans cela, avec des difficultés dues à un refroidissement insuffisant.

Grâce au plus grand diamètre du ventilateur, on a pu simplifier le corps des tôles en supprimant les canaux radiaux de ventilation bien qu'on croyait, au début, ne pouvoir s'en passer que pour les vitesses périphériques obtenues avec les turbo-alternateurs. Tout en améliorant la construction, on bénéficie d'une disposition plus claire des canaux axiaux de ventilation, en n'ayant plus que deux flux d'air parallèles, qui peuvent être réglés l'un par rapport à l'autre



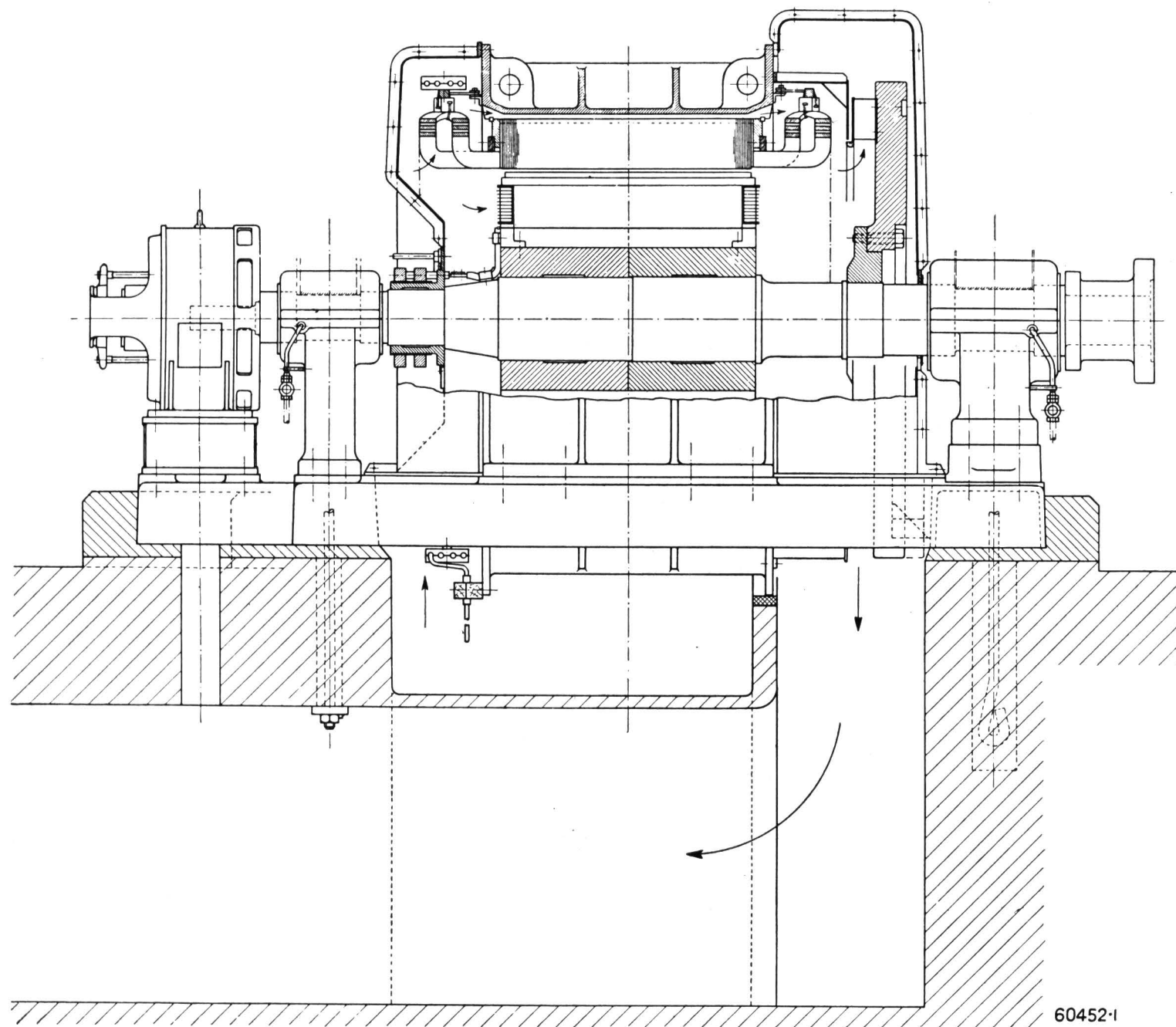


Fig. 4. — Coupe longitudinale d'un alternateur triphasé à arbre horizontal de 4500 kVA, 8000/8400 V, 750/1400 t/min, 50 pér/s avec amenée unilatérale de l'air.

Les tôles du stator ne sont traversées par aucun canal d'air et elles ne sont refroidies que par la surface intérieure et extérieure. Il en résulte les avantages suivants: La construction en est simplifiée, on obtient un circuit d'air bien disposé, tout en diminuant fortement les risques d'encrassement.

plus facilement que les nombreux canaux parcourus par de l'air à des vitesses différentes, surtout quand les vitesses sont faibles. Le risque d'encrassement est réduit, car l'air a une plus grande vitesse et il y a peu d'étranglement et de courbure; en tout cas il est beaucoup plus facile de les nettoyer (fig. 4 et 5).

Ce genre de refroidissement signifie, au fond, un retour au refroidissement axial en général assez délaissé. Les partisans de ce principe insistent sur la conductibilité des tôles dans le sens des couches, qui est bien meilleur que celle perpendiculaire aux couches des tôles. Bien entendu cela est vrai, mais ce n'est qu'à grands frais, en exécutant des canaux axiaux dans les tôles, que l'on a pu réaliser la surface nécessaire pour le refroidissement, tandis que cette surface a été obtenue beaucoup plus facilement et presque plus grande que nécessaire en employant le refroidissement radial.

Il y a par contre toute une série de machines électriques, dont les surfaces des périphéries extérieures et intérieures du stator peuvent à elles seules suffire au refroidissement, grâce à l'amélioration rationnelle de la ventilation qui rend superflu tout genre de canaux radiaux ou axiaux de ventilation, et dans ce cas le refroidissement axial est tout désigné.

*La diminution de température n'est pas une panacée.*

En général tout constructeur de machines électriques s'efforce de pousser la ventilation aussi loin que possible, tout en utilisant jusqu'à la limite les températures fixées dans les règles. C'est souvent parce qu'on exige d'avoir des isolants d'épaisseur démesurée, empêchant la chaleur d'être évacuée, qu'il ne nous est

pas possible de retirer le maximum, au point de vue thermique, des matériaux d'une machine électrique. Beaucoup d'exploitants nous obligent, en imposant des conditions encore plus sévères pour l'échauffement, à employer plus de matière, parce qu'ils croient augmenter de cette façon la sécurité de service. On nous remet des cahiers des charges qui prescrivent un échauffement maximum de 30° C seulement, quand il aurait été judicieux d'avoir 90° C.

Il est compréhensible que l'on cherche à obtenir une plus grande sécurité de service; une personne faisant partie de la direction d'un grand consortium évalue les pertes fixes à fr. 1.— par kW pour chaque interruption de fourniture d'énergie. Un de nos clients est obligé par contrat de verser pour chaque interruption de service, sans tenir compte de la durée, une pénalité d'un million de Pesos à l'administration municipale, ce qui ne l'empêche pas d'avoir des usines qui marchent avec une réserve absolument insuffisante. On évalue qu'un arrêt de courant d'une seule heure dans nos usines de Baden coûterait plusieurs dizaines de mille francs.

On n'est souvent pas certain de pouvoir s'assurer une plus grande sécurité en diminuant la température. Les avaries dues à des échauffements excessifs sont rares de nos jours. Il s'agit, dans la plupart des cas, de défauts mécaniques qui, par suite d'un examen trop superficiel, sont attribués à l'influence des températures élevées, tandis qu'en réalité ils sont causés avant tout par des différences de température entre les diverses parties de la machine sans qu'il soit nécessaire que les températures atteignent des valeurs élevées. Ils peuvent être évités, en général, par des mesures de construction et non en abaissant la température, ce qui prouve suffisamment que ces déductions sont exactes.



*Dilatations inégales par suite des différences de température.*

C'est avec les enroulements amortisseurs, le genre d'enroulement probablement le plus simple et le plus solide, qui ne comportent aucun isolant, que l'on a fait les premières expériences à ce sujet. Le courant dans ces barres est de diverses intensités et par suite aussi leurs échauffements et leurs dilatations. Quand les extrémités de ces barres étaient soudées rigidement à un anneau commun, leurs différentes dilatations suffisaient pour déchirer les soudures ou pour briser les barres. Ensuite on a raccordé élastiquement ces barres à l'anneau et ces avaries ne se sont plus produites. Les enroulements amortisseurs des turbo-alternateurs ont spécialement donné lieu à des difficultés, car les dilatations provenant en même temps que des forces centrifuges élevées engendrent, suivant les conditions de marche, des allongements ou des contractions importantes des barres d'amortissement placées entre les bobines et les cales des encoches. Nous avons aussi trouvé une solution au point de vue construction qui a permis de remédier à ces inconvénients <sup>1)</sup>.

Lorsque nous avons augmenté les longueurs des machines, les isolants des bobines travaillaient en formant des protubérances dans les canaux de ventilation. Nous en avons préservé les stators en prévoyant autour des bobines une couche protectrice métallique aux croisements des canaux, ce qui leur permet de glisser librement dans les encoches. Les canaux radiaux de ventilation dans les rotors type turbo sont supprimés. Ce remède est certainement plus efficace qu'une diminution de la température.

Les dilatations ont de plus néfastes conséquences dans les grands turbo-alternateurs. Nous avons déjà examiné ci-dessus l'un de ces effets. Mais il en existe de plus désagréables. Par exemple, il a paru dans la revue « Maschinenschaden », une vue d'un rotor à encoches parallèles; où une bobine était déchirée en deux dans toute sa section. Sous les calottes des rotors à encoches radiales, il arrive souvent que les têtes des bobines s'affaissent et on doit, pour certains rotors, pouvoir prévoir assez exactement à quelles dates ces affaissements périodiques se produiront. Nous nous sommes aperçus assez tôt de ce phénomène et nous avons pris des mesures de construction et de fabrication pour que nos rotors en soient préservés. Nous

<sup>1)</sup> Voir Revue Brown Boveri de 1941, p. 372.

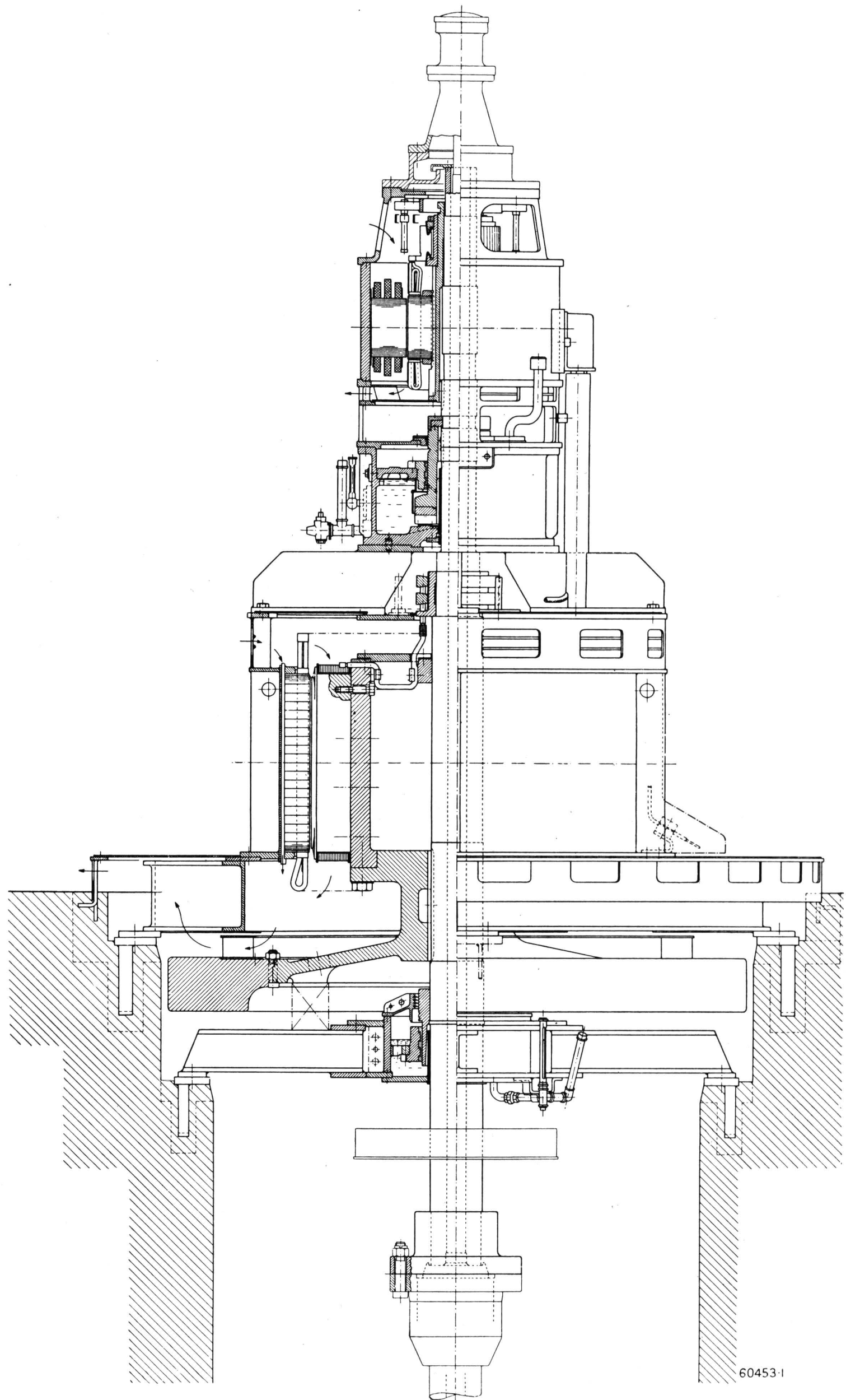


Fig. 5. — Alternateur triphasé à arbre vertical de 260 kVA, 520 V, 300/700 t/min, 50 pér/s.

Les tôles du stator n'ont, également ici, aucun canal d'air, elles ne sont refroidies que par la surface extérieure et intérieure. Le circuit d'air est bien disposé, le danger d'encrassement moindre et le nettoyage plus facile, telles sont les caractéristiques de ce genre de construction.

aurions considéré comme inefficace une réduction de la température de 5, 10 ou 20° C par rapport aux températures des règles.

C'est toujours la *sécurité de service* qui est restée le critérium incontesté et invariable pour apprécier la qualité d'un produit. Nous lui avons donc accordé, ici comme ailleurs, la priorité qu'elle mérite sur des avantages sensationnels dont le profit de plusieurs années devient souvent illusoire en cas d'une seule perturbation de service. Dès le début, nous avons jugé, du même point de vue, les efforts faits pour



résoudre le problème de l'échauffement et de la ventilation à l'aide de l'hydrogène. Le *refroidissement à l'hydrogène* n'offre pas d'avantages compensant les risques qu'il engendre pour la fréquence admise normalement en Europe et pour les puissances généralement envisagées. La situation existante chez nous au sujet des réserves ou plutôt du manque de réserves d'hydrogène nous incite aussi à la plus grande prudence dans son emploi.

#### *L'influence du rendement sur l'échauffement.*

On peut s'attendre à ce qu'une *estimation plus judicieuse du rendement des machines dans les calculs économiques* réagisse sur le problème de l'échauffement. Quand l'augmentation du rendement peut être réalisée en employant plus de matières premières, principalement du cuivre, il en résulte forcément un échauffement plus faible. On pourrait en suivant cette voie, surtout pour les machines multipolaires, étendre un sujet de discussions qui ne concernent plus l'échauffement, mais le rendement en tant que facteur-limite. Mais on ne peut pas toujours suivre cette voie. Par exemple pour les grands turbo-alternateurs l'accroissement des pertes de ventilation, en augmentant les dimensions, surtout le diamètre, est plus fort, suivant les circonstances, que la diminution des autres pertes, spécialement aux charges partielles.

Il est logique de prévoir une évolution vers une baisse de la température par suite d'une augmentation du rendement de la machine, en se basant sur différentes constatations. Entre autres, on cherche à augmenter le rendement des alternateurs entraînés par des turbines à vapeur pour parer à une élévation sensible du prix du charbon, celui des groupes hydrauliques parce que les chutes d'eau qui restent à équiper sont de moins en moins favorables et qu'elles nécessitent d'importants frais de premier établissement. En outre on ne compte plus autant sur des progrès extraordinaires, comme on le faisait auparavant quand on admettait qu'une installation serait démodée et usée après 10 à 15 ans de fonctionnement. En effet les machines ont montré une longévité beaucoup plus tenace et il est rare que l'on ait pu se décider, à l'époque prévue, à faire exécuter les travaux nécessaires pour moderniser une centrale.

Au lieu d'envisager, après 15 ans de marche, de remplacer les machines, on a le plus souvent examiné si l'on pouvait augmenter leur charge. Dernièrement un de nos turbo-alternateurs, qui a fonctionné 40 ans au Brésil, a dû être muni d'une nouvelle turbine, plus puissante et pour d'autres caractéristiques de vapeur; ce cas n'est pas unique et d'après notre expérience tout crédit plus large, consenti en vue d'obtenir un meilleur rendement, aurait été amorti, même souvent plusieurs fois, sauf de très rares exceptions.

(MS 582)

J. Prévost. (C.C.)

## LA PROTECTION DES ALTERNATEURS CONTRE LES DÉFAUTS A LA TERRE.

Indice décimal 621.316.92:621.313.322

*L'auteur démontre l'importance que la protection contre les défauts à la terre a pour les alternateurs et décrit un dispositif très simple pour protéger les groupes alternateurs-transformateurs contre ces défauts. Puis il examine un nouveau dispositif de protection sélective pour les alternateurs marchant en parallèle, qui n'exige que peu d'appareils et, contrairement aux autres systèmes, son fonctionnement est indépendant de l'étendue de la protection. Comme l'énergie nécessaire au fonctionnement sélectif de ce dispositif reste presque la même, quel que soit l'endroit du défaut à la terre, son fonctionnement est d'une sécurité exceptionnelle. La sensibilité de ce dispositif est telle qu'il décèle tout défaut à la terre dès que celui-ci peut être reconnu comme tel.*

Les progrès réalisés dans l'isolation des machines sont surtout importants du point de vue économique. Ils permettent d'augmenter la puissance grâce à la réduction de la place prise par les isolants dans les encoches, l'encombrement de la machine restant le même. Même si l'on utilisait un isolant d'une épaisseur plus forte que le minimum admissible, au détriment des qualités économiques optima de la machine, on ne pourrait pas supprimer complètement les risques de défauts d'isolation. Les isolants sont soumis à des sollicitations trop diverses pour pouvoir en trouver un qui puisse satisfaire chacune d'elles sans subir lui-même des répercussions. Par exemple un encrassement, une infiltration fortuite d'humidité, des surtensions d'origine atmosphérique, de même que les grandes sollicitations mécaniques dues aux

à-coups répétés du courant et les dilatations provoquées par les variations de température peuvent créer un état dangereux pour le matériel, qui est aussi sujet à un vieillissement inévitable.

La pratique montre que ce sont les défauts d'isolation qui causent le plus grand nombre d'avaries, tant aux nouveaux qu'aux anciens alternateurs. En particulier, lorsque ces défauts ont lieu dans des machines qui sont en service depuis des dizaines d'années sans aucune avarie, ils indiquent d'une façon caractéristique qu'il s'agit du vieillissement progressif des isolants.

Parmi les divers défauts d'isolation des grandes machines, comportant presque toujours deux barres par encoche, les contacts directs avec les tôles statoriques, produits à la suite de perforations d'isolants, sont les plus fréquents; un court-circuit entre les deux barres n'est guère possible, puisqu'elles sont séparées par deux couches d'isolant. Le plus souvent, un court-circuit entre deux barres, débute par une mise à la masse de l'une des barres, ce qui peut provoquer une combustion de l'isolant de l'autre barre. Quand plusieurs conducteurs sont placés dans un même tube isolant, un court-circuit entre deux conducteurs a, tout d'abord, un effet si faible qu'il est



à peine perceptible. Ce n'est que lorsque le défaut s'étend au tube isolant et cause une mise à la masse que la machine est réellement en danger.

Lors d'un unique défaut à la terre dans un réseau avec neutre isolé ou mis à la terre à l'aide d'une bobine d'extinction, seuls cas qui nous intéressent ici, il s'écoule à l'endroit du défaut soit le courant capacitif, lors d'un réseau galvaniquement relié à l'alternateur, soit le courant résiduel lors d'un réseau avec

avec exactitude. Par contre, il est moins facile de mettre au point un dispositif de protection ultrasensible et très sûr lorsqu'il est indispensable que son fonctionnement soit sélectif.

Ce sont ces deux genres fondamentaux de dispositifs de protection contre les défauts à la terre qui sont décrits ci-après.

### LA PROTECTION CONTRE LES DÉFAUTS A LA TERRE D'UN GROUPE ALTERNATEUR-TRANSFORMATEUR.

Dès qu'un défaut à la terre se produit sur un groupe alternateur-transformateur, c'est-à-dire sans disjoncteur ni dérivation sur les conducteurs qui les relie, il faut que ce groupe soit immédiatement coupé des barres, quel que soit l'endroit du défaut. Le dispositif de protection ne doit agir qu'à la naissance d'un défaut à la terre. Ce dernier est caractérisé par l'apparition d'une tension, à la fréquence de service, entre le point neutre et la terre, tension appelée « tension du point neutre ». On peut, par conséquent, employer comme « relais de terre », un relais dont le fonctionnement dépend de cette tension. La figure 1

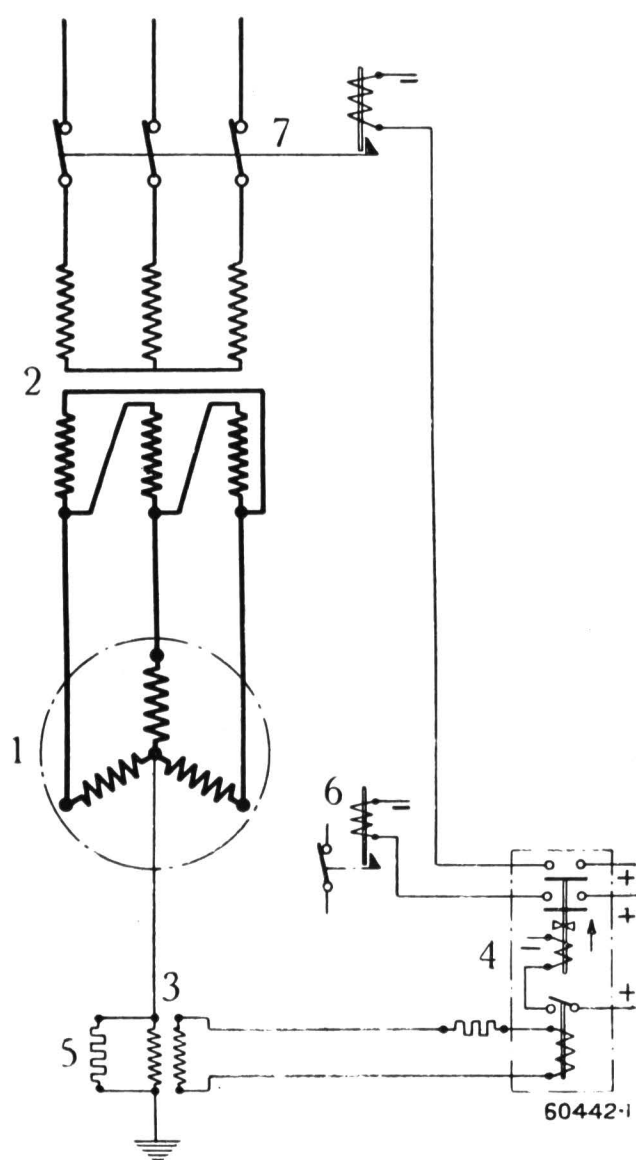


Fig. 1. — Protection d'un groupe alternateur-transformateur contre les défauts à la terre.

Ce dispositif simple protège, suivant le genre des relais employés, 90 ou 95 % des enroulements.

- 1 = Alternateur.
- 2 = Transformateur.
- 3 = Transformateur de tension monophasé type normal.
- 4 = Relais de terre avec contacteur auxiliaire.
- 5 = Résistance.
- 6 = Interrupteur de désexcitation.
- 7 = Disjoncteur.

Protection contre défauts à la terre.

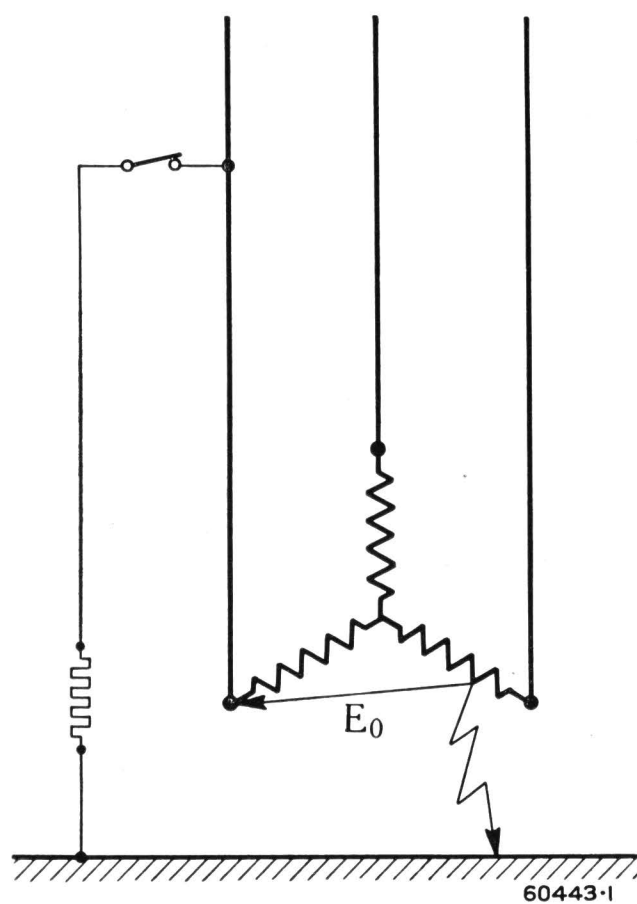


Fig. 2. — Principe de la formation du courant de terre dans la nouvelle protection sélective contre les défauts à la terre des alternateurs marchant en parallèle.

Bien que cette protection ne comporte aucun dispositif pour limiter le courant de terre, celui-ci ne peut varier au maximum que dans le rapport de 1 à 1,73 quel que soit l'endroit du défaut.

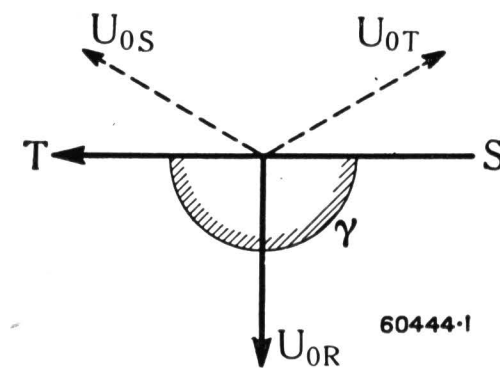


Fig. 3. — Diagramme vectoriel d'un des relais wattmétriques du « surveilleur de terre » tripolaire lors d'un défaut à la terre.

S-T désigne la direction de la tension appliquée au relais ;  $U_{0R}$ ,  $U_{0S}$  et  $U_{0T}$  les tensions au point neutre lors de défauts à la terre dans les phases respectives. Seul  $U_{0R}$  peut actionner le relais, qui indique la phase R avariée.

bobine d'extinction. Quand ces courants sont rapidement coupés, ils ne peuvent causer aucune détérioration importante, même s'ils atteignent quelques dizaines d'ampères. Par conséquent, une protection très rapide et ultra-sensible contre les défauts à la terre est d'une importance exceptionnelle pour les alternateurs. Elle permet de limiter les effets de ces défauts, les plus fréquents, à des détériorations locales de l'isolant. Elle les empêche ainsi de dégénérer en courts-circuits redoutables, ce qui évite aussi des brûlures aux tôles du stator, dégâts qui, souvent, obligent à refaire complètement la partie active de la machine.

Par suite du haut degré de perfectionnement atteint actuellement dans la technique des relais, il est aisé d'exécuter des dispositifs de protection contre les défauts à la terre dont le fonctionnement soit parfait, quand l'endroit du défaut ne doit pas être déterminé

montre schématiquement un dispositif de ce genre. Le relais de terre 4 (voir aussi la figure 6) raccordé au transformateur de tension 3 provoque, en cas de défaut à la terre, le déclenchement du disjoncteur du groupe et la désexcitation de l'alternateur. Il est muni d'un relais auxiliaire possédant plusieurs contacts très robustes.

Lors d'un défaut à la terre sur la haute tension du transformateur, il se produit un courant de terre s'écoulant de l'endroit du défaut vers le point neutre de l'alternateur, en passant par les capacités des enroulements du transformateur. Son intensité dépend principalement de ces capacités et de la valeur de la haute tension. Afin que le relais de terre ne fonctionne pas dans un tel cas, on a placé une résistance 5 en parallèle avec le transformateur de tension du point neutre. Cette résistance est calculée pour que la chute de tension due au courant



de terre n'atteigne pas la valeur à laquelle le relais fonctionne. Cette résistance rend aussi superflu l'emploi de tout moyen spécial qu'il serait, sans elle, nécessaire de prévoir pour empêcher la troisième harmonique des tensions simples de s'approcher du relais de terre, car elle peut produire dans certains cas un courant assez fort qui s'écoule à la terre par les capacités des enroulements de l'alternateur et des parties du réseau reliées au groupe en question.

L'intensité du courant engendré à l'endroit du défaut dépend surtout de la valeur de cette résistance, le courant capacitif du groupe étant toujours très petit. Plus la haute tension et la sensibilité du relais de terre sont élevées, plus on doit admettre une faible valeur pour la résistance. En pratique, la grandeur de la composante homopolaire de ces courants de terre varie de quelques dixièmes d'ampère à quelques ampères.

Le déclenchement instantané du groupe par le dispositif de protection, en cas de défaut à la terre, est toujours à recommander, car il permet de limiter les dégâts. Cependant on renonce parfois, lorsque les courants de terre sont très faibles, à provoquer l'ouverture instantanée du disjoncteur afin de gagner du temps pour pouvoir mettre en service un groupe de secours.

Ce dispositif, bien qu'il soit des plus simples, protège 90 ou 95 % des enroulements. Les 5 ou 10 % de l'enroulement, à partir du point neutre de l'alternateur, qui ne sont pas protégés, constituent une zone dans laquelle la sollicitation due à la tension est à peu près nulle, en service normal. Cette zone pourrait être mise en danger tout au plus par des ondes de surtension, spécialement lorsqu'elles seraient réfléchies au point neutre. Mais le couplage habituel en triangle étoile du transformateur empêche pratiquement que ces ondes n'atteignent l'alternateur; même avec un couplage étoile-étoile, le front raide de ces ondes et leur réflexion seraient fortement atténués. Par conséquent, il est à peine justifié de compliquer ce dispositif pour chercher à étendre encore son domaine de protection. Il faudrait, pour y parvenir, appliquer une tension additionnelle mettant en permanence le point neutre à un potentiel plus élevé que celui du sol, afin de l'inclure dans le domaine de la protection.

Ce dispositif de protection, très simple, contre les défauts à la terre peut parfois être utilisé même lorsqu'il existe une dérivation peu importante entre l'alternateur et le transformateur. En cas de défaut à la terre, le relais coupe instantanément cette dérivation, tandis que le groupe n'est coupé des barres qu'après un léger retard; il peut ainsi rester en service si le défaut se trouve sur la dérivation.

#### LA PROTECTION CONTRE LES DÉFAUTS A LA TERRE DES ALTERNATEURS TRAVAILLANT EN PARALLÈLE.

Une protection contre les défauts à la terre des enroulements statoriques d'alternateurs travaillant en parallèle ne peut être efficace que si elle est sélec-

tive. Elle ne doit mettre hors service que la machine touchée par un défaut. Il existe déjà toute une série de systèmes qui donnent la sélectivité voulue en assurant le fonctionnement de la protection lors d'un défaut à n'importe quel endroit et qui sont efficaces pour la plus grande partie possible des enroulements de l'alternateur. Pour tous ces systèmes, l'appareillage nécessaire augmente dans de grandes proportions à mesure que l'on veut étendre le domaine de la protection.

En effet, les phénomènes résultant d'un défaut à la terre sont très différents suivant l'endroit du défaut par rapport au point neutre. Si le défaut à la terre est au point neutre, qui est pratiquement au potentiel du sol, il ne se produit aucun symptôme qui puisse mettre en action un dispositif de protection; de même au voisinage immédiat du point neutre, ces symptômes sont excessivement faibles et à peine perceptibles. Cependant, pour qu'un dispositif de protection soit capable de repérer l'endroit du défaut il est nécessaire de prévoir un courant de terre qui soit mesurable avec certitude, car ce n'est qu'au moyen d'une telle mesure que l'endroit du défaut peut être repéré.

Pour que la protection des alternateurs puisse fonctionner, il est indispensable de faire passer un courant de terre, le plus souvent un courant watté, dans les conducteurs de raccordement de l'alternateur. Il faut pouvoir le discriminer du courant de service. On le fait de préférence à l'aide d'un transformateur de courant dont le circuit magnétique entoure les conducteurs des trois phases d'un câble; ainsi, c'est seulement le courant de terre qui agit sur le dispositif de protection. Mais si, comme c'est le plus souvent le cas, on emploie trois transformateurs de courant séparés, couplés de manière à obtenir la résultante des courants des trois phases, soit la « composante homopolaire », les inégalités inévitables entre ces transformateurs de courant, même les plus minimes, prennent une grande importance. Par conséquent, une protection contre les défauts à la terre doit être conçue pour que le courant de terre atteigne au moins quelques ampères dans les cas les plus défavorables. Quand il n'y a pas de dispositif limitant l'accroissement de l'intensité, le courant de terre augmente proportionnellement à la distance entre l'endroit du défaut à la terre et le point neutre de l'alternateur. Par exemple, un courant de terre de 3 A, engendré par un défaut situé à une distance de 10 % de la longueur de l'enroulement à partir du point neutre, s'élèverait à 30 A si ce défaut était aux bornes de la machine.

Le rôle principal de ce dispositif de protection est de limiter l'accroissement du courant à quelques ampères en employant des moyens appropriés et d'éviter avant tout des brûlures aux tôles du stator, car leur remplacement constitue toujours une réparation excessivement difficile et nécessite une longue mise hors service de la machine. On comprend que plus on veut étendre le domaine d'une protection de ce genre, plus on doit prévoir d'appareils et plus les dispositifs nécessaires sont difficiles à réaliser.



En fait, les systèmes employés jusqu'à maintenant ne protègent qu'au plus 90 % des enroulements. Il serait pourtant possible d'étendre l'efficacité de la protection à tout l'enroulement en appliquant une tension additionnelle permanente entre le point neutre et la terre, mais il est rarement admissible d'avoir de tels déplacements du point neutre, déplacements pouvant atteindre 15 à 20 %, vu leurs réactions sur le réseau.

UN NOUVEAU DISPOSITIF DE PROTECTION DES ALTERNATEURS CONTRE LES DÉFAUTS A LA TERRE.

Brown Boveri a mis au point une nouvelle protection contre les défauts à la terre des alternateurs, grâce à laquelle le problème de la limitation du courant

de terre ne se pose plus. L'appareillage nécessaire à ce nouveau dispositif est réduit au minimum et il est indépendant de l'étendue de la protection. Sa sécurité de service est remarquable car on dispose toujours de la même quantité d'énergie pour éliminer sélectivement le défaut, quel que soit l'endroit où il se trouve. La zone d'action de la protection s'étend jusqu'au point où il n'est plus possible de déceler l'existence d'un défaut à la terre.

Cette protection est basée sur un nouveau couplage du circuit de terre. On n'emploie plus la tension du point neutre par rapport à la terre, tension extrêmement variable, pour exciter le circuit de terre, mais une tension prise entre les phases. Cela se fait en principe suivant le schéma de la figure 2. Dès qu'apparaît un défaut à la terre, l'une des phases saines est mise à la terre par une résistance, par

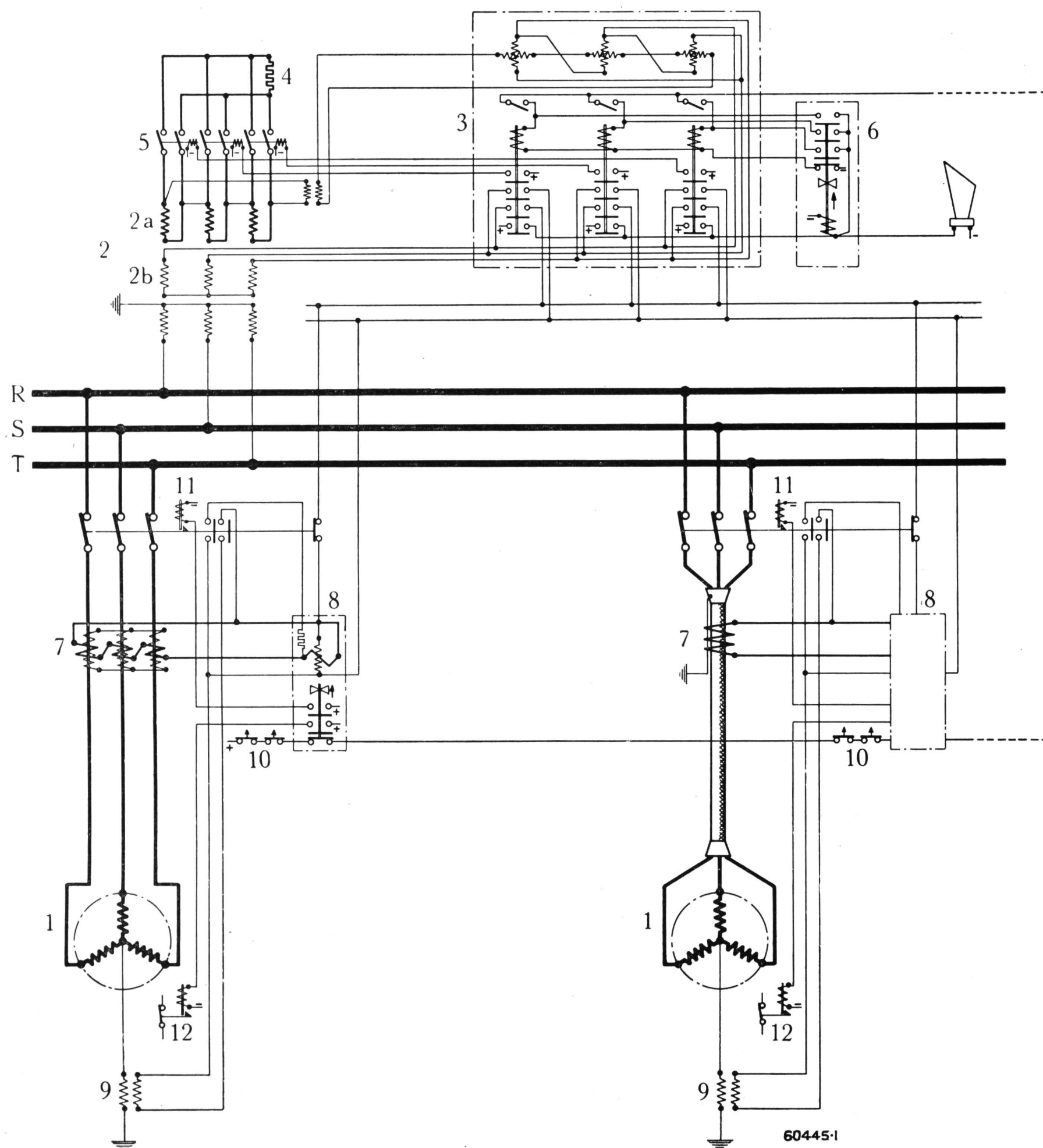


Fig. 4. — Schéma de principe de la nouvelle protection sélective contre les défauts à la terre des alternateurs marchant en parallèle, la protection atteint 99 % de la longueur des enroulements.

Le principe employé procure une grande sécurité de fonctionnement. L'appareillage nécessaire et le prix de cette protection sont relativement minimes (voir figure 5).

- 1 = Alternateur.
- 2 = Transformateur de terre avec deux enroulements secondaires.
- 3 = « Surveilleur de terre » qui détecte les défauts à la terre et forme le circuit du courant de terre suivant le principe de la figure 2.
- 4 = Résistance de terre.
- 5 = Contacteurs de terre.
- 6 = Relais temporisé pour interrompre le circuit du courant de terre.
- 7 = Transformateur de courant homopolaire.
- 8 = Relais de terre.
- 9 = Transformateur de tension monophasé normal pour la protection contre défauts à la terre quand le disjoncteur est ouvert.
- 10 = Contact de blocage sur le relais de la protection à maximum de courant.
- 11 = Disjoncteur de l'alternateur.
- 12 = Interrupteur de désexcitation.



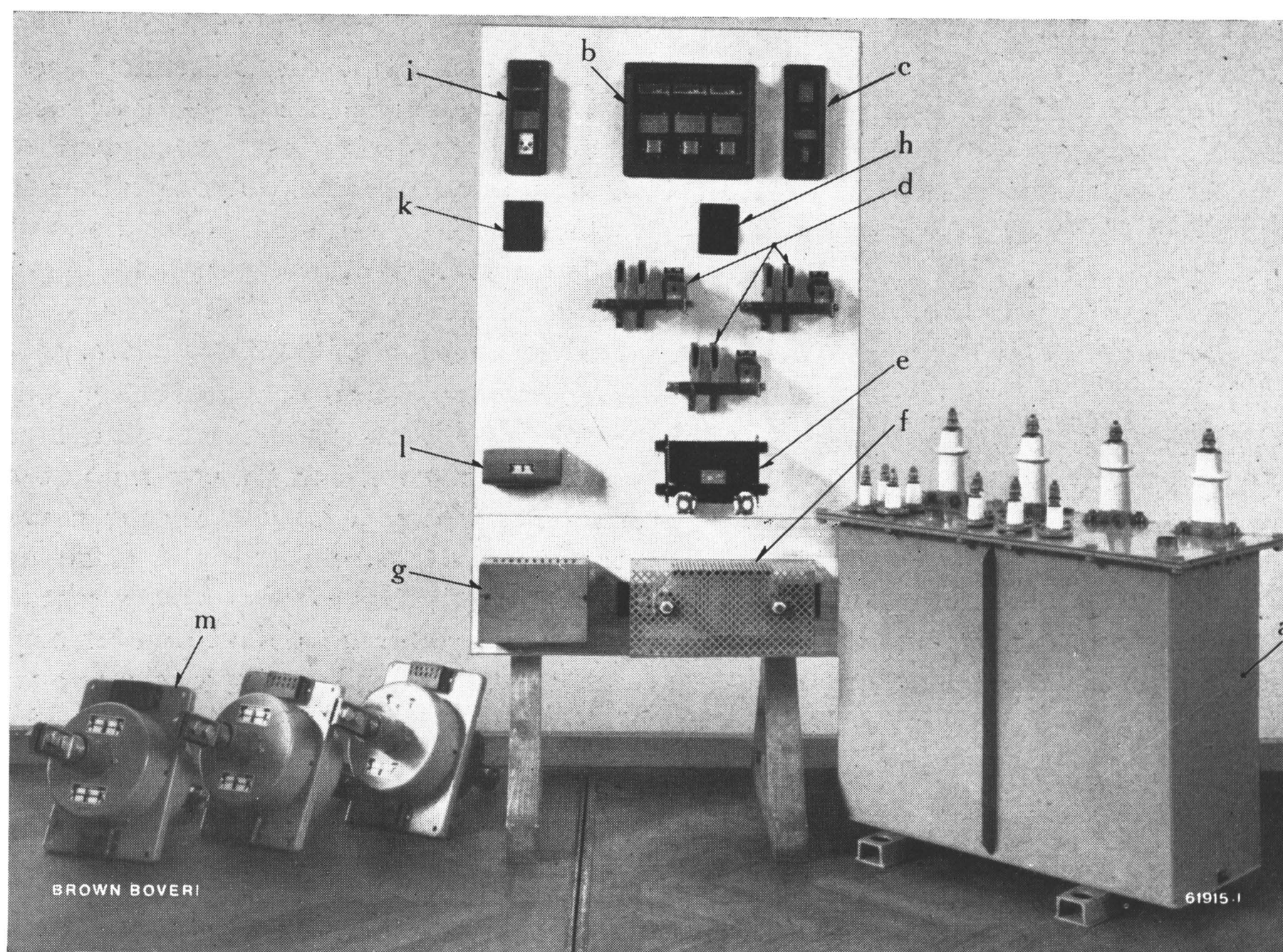


Fig. 5. — Ensemble de l'appareillage pour la nouvelle protection contre les défauts à la terre d'alternateurs travaillant en parallèle. Elle exige relativement peu d'appareils par rapport aux autres dispositifs de protection en usage jusqu'à ce jour.

a...h = Appareillage commun à tous les alternateurs travaillant en parallèle.

a = Transformateur de terre à bain d'huile pour 6600 V, avec deux enroulements secondaires. On peut le remplacer par un transformateur à air comprimé.  
b = « Surveilleur de terre ».

c = Relais temporisé.  
d = Contacteurs de terre.  
e = Transformateur auxiliaire de tension.

f = Résistance de terre.  
g = Résistance.  
h = Interrupteur de contrôle.

i...m = Equipement par alternateur.

i = Relais de terre.      k = Interrupteur de contrôle.      l = Résistance de contrôle.

m = Transformateur de courant 2000/5 A comportant :  
1 noyau pour la mesure du courant homopolaire.  
1 noyau de mesure, 30 VA classe 0,5.  
1 noyau pour la protection différentielle, 10 VA classe S20.

Les relais b, c, i et les interrupteurs de contrôle h et k sont placés sur le tableau, les autres appareils dans les cellules.

suite la tension  $E_o$  agit sur le circuit de courant ainsi formé. On voit immédiatement que  $E_o$  est égal à la tension de phase lors d'une terre au point neutre ou à la tension composée lors d'une terre à une borne. Le courant de terre, dont la valeur maximum est choisie à 5 A, varie au plus dans le rapport de 1 à 1,73, quel que soit l'endroit du défaut à la terre.

L'influence du courant capacitif du réseau, qui s'écoule également à travers le défaut, en plus du courant watté produit artificiellement, est examinée dans un chapitre spécial. Le fonctionnement décrit ci-après ne tient compte que du courant watté.

Le dispositif de protection comprend tout d'abord un organe pour déceler tout défaut à la terre et créer le circuit de terre. Comme il est préférable de mettre à la terre une phase déterminée par rapport à celle sur laquelle s'est produit le défaut, il faut d'abord déceler la phase défectueuse. On emploie, dans ce but, un relais wattmétrique composé de 3 relais monopolaires. Les bobines de l'un des systèmes du relais wattmétrique sont reliées à chacune des tensions composées du réseau, tandis que celles de

l'autre système sont alimentées par la tension du point neutre. Le diagramme vectoriel de la figure 3 permet de se rendre compte du fonctionnement de chaque relais. Soit S-T le vecteur de la tension composée appliquée en permanence au relais et  $\gamma$  le champ du vecteur de la tension appliquée au deuxième système de bobines. Ces deux tensions produisent un couple positif tendant à fermer les contacts du relais. Ce couple est maximum quand ces deux vecteurs sont perpendiculaires entre eux.  $U_{oR}$  représente la tension au point neutre lors d'un défaut à la terre sur la phase R; elle a, comme on le sait, une direction opposée à celle de la tension de phase correspondante.  $U_{oS}$  et  $U_{oT}$  indiquent la position de cette tension lors de défauts à la terre respectivement dans la phase S et la phase T. On voit que seule  $U_{oR}$  peut mettre en action le relais, tandis que  $U_{oS}$  et  $U_{oT}$  engendrent un couple négatif tendant à ramener le relais à sa position de repos. Les deux autres relais ont le même fonctionnement, conformément au cycle; par suite chaque relais, en fonctionnant, décelé un défaut à la terre sur une phase bien déterminée et il ferme le circuit correspondant à l'endroit de ce défaut.







être équipés de relais de terre analogues, indiquant les terres sur les lignes. Toutefois, il faut remarquer que pour pouvoir repérer sélectivement les défauts à la terre dans le réseau, il est presque toujours nécessaire de prendre diverses mesures supplémentaires.

C'est un avantage spécial du nouveau couplage de cette protection que d'éviter tout fonctionnement intempestif des relais de terre 8. Dans une installation ainsi protégée, tous les relais de terre sont alimentés par une tension bien déterminée en cas de défaut à la terre. La bobine de courant du relais d'un alternateur avarié est excitée par un courant dont l'intensité ne peut varier qu'entre d'étroites limites, qui peuvent être fixées d'avance en donnant les dimensions voulues à l'appareillage de protection. Par contre, les bobines de courant des relais des alternateurs sans défauts ne sont pas excitées.

Le relais 6 (voir figure 6) est un relais temporisé, qui fonctionne en même temps qu'est formé le circuit du courant de terre et il doit ensuite interrompre ce circuit et couper la tension des relais 8. Par suite, même lors d'une terre permanente sur le réseau, le courant watté amené dans le circuit ne charge qu'un court instant (1 seconde environ) l'endroit du défaut, le transformateur de terre et toutes les autres parties parcourues par le courant de terre; par conséquent, le dispositif est exécuté avec des dimensions prévues seulement pour une charge passagère. En cas d'une terre permanente dans le réseau, le relais temporisé bloque le dispositif pour l'empêcher de fonctionner tant que cette terre existe et en même temps il déclenche un dispositif d'alarme. Si une deuxième terre survient dans ces circonstances on a le cas du court-circuit, défaut éliminé par la protection contre les courts-circuits. Les doubles défauts à la terre dans les alternateurs sont éliminés par la protection différentielle. S'il n'y en a pas ou si on ne peut pas en mettre, il suffit d'avoir, comme moyen de protection dans ce cas, un relais à maximum de courant à action instantanée connecté en série avec la bobine de courant du relais 8.

Pour que les alternateurs restent protégés contre les défauts à la terre pendant qu'ils ne sont pas reliés aux barres collectrices, les relais de terre 8 sont connectés, comme relais de tension, par des contacts auxiliaires, placés sur le disjoncteur de l'alternateur, au transformateur de tension 9 inséré entre le point neutre de l'alternateur et la terre. De cette manière, le relais protège encore 96% des enroulements. Ce dispositif supplémentaire est très précieux, puisque dès la mise en marche d'une machine, par exemple après une révision, on a déjà une protection contre les défauts à la terre qui auraient pu subsister. Ce même dispositif est aussi très utile lorsqu'un alternateur, retiré temporairement de la marche en parallèle, travaille seul sur un transformateur.

Le « surveilleur de terre » 3 et l'appareillage qui sert à former le circuit du courant de terre, de même que le relais de terre 8 sont reliés à des interrupteurs

de contrôle permettant de faire fonctionner à chaque instant, sans autre manœuvre et comme en cas d'un défaut, les relais et l'appareillage. Le déclenchement du disjoncteur est alors bloqué automatiquement. Plus les défauts à la terre sont rares, plus le contrôle du fonctionnement de la protection est justifié. Ces interrupteurs de contrôle ne sont pas indiqués à la figure 4 pour avoir plus de clarté. Ce qui précède concerne spécialement le fonctionnement de la protection, mais quelques points demandent encore des explications plus détaillées.

Le « surveilleur de terre » 3 (fig. 7) est l'organe détecteur qui entre en action dès qu'apparaît un défaut à la terre. Sa sensibilité normale est de 1% de la tension du point neutre lors d'une terre à une borne; la nouvelle protection contre les défauts à la terre peut donc protéger 99% de l'enroulement. Lorsque la symétrie des alternateurs et du réseau reliés galvaniquement n'est pas très grande c'est-à-dire que le déplacement, par rapport à la terre, du point neutre peut atteindre 1% et plus, le dispositif de protection doit être réglé en conséquence. Dans ce but, les relais sont munis d'une échelle permettant de régler leur fonctionnement entre 1 et 5%.

La figure 5 montre combien ce dispositif de protection nécessite peu d'appareils pour les barres collectrices d'une usine électrique et par alternateur. L'appareillage commun à tous les alternateurs est indiqué par les lettres a...h, tandis que les appareils nécessaires à un alternateur, excepté le transformateur de tension 9, sont désignés par les lettres i...m. Les dimensions des transformateurs de courant sont remarquablement réduites, bien que ceux-ci comportent, en plus du noyau pour mesurer la composante homopolaire, un noyau de mesure et un noyau pour la protection différentielle. Le noyau pour la mesure de la composante homopolaire possède un enroulement secondaire et un enroulement tertiaire. L'enroulement secondaire est couplé, des deux côtés, en étoile, ce qui permet d'éliminer l'influence du courant de phase sur la mesure. Par conséquent, l'enroulement tertiaire couplé en série est indépendant de l'intensité du courant nominal de l'alternateur et il peut être exécuté toujours avec le même rapport de transformation, les mêmes relais deviennent utilisables quelle que soit la puissance des alternateurs.

Il est nécessaire d'employer comme transformateurs de terre des types à cinq noyaux ou trois appareils monophasés qui permettent, grâce au retour du flux magnétique, de mesurer la tension du point neutre et l'écoulement d'un courant à la terre (fig. 5, lettre a).

Lors de courts-circuits avec d'importants courants dissymétriques, spécialement en cas de composantes à courant continu, on doit prévoir un courant qui peut survenir accidentellement dans l'enroulement tertiaire des transformateurs de courant homopolaire. Un tel courant ne peut toutefois provoquer un fonctionnement du relais que dans des circonstances tout à fait spéciales; cependant pour avoir toute sécurité



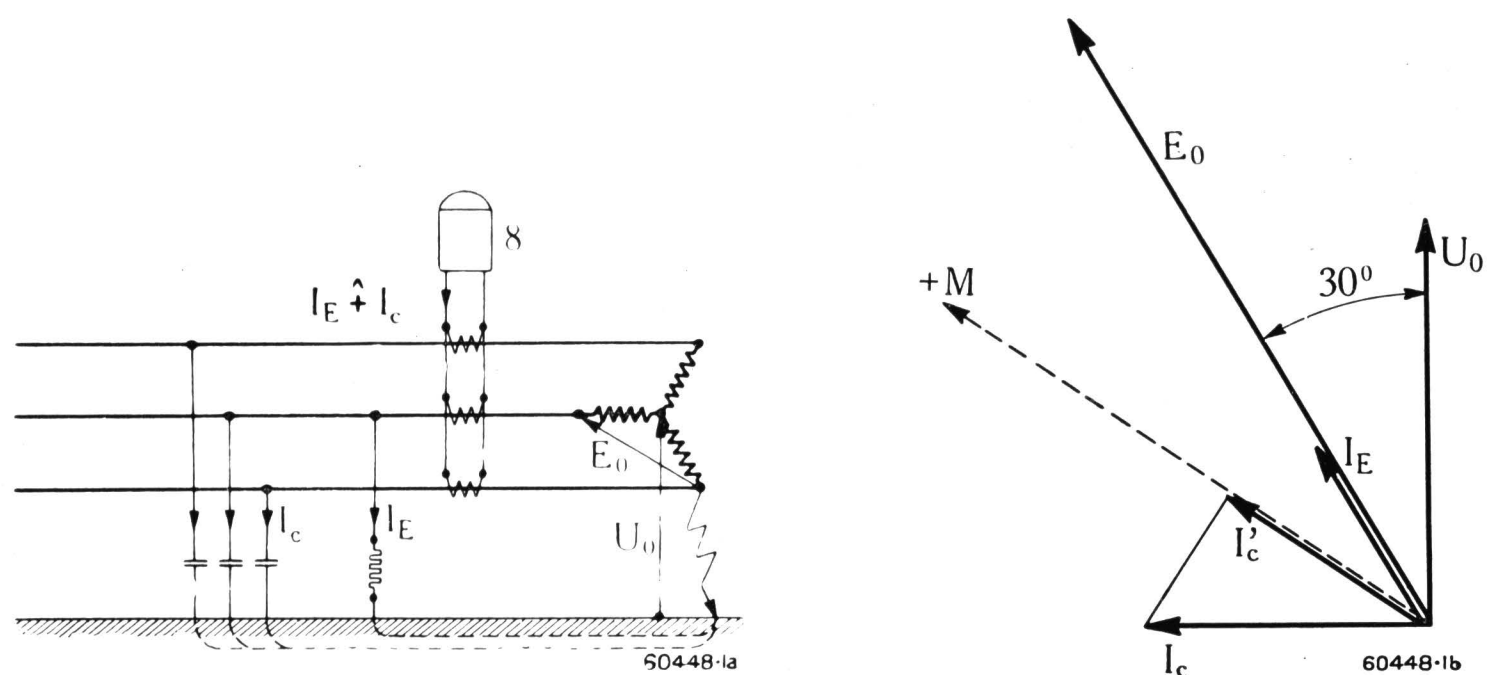


Fig. 10 a et b. — Schéma et diagramme de la protection contre les défauts à la terre lorsque le réseau de l'alternateur n'a pas de bobine d'extinction.

a) Défaut à la terre à une borne et mise à la terre d'une borne à travers une résistance.  
 $U_0$  = Tension du point neutre.  
 $E_0$  = Tension appliquée au circuit formé pour le courant de terre.  
 8 = Relais de terre.

b) Diagramme des tensions et des courants lors d'un défaut à la terre.  
 $I_c$  = Courant capacitif du réseau.  
 $I_c'$  = Composante du courant capacitif agissant sur le relais de terre.  
 $I_E$  = Courant watté du dispositif de protection.

à ce sujet, le dispositif de protection contre les défauts à la terre est bloqué dès la naissance d'un court-circuit et pendant toute sa durée, lorsqu'il s'agit d'alternateurs d'un courant nominal supérieur à 600 A. Pour effectuer ce blocage, on utilise le contact instantané des relais à maximum d'intensité, existant de toute façon. Ces contacts sont indiqués par le chiffre 10 à la figure 4. Dans ce cas, les relais de terre 8 des alternateurs sont temporisés de 0,3 à 0,5 s.

Si l'on emploie un transformateur de courant qui entoure les 3 phases du câble, seul le courant homopolaire peut agir. Il n'est plus nécessaire de bloquer le dispositif lors d'un court-circuit. Dans ce cas, le dispositif de protection peut fonctionner en son temps de réglage minimum qui est de 0,2 s, compté dès la naissance du défaut jusqu'à l'instant où l'impulsion de déclenchement est donnée.

INFLUENCE DES COURANTS CAPACITIFS SUR LE DISPOSITIF DE PROTECTION.

L'angle de déphasage du courant capacitif du réseau relié galvaniquement à l'alternateur est déterminé par la tension du point neutre. Il n'est pas influencé par la mise à la terre d'une borne, telle que nous l'effectuons, car celle-ci ne consomme qu'une faible charge entre deux phases, charge qui ne change pas les conditions de tension de l'installation par rapport au sol. Lors d'un défaut à la terre dans un alternateur, le courant naturel de terre parcourt les transformateurs de courant homopolaire dans le même sens que le

courant watté. Il a, par suite, une influence sur le relais de terre (fig. 10 a).

Les figures 10 a et 10 b montrent les conditions existant pendant une terre à une borne.  $U_0$  est la tension du point neutre. Le courant naturel de terre  $I_c$  est en avance de  $90^\circ$  sur cette tension. La tension  $E_0$ , qui agit sur le courant watté  $I_E$  de notre dispositif, est en avance de  $30^\circ$  sur  $U_0$ , vu l'endroit de la terre envisagée ci-dessus. La même tension composée est appliquée au relais de terre, qui fournit son couple maximum lors d'un courant ayant la direction  $+M$  (fig. 10 b).

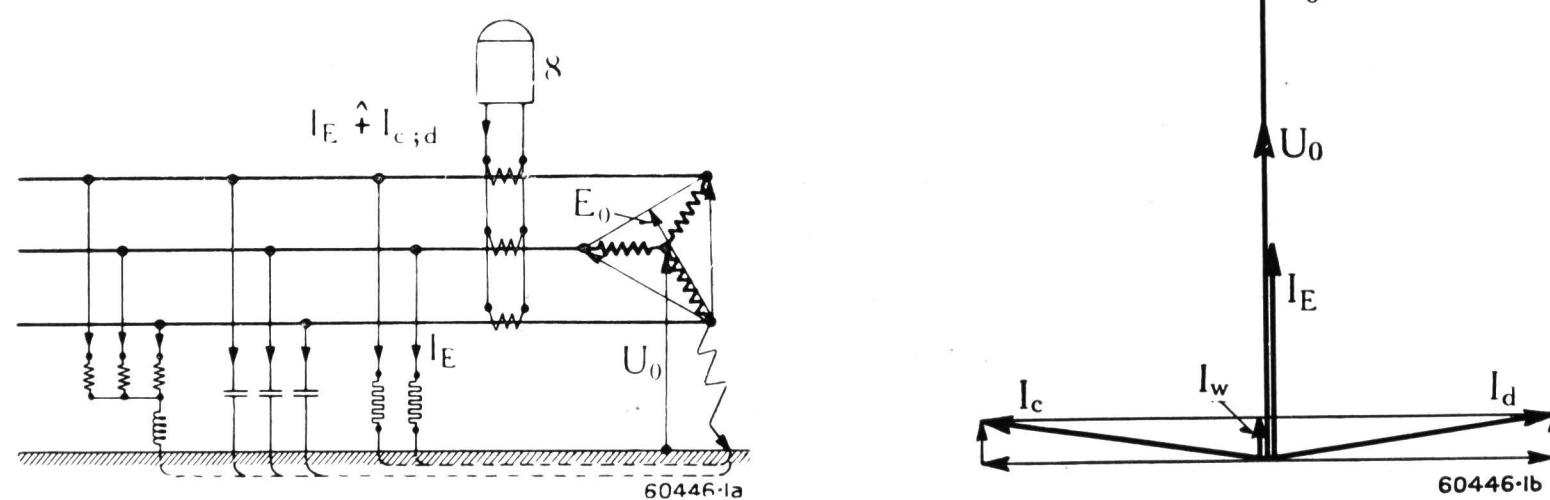


Fig. 11 a et b. — Schéma et diagramme de la protection contre les défauts à la terre lorsque le réseau de l'alternateur est muni d'une bobine d'extinction.

a) Défaut à la terre à une borne et mise à la terre des deux autres bornes, chacune à travers une résistance.  
 $U_0$  = Tension du point neutre.  
 $E_0$  = Tension appliquée au circuit formé pour le courant de terre.  
 $I_E$  = Courant watté du dispositif de protection.  
 8 = Relais de terre.

b) Diagramme des tensions et des courants lors d'un défaut à la terre.  
 On a indiqué un courant résiduel capacitif  $I_c$  et un courant résiduel inductif  $I_d$ , qui cependant n'existent pas simultanément.  
 $I_w$  = Composante d'un courant résiduel agissant sur le relais de terre.

On voit que le courant capacitif  $I_c$  impose au relais une composante de fonctionnement  $I_c'$ . Lors de défauts à la terre en d'autres endroits, c'est seulement

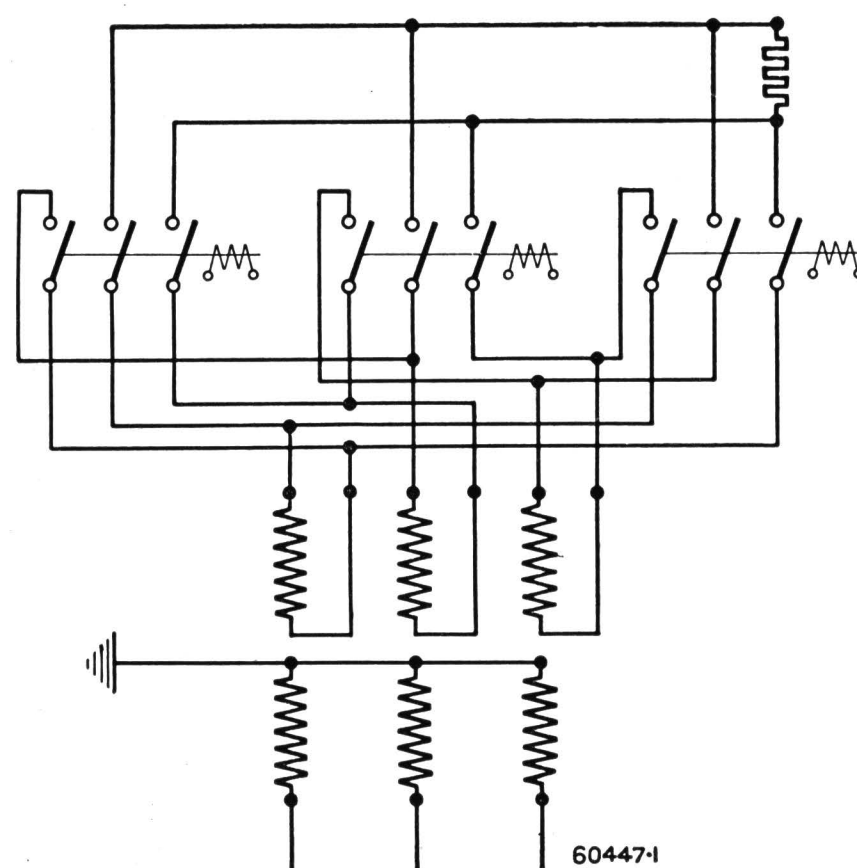


Fig. 12. — Couplage du transformateur de terre pour la mise à la terre de deux phases à travers une résistance afin de former le circuit du courant de terre lorsque le réseau des alternateurs est muni d'une bobine d'extinction.



la position du vecteur du courant  $I_E$  ainsi que celle du vecteur de la tension, engendrant ce courant, qui varient dans une zone limitée à  $30^\circ$ . L'action du courant capacitif  $I_c$  sur le relais reste la même.

Lors de défauts à la terre dans le réseau, son courant capacitif n'engendre aucune composante homopolaire au point de mesure. Par contre, le courant capacitif de l'alternateur et de la zone protégée est mesuré comme composante homopolaire, mais de sens inverse, et par suite elle n'a aucune action sur le relais.

Quand un réseau, relié galvaniquement aux alternateurs, contient une bobine d'extinction, ce qui peut provoquer un courant résiduel capacitif ou inductif suivant le degré de compensation, il faut que le relais de terre et le circuit du courant de terre, formé artificiellement, soient prévus pour que le courant résiduel ne puisse jamais causer de perturbations. On doit envisager une disposition symétrique que l'on obtient en mettant à la terre les deux phases saines, par des résistances égales entre elles (fig. 11 a).  $E_o$  et le courant watté  $I_E$  sont alors en phase avec la tension du point neutre  $U_o$ . On emploie dans ce but un relais de terre dont le couple est maximum quand le courant et la tension sont en phase, c'est-à-dire lorsque  $+M$  coïncide avec la phase  $E_o$  (fig. 11 b). Les deux courants résiduels possibles (capacitif  $I_c$  ou inductif  $I_d$ ) agissent plus ou moins fortement, selon l'intensité de leur composante wattée  $I_w$  et seulement en aidant le relais à fonctionner. Ils sont également indiqués à la figure 11 b.

En pratique, on réalise cette mise à la terre au moyen du transformateur de terre, en reliant en série par une résistance les deux enroulements secondaires des deux phases saines (fig. 12). Dans ce cas il est nécessaire d'avoir des contacteurs tripolaires au lieu de bipolaires. La variation possible du courant s'élève toutefois dans le rapport de 1 à 3, ce qui n'a presque pas d'influence sur les dimensions des appareils et accessoires du dispositif de protection. La tension pour l'alimentation des relais de terre des alternateurs est prise d'une manière analogue à l'un des circuits formés par le courant de terre. Pour le reste, le dispositif est le même que celui indiqué à la figure 4.

On peut se demander, en considérant les courants naturels de terre, s'il n'est réellement pas possible de faire fonctionner une protection contre les défauts à la terre uniquement au moyen de ces courants. On pourrait, sans aucun doute, le faire dans une certaine mesure. Cependant, le plus souvent, le courant capacitif d'un réseau relié galvaniquement aux alternateurs est beaucoup trop faible et, même s'il suffisait, le fonctionnement des relais dépendrait de l'ensemble du réseau et l'étendue de la protection resterait toujours assez limitée. Par conséquent, de tels dispositifs de protection à action restreinte offrent d'autant moins d'intérêt qu'avec le nouveau système décrit ci-dessus on obtient simultanément toute sécurité de fonctionnement et un domaine de protection exceptionnellement étendu.

*H. Stalder. (C. C.)*

## LA SURALIMENTATION AVEC TURBINE A GAZ D'ÉCHAPPEMENT POUR LES MOTEURS DIESEL DES VÉHICULES ROUTIERS.

Indice décimal 621.436.052 : 621.431.73

La suralimentation avec turbine à gaz d'échappement, suivant le procédé Büchi, est généralement reconnue comme la plus efficace pour les moteurs Diesel à quatre temps. Jusqu'à la fin de 1939 Brown Boveri, à Baden, a livré des turbo-soufflantes de suralimentation pour équiper plus de 1200 moteurs Diesel de 150 à 5500 CV eff atteignant une puissance totale d'environ 1 200 000 CV eff. Comme il n'existait pas jusqu'à présent de petits groupes de suralimentation avec turbine à gaz d'échappement pour des puissances inférieures à 150 CV eff, ce procédé ne pouvait pas être envisagé pour suralimenter les moteurs Diesel des véhicules routiers. Mais c'est précisément dans ce cas qu'il est intéressant, pour une puissance donnée, de réduire le plus possible le poids et l'encombrement du moteur de propulsion en le suralimentant. Dans cet ordre d'idées l'on s'est tout d'abord efforcé d'augmenter la puissance des moteurs des véhicules routiers au moyen de soufflantes de suralimentation centrifuges ou de Root entraînés par un renvoi mécanique. Ce dernier cependant donne lieu à de nombreuses difficultés à cause du rapport de démultiplication élevé, vu qu'il faut des di-

mensions assez réduites pour pouvoir les monter sans difficulté sous le capot du moteur. C'est pour cette raison que cette méthode d'augmenter la puissance des moteurs des véhicules routiers n'a pas été employée jusqu'à maintenant sur une grande échelle. Par suite de la guerre un grand nombre de véhicules routiers ont été transformés et munis de gazogènes, ce qui nous a amenés à construire des petits groupes avec turbine à gaz d'échappement pour suralimenter le moteur et le gazogène; on peut ainsi compenser, totalement ou en grande partie, la perte de puissance de 30—50%, qui se produit par rapport à l'alimentation à la benzine ou au mazout.<sup>1)</sup> Ces petits groupes dont il y en a un grand nombre en service sur des camions et des autobus, et même sur quelques voitures, ont donné d'excellents résultats malgré des conditions de service relativement pénibles par suite du fonctionnement au gaz. Pour les moteurs d'une puissance d'environ 70 à 100 CV eff avant suralimentation, on emploie le groupe refroidi par air du type VTx 95 (fig. 1), et pour les moteurs

<sup>1)</sup> Voir Revue Brown Boveri, n° 7/8, 1943.



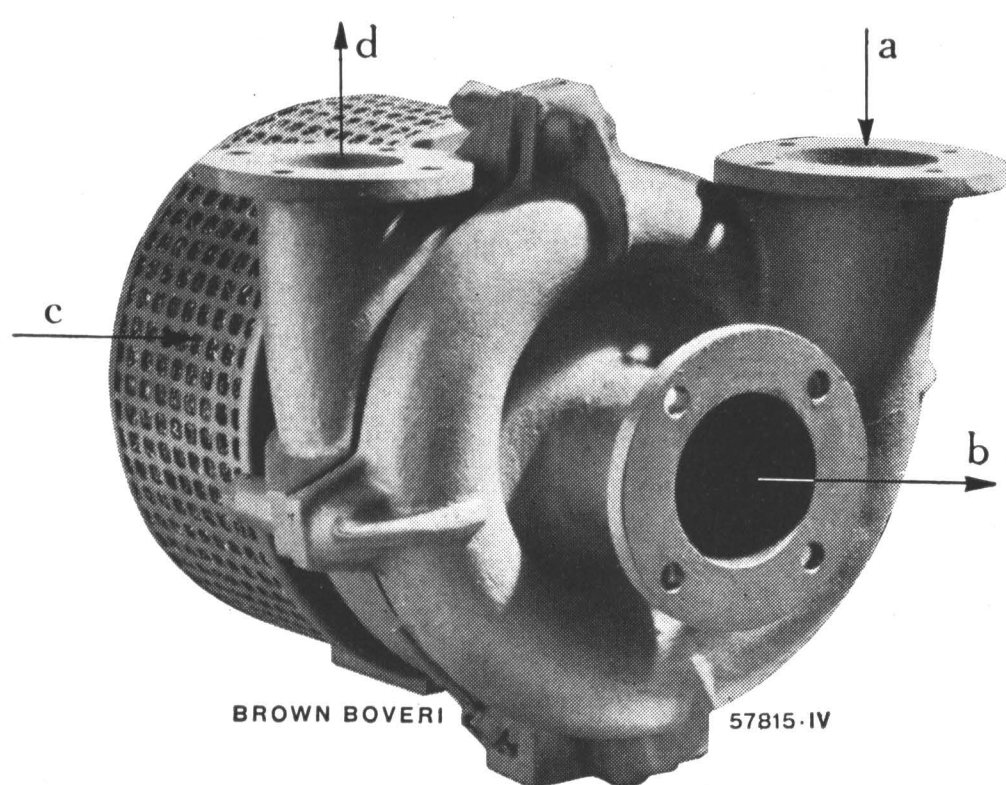


Fig. 1. — Groupe de suralimentation avec turbine à gaz d'échappement VTx 95, pour suralimenter les moteurs des véhicules routiers d'environ 60 à 100 CV eff.

Exécution avec une seule entrée des gaz pour moteurs sans balayage. Le compresseur est refroidi par air, il ne faut donc pas d'eau de refroidissement.

a = Entrée des gaz dans la turbine.

b = Sortie des gaz.

c = Entrée de l'air dans la soufflante.

d = Sortie de l'air comprimé.

Ces deux groupes sont exécutés spécialement pour les véhicules routiers et ils sont d'une construction robuste ne demandant que peu de surveillance et d'entretien. Ils ont leur propre graissage et par suite ils sont indépendants des pompes de graissage du moteur propulseur. Plus de 100 de ces groupes sont en service depuis plusieurs années sur des voitures et camions, alimentés aux gaz de bois et de charbon de bois, pour suralimenter les gazogènes et des moteurs ce qui augmente la puissance de 30 à 60%.

jusqu'à 150 CV eff avant suralimentation, le groupe refroidi par eau du type VTx 110 (fig. 2). Ces deux groupes ont leur propre graissage et ils sont donc indépendants de la pompe à huile de graissage du moteur de propulsion. L'entretien du groupe de suralimentation se réduit au contrôle périodique du niveau d'huile des paliers à billes. Comme l'indiquent les figures 3 et 4, il n'y a aucune difficulté à monter ce groupe sur le châssis, vu que son encombrement et son poids sont petits. Dans la plupart des cas on peut placer ce groupe à côté du moteur; mais lorsque ce n'est pas possible il peut être monté n'importe où sur le châssis car son entraînement est indépendant du moteur propulseur.

Les petits groupes de suralimentation susmentionnés, destinés à un fonctionnement au gaz de bois, peuvent cependant être employés sans autre pour la suralimentation des moteurs Diesel marchant au mazout sur véhicules routiers. Il y a déjà en cours des essais avec nos groupes de suralimentation auprès de différents constructeurs, dans le but de pouvoir livrer après la guerre des moteurs de propulsion d'une puissance spécifique plus grande. L'augmentation de puissance, à vitesse égale, atteint environ 30 à 60% suivant qu'il s'agit de moteurs avec ou sans balayage. En principe, il est aussi possible d'augmenter la puissance des moteurs à essence au moyen d'un turbo-compresseur à gaz d'échappement, mais il faut prendre garde que la température des gaz d'échappement ne dépasse pas 650° C à l'entrée du groupe. En outre, on doit dans ce cas augmenter le nombre d'octanes du carburant ou diminuer le taux de compression. Contrairement à ce qui arrive avec une suralimentation obtenue par une soufflante entraînée mécaniquement, le moteur n'est soumis à aucun surcroît de charge nécessaire pour entraîner un de nos groupes, puisque la turbine fonctionne avec de l'éner-

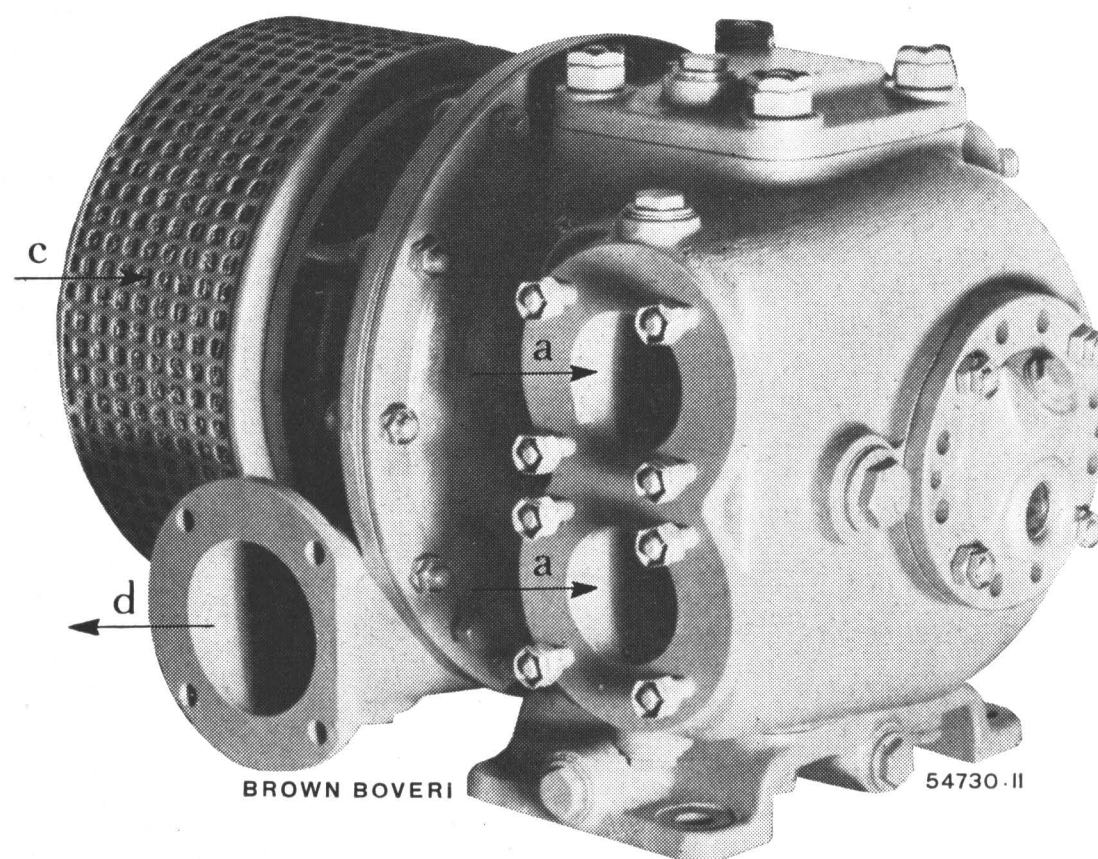


Fig. 2. — Groupe de suralimentation avec turbine à gaz d'échappement VTx 110 pour suralimenter les moteurs des véhicules routiers d'environ 150 CV eff.

Exécution avec refroidissement par eau et deux entrées des gaz pour moteurs avec balayage.

gie contenue dans les gaz d'échappement. Pour la même raison cette commande a une grande souplesse, car aucune partie rotative du groupe n'est rigidement liée à l'organisme de propulsion. Par conséquent on évite les dispositifs à grand rapport de démultiplication, comme il en faudrait pour un entraînement mécanique du groupe par le moteur Diesel, ce qui cause des complications pour ces moteurs soumis à de fréquentes manœuvres. Le service du moteur n'est modifié en aucune façon lorsqu'il est suralimenté, vu que le groupe avec turbine à gaz d'échappement travaille tout à fait automatiquement et qu'il ne nécessite aucun réglage; la vitesse du groupe dépend uniquement du débit des gaz d'échappement et de

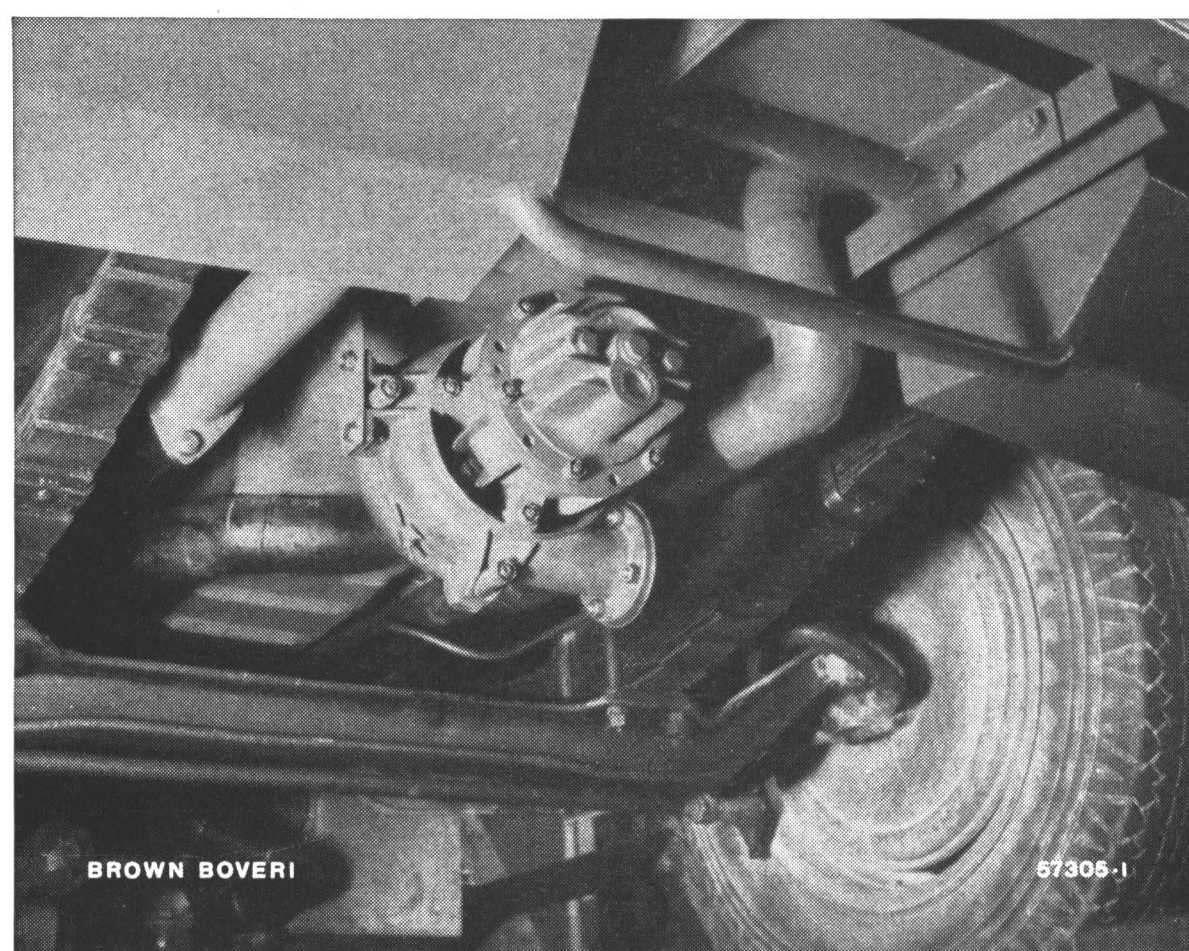


Fig. 3. — Montage d'un groupe de suralimentation, type VTx 95 avec refroidissement par air sur un camion Opel-Blitz.

Vu l'encombrement réduit de ce groupe et son faible poids (qu'environ 18 kg) il n'y a aucune difficulté à le fixer au moteur. Mais ce groupe peut aussi être placé sous le châssis comme sur la vue ci-dessus, car son montage est indépendant du moteur.



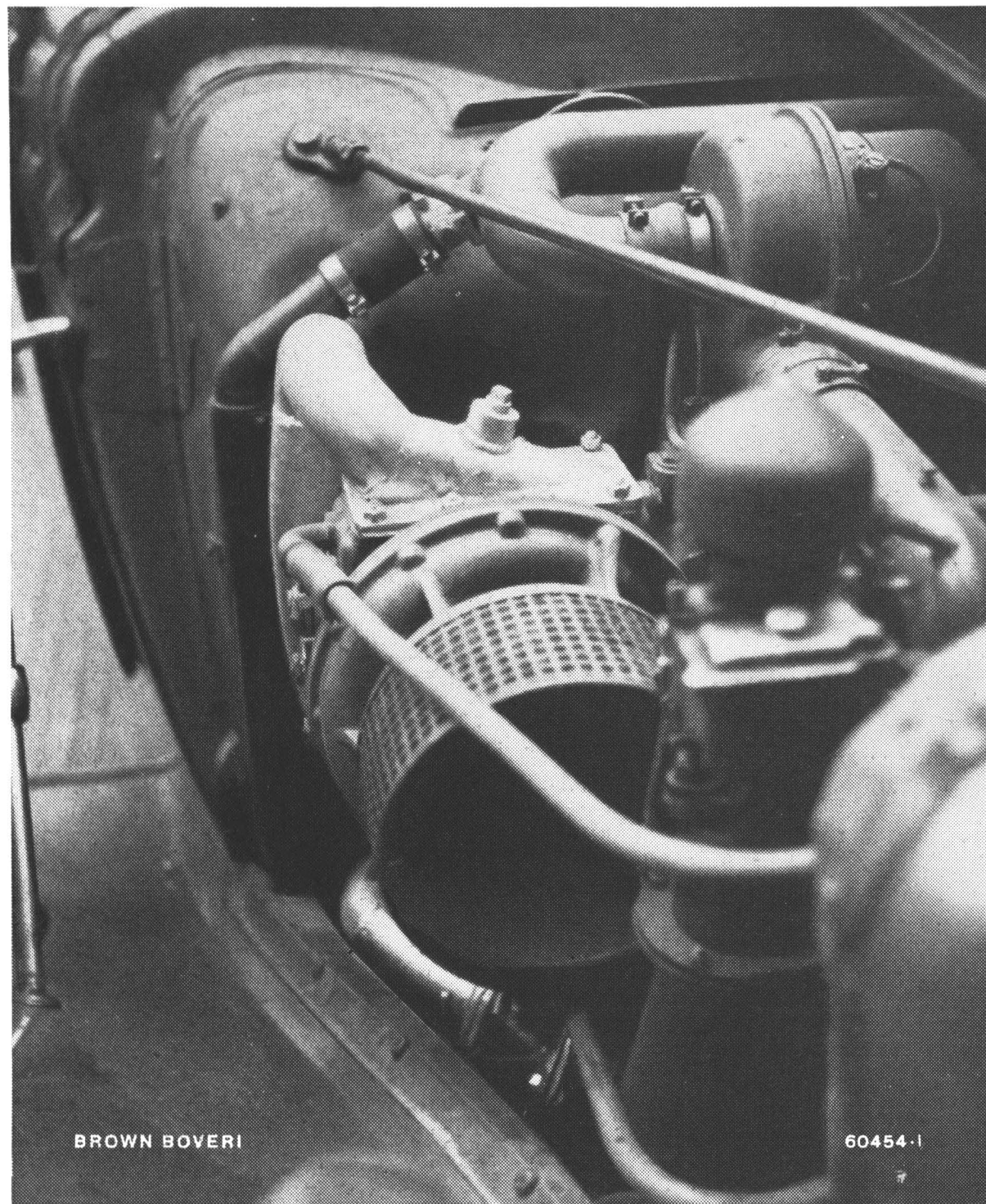


Fig. 4. — Groupe de suralimentation type VTx 110 avec refroidissement par eau, monté près du moteur d'une voiture.

Des essais de marche très poussés et une expérience de service de plusieurs années ont démontré la complète sécurité de service de ces groupes de suralimentation.

leur température. Comme le groupe est toujours prévu pour les plus grandes puissances possibles, il n'est pas nécessaire de prendre des mesures spéciales de protection, par suite le dispositif de suralimentation est excessivement simple.

On peut déjà relever dans la presse technique que la suralimentation jouera un rôle important après la guerre dans la construction des moteurs pour les véhicules routiers. Dans plusieurs cas ce n'est qu'avec des moteurs suralimentés que l'on pourra obtenir les puissances nécessaires pour les autobus régionaux rapides, les voitures postales qui desservent les grandes routes des Alpes ainsi que les gros camions. Enfin il est aussi très important pour le constructeur de moteurs d'envisager la suralimentation dans le cadre des possibilités d'après guerre, car la suralimentation permet de limiter à un minimum le nombre des types des moteurs pour une gamme de puissances données, puisqu'il est possible d'utiliser le même moteur pour des puissances différentes suivant qu'il fonctionne avec ou sans suralimentation.

(MS 584)

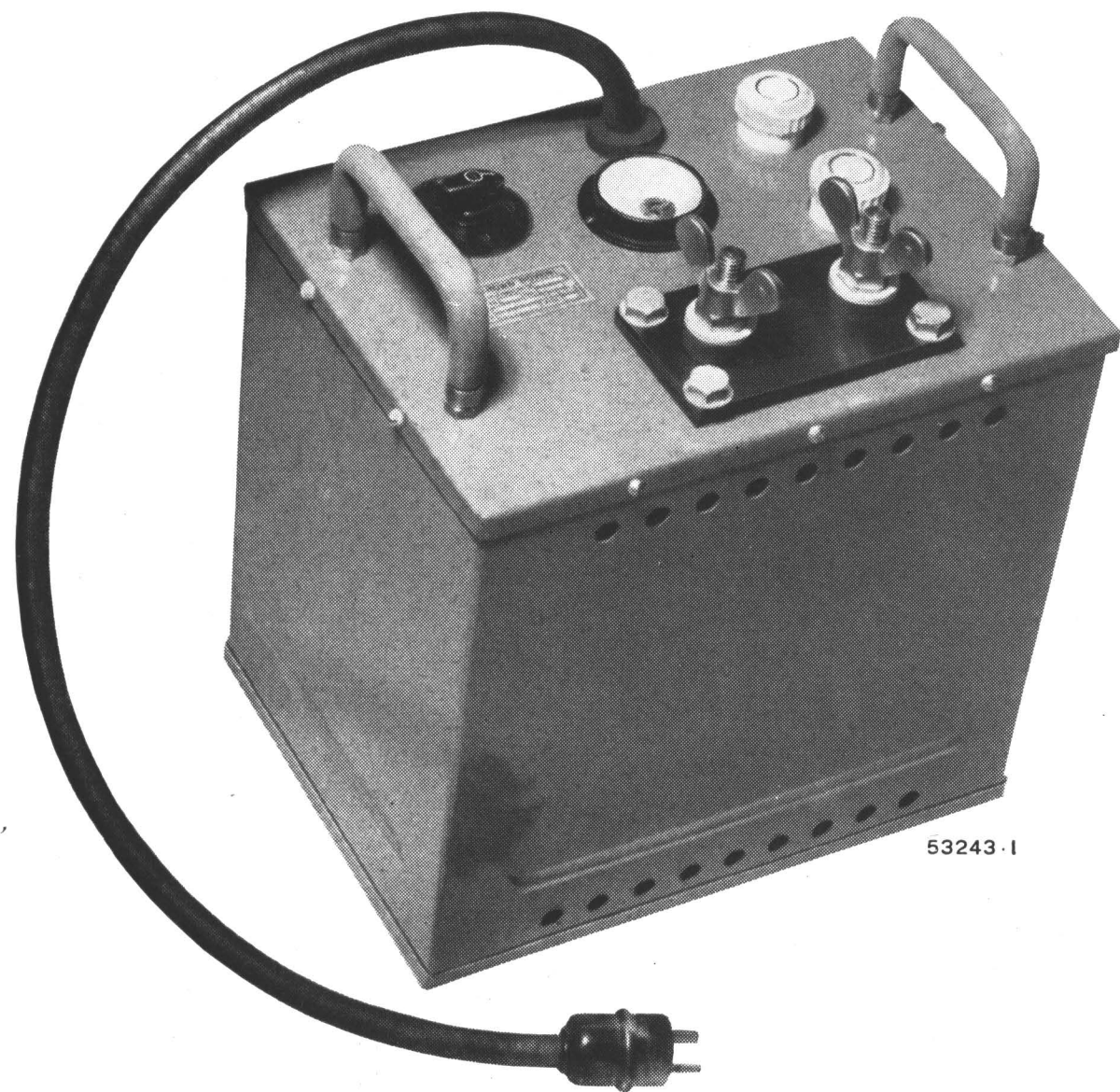
T. Egg. (C. C.)

### BREF MAIS INTÉRESSANT

#### Transformateur portatif pour dégeler les conduites d'eau.

Indice décimal 621.646.974

Vu le peu de charbon disponible pour le chauffage, il y aura certainement beaucoup plus de conduites d'eau



Transformateur portatif pour dégeler les conduites d'eau.

Le transformateur refroidi à l'air est enfermé dans un boîtier en tôle, sur le couvercle on a placé un interrupteur rotatif, un ampèremètre, des fusibles et de robustes bornes secondaires, le tout bien accessible.

gelées, que les installateurs dégèlent en général à la lampe à souder. La benzine étant rare actuellement, il est plus avantageux de dégeler ces conduites au moyen de l'électricité. Le transformateur portatif de la figure ci-contre convient spécialement à ce travail. Son primaire est prévu pour être raccordé à un réseau monophasé de 220 à 250 V, 50 pér/s, sa puissance suffit pour dégeler les conduites d'eau de 2" et d'environ 20 mètres de longueur. L'emploi de cet appareil est commode et sans danger, il exclut tout risque d'incendie.

(MS 918)

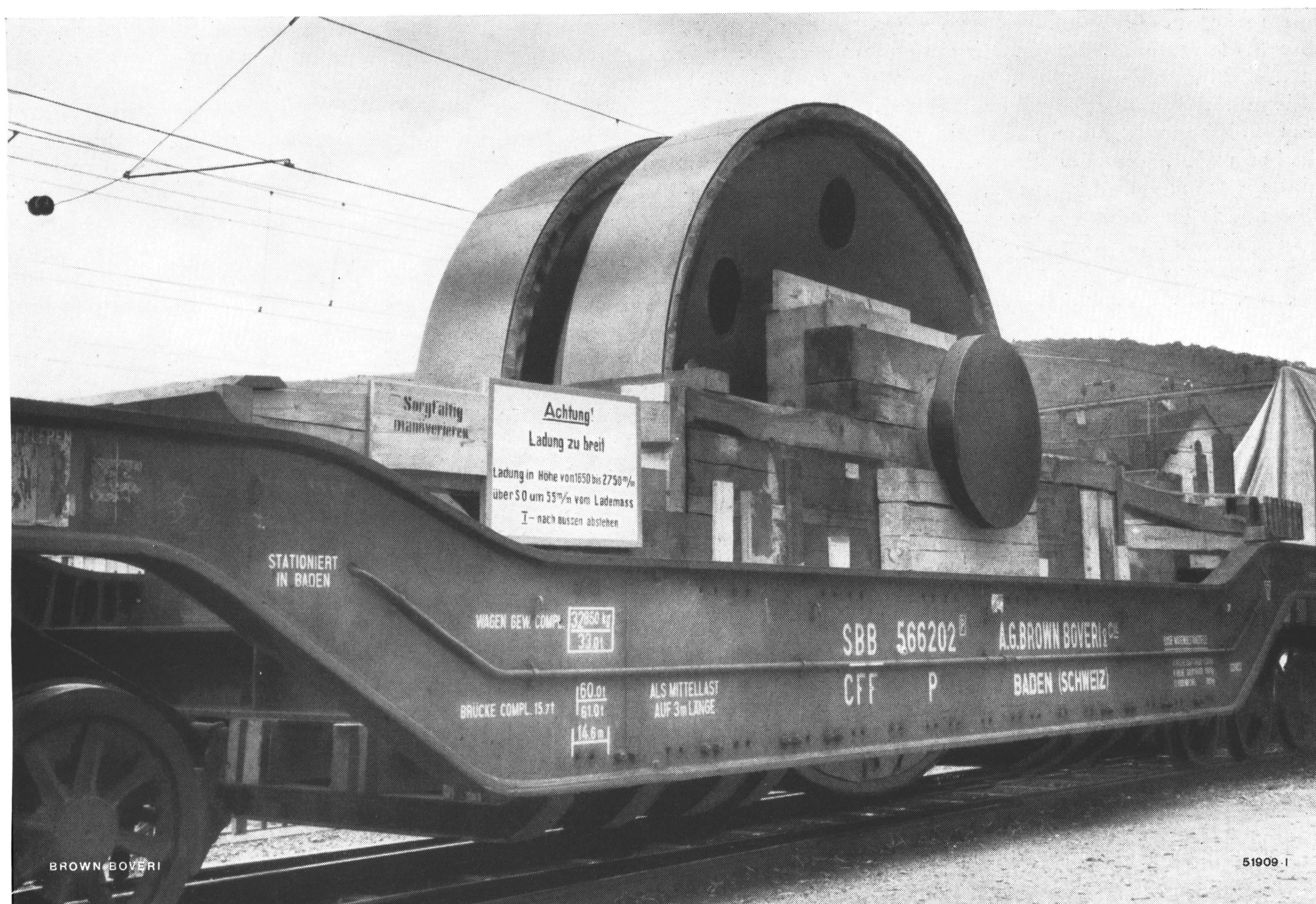
F. Lerch. (C. C.)

#### Le dixième anniversaire de la désignation « Mutateur ».

Indice décimal 621.314.65

Quand paraîtra ce numéro, il y aura exactement dix ans que nous avons proposé officiellement la désignation commune de « Mutateur » à employer d'une façon tout à fait générale pour dénommer tous les types de convertisseurs à vapeur de mercure. Le mot latin « mutare », duquel il dérive, ne signifie pas autre chose que « changer » sans indiquer comment le changement se fait. De la même manière que l'on emploie les noms techniques qui ont depuis longtemps droit de cité, tels que « moteur », « générateur » et « transformateur », en leur adjoignant des attributs, on peut aussi utiliser le mot mutateur pour tout usage bien déterminé. Par exemple, quand nous parlons d'un appareil qui convertit du courant alternatif en continu, il suffit de le désigner par « mutateur alternatif-continu » et de l'abréger dans la suite de l'exposé par le simple mot « mutateur ». Les noms susmentionnés sont employés d'une façon internationale en électrotechnique, et l'expression mutateur peut également être





Grandes roues d'un train d'engrenage pour la marine d'environ 4 m de diamètre, chargées sur wagon spécial.

Avant la guerre, nous avons construit dans nos usines de Baden plusieurs turbines marines avec trains d'engrenage de grande puissance et aussi uniquement quelques grands trains d'engrenages. Notre usine de turbines est équipée de la façon la plus moderne pour tailler les grands engrenages et la denture est d'une précision insurpassable.

(Voir la Revue Brown Boveri, numéro spécial : «Propulsion des navires et auxiliaires de bord», septembre/octobre 1942, pages 276 et suivantes.

admise pratiquement sans changement dans toutes les langues étrangères. (Anglais: mutator; allemand: mutator; italien: mutatore.)

Le développement du mutateur et de ses usages a fait de grands progrès au cours de ces dix dernières années. On a mis sur le marché les mutateurs à réfrigération à air, puis sans pompe, et enfin les mutateurs monoanodiques (mutateur-élément). Ces derniers temps on a, en plus, construit le convertisseur à contacts<sup>1)</sup>.

On a aussi mis en service des installations pour transformer du courant continu en alternatif, pour convertir des fréquences différentes, pour coupler des réseaux ayant un nombre de phases égal ou différent. En plus, on a utilisé le mutateur pour résoudre divers problèmes de réglage, par exemple pour alimenter les machines à souder par points ou à la molette. En ce qui concerne la capacité de charge on a obtenu, surtout pour les hautes tensions comme il s'en présente pour le transport de l'énergie par courant continu, des puissances égales à un multiple des puissances des mutateurs exécutés précédemment.

Notre proposition avait eu un grand nombre de voix favorables mais aussi quelques voix d'opposition<sup>2)</sup>. Le

<sup>1)</sup> Il n'a pas encore été décidé si le convertisseur à contacts pouvait être à l'avenir désigné par «mutateur mécanique». Dans ce cas la définition proposée (voir ci-dessus) devrait encore s'étendre.

<sup>2)</sup> Voir R. G. E. du 16 février 1935, tome XXXVII, p. 201.

Comité n° 1 de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) a décidé dans sa session du 18 au 20 juin 1935 à Scheveningen (Hollande) de transmettre notre proposition en même temps que celle de l'Italie (commutateur électronique) aux comités des différents pays pour en continuer l'étude. Le Comité électrotechnique suisse a admis après enquête écrite du 12/22 septembre 1936 la désignation «mutateur» en recommandant de l'employer. Dans une autre session du 5 au 8 juin 1937 la Commission Electrotechnique Internationale a décidé de mettre en vigueur, sous toute réserve, la première édition du vocabulaire déjà terminé avec les désignations précédentes. Les délégués suisses présents ont pu constater qu'il y avait déjà une certaine majorité qui était d'accord avec la proposition suisse. Le comité national français proposa la désignation «mutateur» tout au moins pour le mutateur alternatif-alternatif. Par contre, elle conserva la désignation «redresseur» pour le mutateur alternatif-continu et le terme «onduleur» pour le mutateur continu-alternatif. Vu cet accord partiel, on peut s'attendre à ce que la nouvelle désignation fasse progressivement son chemin dans le langage technique français.

Le comité national suisse a déjà proposé pour la désignation «mutateur» les deux définitions ci-après, c'est-à-dire:

«Le terme mutateur comprend tout genre de soupape à vide avec commande électrique pour application à cou-



rant fort», et la deuxième, «un appareil électronique pour la conversion et la régulation du courant électrique». La définition suivante a été proposée par la délégation italienne, soit: «un appareil qui utilise la conductibilité à sens unique entre une électrode (cathode) et une ou plusieurs électrodes (anodes) dans le vide soit dans un milieu gazeux ou vapoureux pour changer les caractéristiques ou la nature des courants alternatifs ou continus.» Bien qu'il soit difficile de trouver une définition générale satisfaisante, qui puisse être plus tard éventuellement étendue, il faut cependant admettre qu'on réussira à la rédiger.

Pour terminer, encore quelques mots concernant un malentendu qui n'était pas précisément favorable à l'introduction générale du nouveau mot «mutateur». En 1934, nous avons fait déposer le terme «mutateur» comme marque internationale de produits (déposé en Suisse sous le n° 84 445, le 15 novembre 1934) avant que nous ayons eu l'intention de le proposer comme terme technique

international<sup>1)</sup>. On en a tiré quelquefois des conclusions préjudiciables qui auraient dû disparaître lorsque cette demande de protection a été retirée quelques années après. Il est nécessaire d'insister encore expressément ici que Brown Boveri a renoncé à tous ses droits de protection sur le terme «mutateur». En conséquence n'importe quelle entreprise peut employer pour ses propres produits de ce genre le terme «mutateur».

Vu que cette désignation est absolument claire et n'offre aucune ambiguïté pour tous les emplois prévus, et comme ce mot est court et facilement traduisible dans plusieurs langues, il est donc justifié de supposer que la désignation «mutateur» sera admise dans des milieux toujours plus nombreux.

(MS 578)

Ch. Ehrensperger. (C. C.)

<sup>1)</sup> Son enregistrement n'avait pas été accepté en Allemagne parce qu'une société qui avait protégé la désignation «mutatron» sous le n° 374 533 avait fait opposition au terme que nous avions déposé en alléguant qu'il serait facilement possible de confondre ces désignations.

## ESSAI DE SURVITESSE FAIT AVEC SUCCÈS SUR UNE GRANDE ROUE POLAIRE.

Indice décimal 621-755:313.322.043.3

Dans la grande halle de notre usine, on a récemment soumis à l'essai contractuel de survitesse la roue polaire de l'alternateur monophasé destiné à la centrale hydroélectrique de Rapperswil-Auenstein. Cette roue s'est parfaitement comportée à la vitesse d'emballlement de 280 t/min. L'importance de cet essai extraordinaire de force peut être estimée en tenant compte que la roue, d'un poids de 225 t, ne tourne en service normal qu'à 100 t/min et que la force centrifuge, lors de l'épreuve susmentionnée, atteint environ 8 fois la valeur qu'elle a en service normal. Pour pouvoir exécuter avec sécurité cet essai qui engendre une telle sollicitation mécanique et qui doit éventuellement déceler avant la mise en service, sans aucune indulgence, un défaut caché, la vitesse a été augmentée graduellement à sa valeur maximum, en faisant des mesures en 200 points différents lors de chaque augmentation de vitesse, pour rechercher si le matériel avait éventuellement subi quelque part un allongement permanent. Lors du dernier essai décisif, il a fallu pour arriver à la vitesse d'emballlement que le moteur fournisse une puissance maximum de 1600 kW pendant 20 minutes. Après avoir atteint la vitesse prescrite, on l'a maintenue pendant deux minutes. Pendant ce temps chaque point de la périphérie de cette

roue polaire, d'un diamètre de 7 m, a parcouru 100 m à la seconde = 360 km/h et une force centrifuge en chiffre rond de 1000 t a agi sur chacun des 20 pôles d'un poids unitaire de 3,5 t, ce qui correspond au poids de dix locomotives de trains express.

Pour réduire les pertes de ventilation, on avait placé autour de la roue, pendant ces essais, un solide coffrage en bois, qui devait supporter une pression d'air de 375 kg/m<sup>2</sup> durant la pleine vitesse. Il faut mentionner que la puissance consommée par le moteur à la vitesse maximum, l'accélération étant terminée, n'a été que de 400 kW. Sans ce coffrage la puissance nécessaire aurait été de presque 3000 kW, car cette roue polaire en tournant à une si grande vitesse aurait agi comme un ventilateur centrifuge gigantesque dont la plus grande partie de la résistance de rotation de la ventilation. Le frottement au glissement dans les deux paliers a été par contre extraordinairement faible, pendant la vitesse d'emballlement. En effet cette roue polaire malgré son poids énorme et après la mise en marche de la pompe à huile, qui refoule au démarrage l'huile sous 100 kg/cm<sup>2</sup> en dessous des tourillons des paliers, a pu être facilement mue par une jeune fille. Ceci prouve que les films de l'huile sous pression dans les paliers remplissent parfaitement leur fonction de lubri-

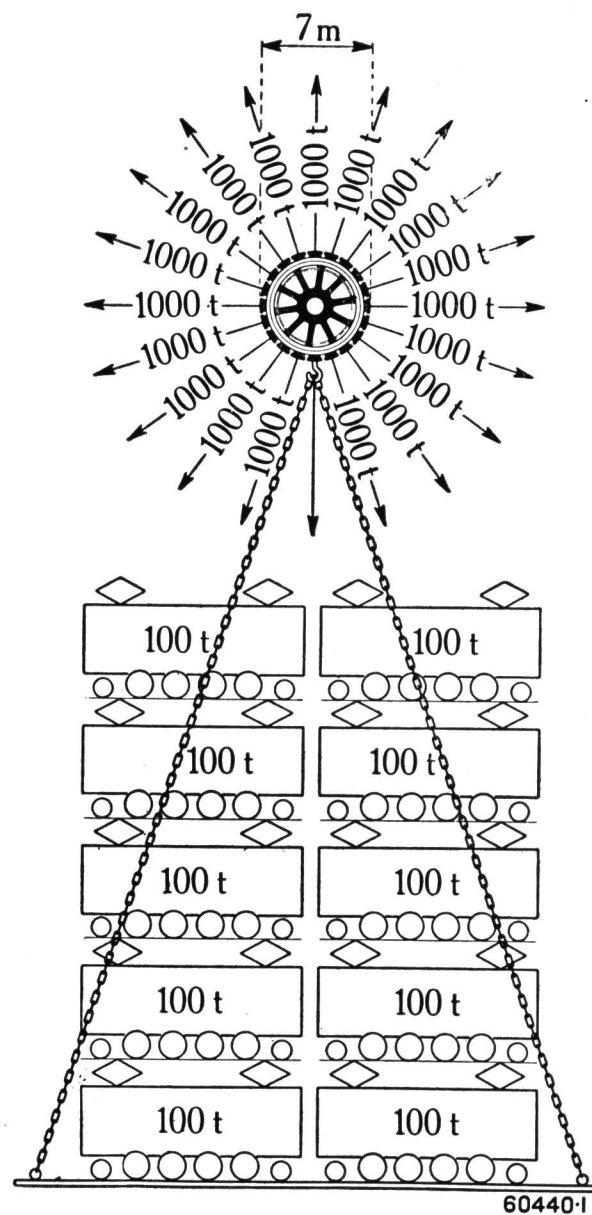


Fig. 1. — Représentation schématique de la roue polaire avec les forces centrifuges des 20 pôles agissant pendant la vitesse d'emballlement de 280 t/min.

Ces forces atteignent pour chacun des pôles, d'un poids de 3,5 t, un chiffre rond de 1000 t, ce qui correspond au poids de dix locomotives électriques de trains rapides.





Fig. 2. — Vue de la roue polaire sans coffrage après l'essai de survitesse.

Le frottement des paliers était si petit dès la mise en marche de la pompe à huile après le démarrage que la roue a pu être mise en mouvement lentement mais avec facilité par la jeune fille que l'on voit à droite.

fication. Le frottement était en fait si petit qu'il a été possible d'équilibrer très exactement la roue à 100 g près. Si on se représente les sollicitations habituelles auxquelles sont soumises des roues polaires d'une telle grandeur, lors de l'essai de survitesse, on en déduit comme

#### *conclusion*

que nous avons affaire ici avec des prescriptions d'essais qui n'ont pas leurs pareilles dans la construction des machines. Il faut encore relever que ces efforts n'atteignent pas la valeur limite pour laquelle la machine doit être construite, car lors de la sollicitation huit fois plus grande que la normale, provoquée par la force centrifuge, la matière doit être soumise seulement aux deux tiers de sa limite d'élasticité. De plus il existe toujours, à la vitesse d'essai, un très important facteur de sécurité qui renferme une certaine « réserve cachée » parce que la vitesse maximum d'une grande machine ne peut pas être exactement déterminée sur la base des essais usuels et que le constructeur de la turbine s'est aussi réservé une certaine marge de sécurité. Si pendant le calcul on insiste surtout sur la vitesse d'emballement, c'est que l'on admet que si la commande de la turbine faisait défaut par suite de grosses pièces de bois qui se seraient introduites entre les aubes du diffuseur (ce qui du reste ne serait possible que si des barreaux de la grille étaient défectueux) la machine pourrait s'emballer en même temps que l'alternateur serait déchargé. Il faut pourtant bien relever que l'on ne calcule aucune autre machine

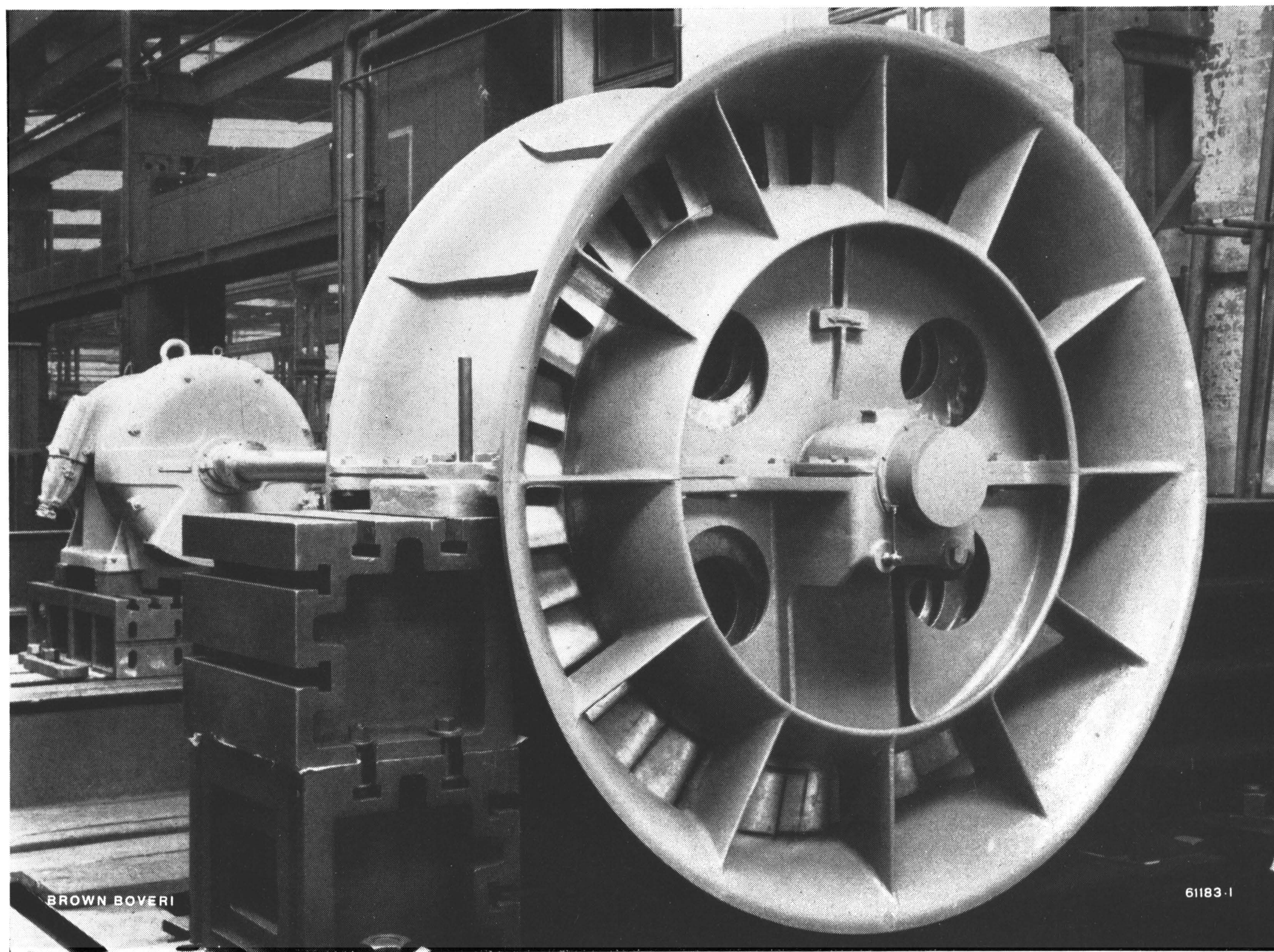
en admettant une telle coïncidence de plusieurs facteurs défavorables. Si on le faisait tout progrès technique serait arrêté à plus d'un point de vue. A titre de comparaison, on peut indiquer que les turbines à vapeur et les turbo-générateurs sont soumis à un essai de survitesse dépassant seulement de 25 % la vitesse nominale et que l'on se fie totalement au fonctionnement du dispositif à fermeture rapide, bien que si ce dernier faisait défaut la vitesse d'emballement, c'est-à-dire 1,7 jusqu'à 2 fois la vitesse normale, serait effectivement atteinte et ainsi les sollicitations usuelles seraient de beaucoup dépassées. Cependant on ne fait pas habituellement pour ces autres machines des essais à des vitesses plus élevées que celles mentionnées et il ne serait guère possible de construire des machines de ce genre qui soient rentables s'il fallait les exécuter pour les essayer à la vitesse d'emballement.

Sans méconnaître les difficultés que les constructeurs des turbines hydrauliques auraient à vaincre pour construire sans dépenses exagérées un dispositif à fermeture rapide fonctionnant sûrement en cas d'emballement des turbines hydrauliques à basse pression, nous croyons cependant qu'il serait possible de résoudre ce problème. Cela faciliterait le progrès technique et le constructeur pourrait construire ces machines d'après les principes admis pour la construction des autres machines, au lieu d'être obligé de calculer avec des facteurs de sécurité qui ne sont exigés pour aucun autre genre de machine.

(MS 780)

F. O. Weber. (C. C.)





Soufflante axiale destinée à produire un flux d'air pour refroidir des moteurs d'avion dans un stand d'essais ouvert.

Cette soufflante débite environ  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  d'air et élève la pression à 450 mm de colonne d'eau. Elle est entraînée par un moteur de 230 kW à 1475 t/min, à vitesse réglable au moyen d'une résistance, entre 100 et 70 % du nombre de tours normal. Nous avons livré des groupes de soufflantes semblables, mais de plus grand diamètre, pour produire le flux principal d'air dans de grandes souffleries subsoniques. Il existe en France une installation (voir Revue Brown Boveri n° 7/8 de 1943, pages 168—175) dont la roue de la soufflante, à 12 aubes, atteint un diamètre de 8 m et qui est entraînée directement (vitesse synchrone 300 t/min) par un moteur asynchrone triphasé de 4750 CV, 5500 V, 330 t/min (vitesse hypersynchrone). On emploie pour régler la vitesse d'une façon économique, il s'agit d'un service continu, une machine Brown Boveri Scherbius. Par contre en cas de service intermittent, on règle la vitesse au moyen d'une résistance.

### Transformateurs triphasés à huile pour l'usine électrique de Lucendo.

(Voir la figure de la couverture.)

Indice décimal 621.314.21 (494.56)

Pour transformer l'énergie produite par l'usine électrique d'Airolo et qui doit être transmise à la ligne du Gothard, nous avons livré en automne 1944, deux grands transformateurs chacun de 31 MVA à 11 kV/160 et 145 V.

Comme le montre la figure de la couverture de ce fascicule, la construction des enroulements de ces transformateurs est exemplairement simple, ce qui est avantageux en ce qui concerne la résistance contre les courts-circuits. Grâce à notre nouvelle exécution avec un isolement à bride écartée, le transformateur, rempli d'huile et chargé sur un wagon surbaissé, reste dans le gabari des chemins de fer; il suffit d'enlever les parties accessoires extérieures, les traversées primaires et secondaires ainsi que le chariot. Par suite les travaux de montage et les dépenses à pied d'œuvre sont réduits à un minimum et il ne faut plus refaire les travaux pour évacuer l'huile, ce qui demande toujours beaucoup de précaution et de temps lorsqu'il s'agit d'un transformateur à haute tension.

(MS 595)

A. Danz. (C. C.)

### Un aubage à réaction est comme neuf après 18 ans de service.

Indice décimal 621.165—253.5

Il a paru dans la Revue Brown Boveri de 1927, n° 12, page 327, un article intitulé «La première installation thermique à haute pression en service industriel en Suisse». L'installation qui y est décrite appartient à la teinturerie Jenny & Co. à Aarau et comprend une turbine à contre-pression Brown Boveri, exécution combinée, en chiffre rond de 400 kW, qui entraîne au moyen d'un engrenage une génératrice. Ce turbo-groupe fournit le courant pour les moteurs et l'éclairage de cette teinturerie. Cette turbine est la seule machine motrice et elle a fourni un service quotidien ininterrompu pendant 18 ans sans aucune perturbation.

Au cours de l'été dernier, on a soumis cette turbine à une révision faite à fond. Il en est résulté que, malgré plus de 50 000 h de service, aucune partie n'aurait dû être remplacée par suite d'usure. Cependant des corps étrangers avaient détérioré quelques tuyères et des aubes à action, il a donc fallu les remplacer. Par contre les vingt rangées d'aubes à réaction en acier inoxydable étaient en tout point comme neuves. Ces faits prouvent à nouveau la qualité et la longévité de nos aubages à réaction.

(MS 594)

G. Broggi. (C. C.)



# TABLE DES MATIÈRES — ANNÉE 1944.

<b>Généralités</b>	Pages	<b>Génératrices et moteurs</b>	Pages
Progrès constructifs réalisés par la Société Anonyme Brown, Boveri & Cie au cours de l'année 1943 . . . . .	3	Alternateurs *) . . . . .	15
Régulateur de pression d'extraction pour usines à gaz *) . . . . .	14	L'alternateur à moyenne fréquence . . . . .	160
<b>Matériaux et essais de matériaux</b>		Moteurs triphasés à collecteur à caractéristique shunt de faible puissance, construction Brown Boveri . . . . .	196
Trente ans de service des installations à survitesse de la Société Anonyme Brown, Boveri & Cie à Baden . . . . .	163	Moteurs « autarchiques » . . . . .	211
Influence de l'inclinaison d'une soudure par rapport à la direction des contraintes principales sur la résistance à la traction . . . . .	187	Le dynamomètre comme instrument de mesure . . . . .	378
L'installation de survitesse au service des clients, des constructeurs et des laboratoires d'essais des matériaux . . . . .	371	De l'échauffement et de la ventilation des machines électriques . . . . .	383
Essais de survitesse faits avec succès sur une grande roue polaire . . . . .	404	La protection des alternateurs contre les défauts à la terre . . . . .	392
<b>Engrenages et éléments de machines</b>		<b>Transport d'énergie à haute tension</b>	
Engrenages et accouplements à dents *) . . . . .	77	Transport, distribution et transformation d'énergie électrique *) . . . . .	25
		La stabilité statique d'un réseau avec plusieurs machines synchrones . . . . .	166
<b>Vapeur</b>		<b>Transformateurs</b>	
<b>Générateurs de vapeur Velox</b>		Transformateurs *) . . . . .	26
Installations Velox *) . . . . .	5	Transformateurs qui après 19 ans de service ne nécessitent aucune remise en état . . . . .	354
Chaudières Velox marines *) . . . . .	94	Comment les transformateurs avec enroulements en aluminium ont-ils fait leurs preuves en service ? . . . . .	376
Nouvelle installation pour la production de force motrice et de vent, avec générateur de vapeur Velox à gaz de haut fourneau, dans une aciérie . . . . .	235	Transformateur portatif pour dégeler les conduites d'eau . . . . .	402
Expériences de service avec un générateur de vapeur Velox sur le paquebot mixte français « Athos II » . . . . .	367	Transformateurs triphasés à huile pour l'usine électrique de Lucendo . . . . .	406
<b>Chaudières électriques *)</b>		<b>Mutateurs</b>	
Chaudières électriques *) . . . . .	65	Mutateurs *) . . . . .	36
<b>Turbines à vapeur</b>		Les avantages des mutateurs sans pompe dans les sous-stations de traction . . . . .	110
Turbines à vapeur *) . . . . .	8	Nouvelles installations de mutateurs dans les industries métallurgiques et chimiques suisses . . . . .	131
Turbines à vapeur marines *) . . . . .	94	L'essor des mutateurs à ventilation forcée, système Brown Boveri . . . . .	215
Auxiliaires de bord avec petites turbines . . . . .	96	La plus ancienne et la plus moderne installation de mutateurs de Suisse . . . . .	237
Turbines à faible puissance pour augmenter la capacité des centrales industrielles . . . . .	126	La sous-station des Chevalleyres est équipée d'un mutateur sans pompe . . . . .	273
Les turbines à vapeur Brown Boveri avec basse pression à double flux s'avèrent excellentes . . . . .	156	Un mutateur sans pompe avec refroidissement à air a fonctionné pendant trois ans avec succès dans un service de traction . . . . .	379
Un aubage à réaction est comme neuf après 18 ans de service . . . . .	406	Le dixième anniversaire de la désignation « mutateur » . . . . .	402
<b>Réglage des turbines à vapeur et à gaz et chaudières</b>		<b>Isolants, isolateurs, conducteurs</b>	
Dispositifs de réglage *) . . . . .	13	Sollicitation électrodynamique de deux conducteurs parallèles . . . . .	353
Appareil pour l'étude des réglages . . . . .	228	<b>Disjoncteurs et installations de distribution</b>	
Fonctionnement et essai du régulateur de vitesse pour turbine . . . . .	236	Disjoncteurs *) . . . . .	31
Le niveaumètre . . . . .	270	Installations de distribution *) . . . . .	35
<b>Turbines à gaz et groupes de suralimentation</b>		Les disjoncteurs d'extérieur soumis aux plus rudes intempéries . . . . .	107
Turbines à combustion *) . . . . .	12	Le perfectionnement des disjoncteurs pneumatiques ultra-rapides d'intérieur . . . . .	141
Locomotive à turbine à combustion *) . . . . .	85	L'importance de la rapidité de coupure dans les installations électriques . . . . .	359
Turbines à gaz pour la marine *) . . . . .	94	<b>Protection, réglage et couplage</b>	
Les applications actuelles de la turbine à combustion . . . . .	173	Protection des réseaux *) . . . . .	29
Considérations sur les résistances au mouvement des véhicules de chemin de fer en relation avec des relevés dynamométriques pour déterminer la résistance à l'avancement de la locomotive turbine à gaz Brown Boveri . . . . .	200	Relais *) . . . . .	34
Diminution de l'encrassement des conduites à gaz lors d'un fonctionnement aux gaz de bois avec suralimentation . . . . .	274	La protection des installations industrielles à basse tension . . . . .	152
Application de la turbine à combustion pour la propulsion des navires . . . . .	350	Toujours davantage de régulateurs Brown Boveri à contacts roulants . . . . .	156
La suralimentation avec turbine à gaz d'échappement pour les moteurs Diesel des véhicules routiers . . . . .	400	Un nouveau dispositif de synchronisation rapide . . . . .	183
<b>Soufflantes, compresseurs, thermopompes (machines frigorifiques et calorifiques)</b>		Progrès dans la construction des relais . . . . .	210
Compresseurs et soufflantes *) . . . . .	66	La fréquence des amorçages des parafoudres à résorbit . . . . .	221
Ménageons nos ressources à l'aide de thermo-compresseurs ! . . . . .	127	Le réglage des machines motrices et la répartition de la charge dans les réseaux interconnectés . . . . .	243
Comment chauffer à l'aide d'une thermopompe une usine avec de la chaleur prélevée de l'eau froide d'une rivière . . . . .	238	Dimensions et protection des conducteurs de raccordement des moteurs . . . . .	340
Turbo-compresseur en service depuis 27 ans . . . . .	380	L'importance de la rapidité de coupure dans les installations électriques . . . . .	359
<b>Electricité</b>		La protection des alternateurs contre les défauts à la terre . . . . .	392
<b>Usines électriques</b>		<b>Essais et mesures</b>	
La participation de Brown Boveri à l'équipement de l'usine de Verbois (Genève) . . . . .	103	Nouvel appareil de contrôle pour relais secondaires . . . . .	205
Exploitation économique des centrales de moyenne puissance grâce à la télécommande et à l'automatisme . . . . .	222	Un dispositif de laboratoire destiné aux écoles . . . . .	356
Augmentation de la production d'énergie d'une petite usine hydro-électrique en Suisse . . . . .	373	Le dynamomètre comme instrument de mesure . . . . .	378
		<b>Commandes et dispositifs de démarrage</b>	
		Application du matériel Brown Boveri à l'industrie et à l'agriculture *) . . . . .	40
		L'électro-enrouleuse dans l'industrie du papier . . . . .	113
		Les avantages du réglage progressif de la vitesse . . . . .	127
		Le démarrage étoile-triangle renforcé pour moteurs avec induit en court-circuit . . . . .	139

\*) Progrès constructifs réalisés au cours de l'année 1943.



	Pages
Importante livraison de moteurs pour chaufferie . . . . .	182
Moteurs triphasés à collecteur à caractéristique shunt de faible puissance, construction Brown Boveri . . . . .	196
Moteurs « autarchiques » . . . . .	211
Commande électrique à réglage progressif de la vitesse pour machines-outils . . . . .	251
Dispositif transportable pour meuler les aiguilles et rails soudés . . . . .	379
<b>Traction électrique, tramways, trolleybus, chariots électriques</b>	
Traction électrique et éclairage des trains *) . . . . .	78
Le freinage à récupération des voitures de chemins de fer à courant monophasé . . . . .	119
Considérations au-dessus de la mobilité de résistance des voitures de chemins de fer . . . . .	200
Expériences faites en service avec les voitures motrices légères série 401 des tramways de Zürich . . . . .	208
Augmentation de la puissance d'automotrices existantes de tramways et chemins de fer vicinaux . . . . .	233
Nouvelles automotrices pour les chemins de fer fribourgeois et le Montreux-Oberland bernois . . . . .	267
Nouveaux wagons-restaurants des Chemins de fer fédéraux suisses avec installations de cuisine et de chauffage complètement électriques . . . . .	355
Nouvelle disposition de la commande des chariots électriques . . . . .	375
Dispositif transportable pour meuler les aiguilles et rails soudés . . . . .	379
<b>Applications thermiques de l'électricité (avec fréquence industrielle, fréquence moyenne et haute fréquence)</b>	
Fours électriques *) . . . . .	61
Utilisation des fréquences moyennes dans l'industrie . . . . .	159
Le durcissement des matières plastiques artificielles dans le champ électrique à haute fréquence . . . . .	298
Le traitement superficiel des pièces métalliques, en particulier la trempe superficielle de l'acier par les courants à haute fréquence . . . . .	306
Le four électrique à chariot dans l'industrie de la céramique . . . . .	345
Transformateur portatif pour dégeler les conduites d'eau . . . . .	402
<b>Soudure électrique</b>	
Soudure électrique *) . . . . .	58

	Pages
<b>Radiocommunications, télécommandes et télémesures</b>	
Haute fréquence, télécommunications et télécommandes *) . . . . .	86
Nouveau système de commande à distance centralisée . . . . .	151
Transmission de valeurs de mesures, sur lignes et distances quelconques . . . . .	209
Postes émetteurs de construction spéciale pour radiodiffusion, trafic télégraphique et téléphonique à grandes distances . . . . .	281
Au sujet des multiples possibilités d'emploi des transmissions par ondes dirigées . . . . .	288
Travaux d'études du domaine des ondes décimétriques . . . . .	292
L'influence mutuelle de deux ondes modulées en fréquence dans un limiteur d'amplitude . . . . .	296
Tubes d'émission scellés et leur fabrication . . . . .	309
Nos tubes scellés de petite puissance . . . . .	313
Au sujet des cristaux piézoélectriques et de leur emploi dans les filtres . . . . .	316
Modulation et transformateurs de modulation . . . . .	323
Nouveau transformateur d'adaptation pour haute fréquence . . . . .	327
Filtres électriques à inductances et condensateurs pour fréquences inférieures à 60 kc/s . . . . .	329
Noyaux magnétiques Brown Boveri en poudre de fer agglomérée, pour fréquences de 1 à 100 kc/s . . . . .	331
Les télécommunications pour courants porteurs à haute fréquence au service des réseaux de transport d'énergie . . . . .	335
Influence du givre sur la propagation des ondes à haute fréquence le long des conducteurs à haute tension . . . . .	362
<b>Machines de propulsion pour la marine et auxiliaires de bord</b>	
Chaudières Velox marines *) . . . . .	94
Turbines à vapeur marines *) . . . . .	94
Turbines à gaz pour la marine *) . . . . .	94
Auxiliaires de bord *) . . . . .	96
Propulsion électrique *) . . . . .	100
Application de la turbine à combustion pour la propulsion des navires . . . . .	350
Expériences de service avec un générateur de vapeur Velox sur le paquebot mixte français « Athos II » . . . . .	367

## LISTE DES ILLUSTRATIONS HORS TEXTE — ANNÉE 1944.

	Pages
<b>Turbines à vapeur</b>	
Depuis plus de 37 ans en service . . . . .	125
Turbo-groupe moderne monocylindrique sur la plate-forme d'essais . . . . .	209
<b>Soufflantes et groupes de suralimentation</b>	
Soufflante axiale à étages multiples avec train d'engrenages . . . . .	157
Les groupes de suralimentation à gaz d'échappement Brown Boveri . . . . .	334
Soufflante axiale destinée à produire un flux d'air pour refroidir des moteurs d'avion dans un stand d'essais ouvert . . . . .	406
<b>Engrenages pour la marine</b>	
Grandes roues d'un train d'engrenage pour la marine d'environ 4 m de diamètre, chargées sur wagon spécial . . . . .	403
<b>Transformateurs</b>	
Un des deux transformateurs triphasés pour l'usine électrique de Lucendo . . . . .	331
<b>Alternateurs</b>	
Salle des machines d'une usine hydroélectrique moderne avec génératrices Brown Boveri . . . . .	24
23 ans en service ininterrompu sans avaries . . . . .	181
Grand alternateur en construction . . . . .	207
Rotor de 225 t pour l'alternateur monophasé de 25 000 kVA destiné à l'usine électrique de Rapperswil-Auenstein, aux essais de survitesse . . . . .	333
<b>Laboratoires de haute tension et installations d'essais à haute tension</b>	
Laboratoire de haute tension . . . . .	1
Une vue étrange de notre générateur de chocs pour décharges à front raide de 2 400 000 V . . . . .	27
Groupe mutateur à haute tension avec refroidissement en circuit fermé pour une installation d'essai d'un transport d'énergie à courant continu . . . . .	213
Arc à 400 000 V avec 300 000 kVA de puissance de court-circuit dans notre station d'essais à grande puissance . . . . .	357
<b>Contacteurs</b>	
Montage de contacteurs . . . . .	101

\*) Progrès constructifs réalisés au cours de l'année 1943.

	Pages
<b>Protection et réglage</b>	
Régulateur à un seul secteur Brown Boveri . . . . .	186
Un des nombreux emplois du régulateur à action rapide Brown Boveri . . . . .	242
La protection sélective rapide Brown Boveri . . . . .	358
<b>Appareils de mesure</b>	
Essais et étalonnage des ampèremètres de barres . . . . .	129
<b>Traction et tramway</b>	
Voiture motrice légère des tramways de Zurich avec remorques . . . . .	185
Train léger du Chemin de fer Montreux-Oberland Bernois . . . . .	241
Les groupes de suralimentation à gaz d'échappement Brown Boveri . . . . .	334
<b>Application thermique de l'électricité</b>	
Le sécheur universel Brown Boveri avec récupération de la chaleur . . . . .	158
Coulée d'un four électrique Brown Boveri dans une fonderie . . . . .	370
<b>Soudure électrique</b>	
Machines à souder à la molette Brown Boveri . . . . .	130
<b>Radiocommunications, télécommandes et télémesures</b>	
Vue partielle de l'étage final de la haute fréquence d'un émetteur à ondes courtes de 10 kW . . . . .	102
Essais d'un générateur d'ondes micrométriques avec lampes « turbator » . . . . .	166
Emetteur à ondes courtes de 10 kW. Accord des étages préliminaires à haute fréquence . . . . .	214
Triode d'émission de 10 kW refroidie par air, utilisable en ondes ultra-courtes . . . . .	277
Raccordement d'une installation de téléphonie par courants porteurs à haute fréquence à une ligne de 65 kV . . . . .	278
Bobine d'inductance pour couplage d'antenne d'un poste émetteur de radio-diffusion de 10 kW . . . . .	280
Câblage d'un petit émetteur à ondes ultra-courtes à modulation en fréquence . . . . .	297
<b>Cinéma</b>	
Cabine de projection d'un grand cinéma . . . . .	275