

Zeitschrift:	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber:	Association suisse des électriciens
Band:	30 (1939)
Heft:	9
Artikel:	La sous-station Lütschental à mutateur triphasé-triphasé du Chemin de fer de la Jungfrau
Autor:	Kern, E.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1058351

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

ADMINISTRATION:

Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 5 17 42
Chèques postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXX^e Année

N^o 9

Vendredi, 28 Avril 1939

La sous-station Lütschental à mutateur triphasé-triphasé du Chemin de fer de la Jungfrau.

Par E. Kern, Ennetbaden.

621.314.27

La sous-station Lütschental, équipée par les soins de la Sté An. Brown, Bovéry et Cie pour le couplage de réseaux, constitue la première installation de ce genre. Construite pour une puissance nominale de 1600 kW, elle sert aux échanges d'énergie entre le réseau à 40 pér./s de la Société du Chemin de fer de la Jungfrau et celui à 50 pér./s des Forces motrices bernoises. L'auteur fait tout d'abord l'histoire de cette sous-station, qui ne comporte qu'un seul mutateur, puis en décrit brièvement la construction et le mode de fonctionnement. En conclusion, les résultats d'exploitation et le fonctionnement du groupe en régime perturbé sont enfin passés en revue.

Die von der A.-G. Brown, Bovéry & Cie. in Baden gebaute Netzkupplungs-Anlage Lütschental ist eine Erstausführung. Sie dient dem Energieaustausch zwischen dem 40-Hz-Netz der Jungfraubahn-Gesellschaft und dem 50-Hz-Netz der Bernischen Kraftwerke. Ihre Nennleistung beträgt 1600 kW. Einleitend wird über die Entstehungsgeschichte dieser Anlage berichtet. Sodann orientiert ein summarischer Ueberblick über den Aufbau und die Wirkungsweise der Gruppe, die einen einzigen Mutator enthält. Die Betriebsresultate und das Verhalten der Anlage bei inneren und äusseren Störungen werden kurz erläutert.

(Traduction.)

Le caractère infiniment varié de l'Oberland bernois, unissant à la poésie des lacs préalpins la splendeur des plus hauts glaciers, a dès longtemps conquis les touristes les plus exigeants. En été, l'amauteur de repos aussi bien que le montagnard éprouvé y trouvent de quoi satisfaire leurs aspirations, tandis qu'en hiver des champs de neige d'une beauté incomparable procurent au skieur les joies les plus raffinées. C'est aussi le pays des chemins de fer de montagne, parmi lesquels celui de la Wengernalp conduit à la Petite Scheidegg, de renommée universelle, tandis que la reine des lignes de montagne, celle de la Jungfrau¹⁾, conçue et financée par le banquier zurichois Guyer-Zeller, dépose le touriste sur le Jungfraujoch même, d'où l'on jouit d'un panorama grandiose. Depuis que l'Oberland bernois a ainsi été rendu accessible au sport du ski, le trafic des lignes entièrement électrifiées a subi un tel accroissement à certaines périodes que leur consommation d'énergie a dépassé toutes les prévisions. Or, ces pointes de charge se présentent justement aux périodes-mêmes où la fourniture d'énergie par les centrales hydroélectriques de cette région tombe à son minimum hivernal. La Sté du Chemin de fer de la Jungfrau, propriétaire de ces usines, se trouva par conséquent contrainte de prévoir une nouvelle réserve d'énergie susceptible de compenser la différence entre les pointes de consommation et la diminution hivernale d'énergie des centrales. Etant donné d'une part que non seulement la ligne de la Jungfrau mais encore les sous-stations des autres chemins de fer branchées sur

le même réseau, ainsi que les secteurs des communes avoisinantes, sont exploités en courant triphasé à 40 pér./s, et que d'autre part une transformation de toutes ces installations pour la fréquence 50 pér./s aurait occasionné de très fortes dépenses, leur alimentation directe en énergie à 50 pér./s par le réseau local des Forces motrices bernoises s'avéra

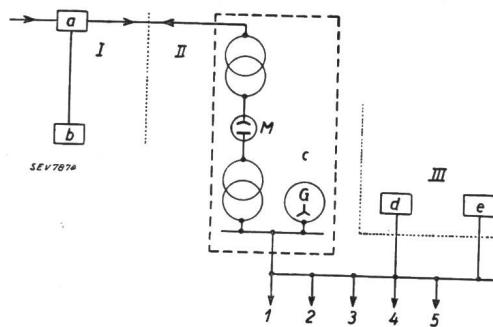


Fig. 1.
Distribution des divers réseaux accouplés à la sous-station Lütschental.

I Forces motrices bernoises.

II Sté du Chemin de fer de la Jungfrau.

III Centrale de Lütschental. M Sous-station de mutateur.

G Salle des alternateurs.

Lignes de départ: 1 Chemin de fer Lauterbrunnen-Mürren.
2 Chemin de fer de la Schynige Platte. 3 Chemin de fer de l'Oberland bernois. 4 Chemin de fer de la Wengernalp.

5 Chemin de fer de la Jungfrau.

III Forces motrices de Lauterbrunnen.
d Centrale de Lochbrücke. e Centrale de Stechelberg.

impraticable. Après une étude approfondie de la question, la Cie du chemin de fer de la Jungfrau, encouragée par les publications parues dans la presse technique²⁾, décida, en juin 1938, d'en-

¹⁾ Voir Liechti: Les Chemins de fer de montagne de la région de la Jungfrau, Bulletin ASE 1937, No. 26, p. 665.

²⁾ Voir Bulletin ASE 1936, No. 24, p. 690, et Revue Brown Bovéry 1934, p. 214.

treprendre le couplage de son réseau triphasé à 40 pér./s avec celui également triphasé des Forces motrices bernoises à 50 pér./s à l'aide d'un groupe

des fluctuations de fréquence pouvant se présenter dans les deux réseaux interconnectés. La disposition de la sous-station ressort des figures 2 et 3, tandis que son schéma de principe est représenté à la figure 4. L'installation complète, avec tout l'appareillage et les services auxiliaires a un encombrement de 90 m². En principe, la sous-station se compose du transformateur d'entrée, connecté au réseau primaire fournisseur d'énergie; du mutateur avec ses organes de commande et de réglage; du transformateur de sortie, branché sur le réseau secondaire consommateur d'énergie; de la self d'équilibrage et de la self d'égalisation. Chacune des phases de l'un des réseaux est accouplée à demeure avec une phase correspondante de l'autre réseau. La différence entre les deux tensions continues hypothétiques, inaccessibles à toute mesure et résultant des tensions des réseaux, est absorbée par la bobine de self d'équilibrage 6 et par la self d'égalisation 5. La puissance transmise d'un réseau à l'autre dépend principalement des

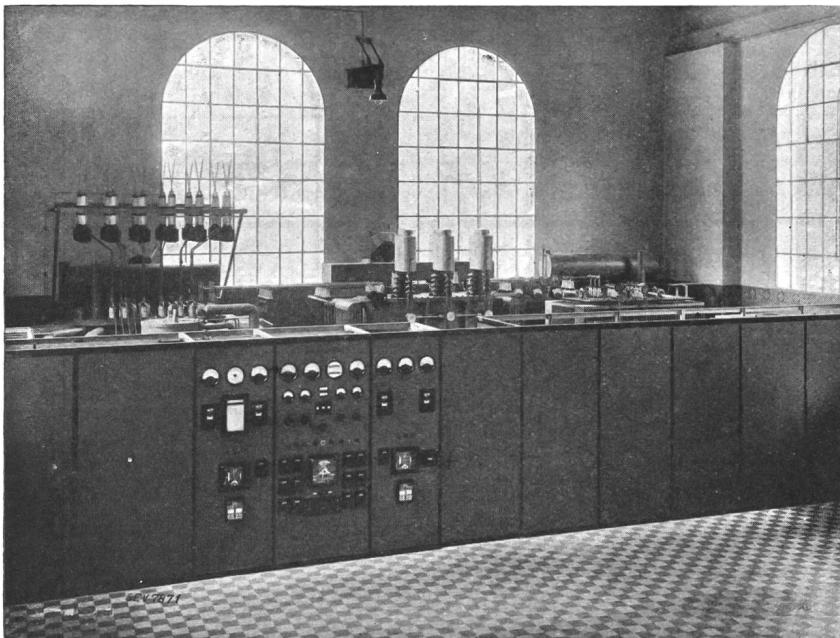


Fig. 2.
Vue générale de la sous-station Lütschental.

mutateur. Etant donné l'absence de toute référence d'installation similaire, cette décision est le meilleur gage de la confiance dont fut gratifié notre projet et du bel esprit d'entreprise qui anima la direction d'exploitation de cette ligne. Le but de cette sous-station, construite pour une puissance nominale de 1600 kW, est de permettre un échange d'énergie entre les deux réseaux considérés, aussi bien dans un sens que dans l'autre. L'installation satisfait en outre à une exigence particulière, soit de pouvoir être utilisée comme groupe mutateur alternatif-continu de même puissance pour l'alimentation en courant continu à 1650 V de la ligne de la Wengernalp, pour le cas où l'on se déciderait ultérieurement à transformer le réseau à 40 en réseau à 50 pér./s, la sous-station de couplage de réseaux devenant ainsi superflue. Le couplage des deux réseaux est exécuté conformément au schéma de la figure 1.

2° Disposition et mode de fonctionnement.

La conversion d'énergie s'effectue à l'aide d'un seul mutateur, directement d'une fréquence à l'autre et sans avoir recours au courant continu comme forme intermédiaire d'énergie. Le système est absolument indépendant du rapport des fréquences et par suite

tensions alternatives imprimées aux anodes du mutateur et provenant des deux transformateurs ainsi que de la phase des tensions de grilles empruntées aux deux réseaux. En considération du facteur de puissance du groupe, basé soit sur la puissance du ré-

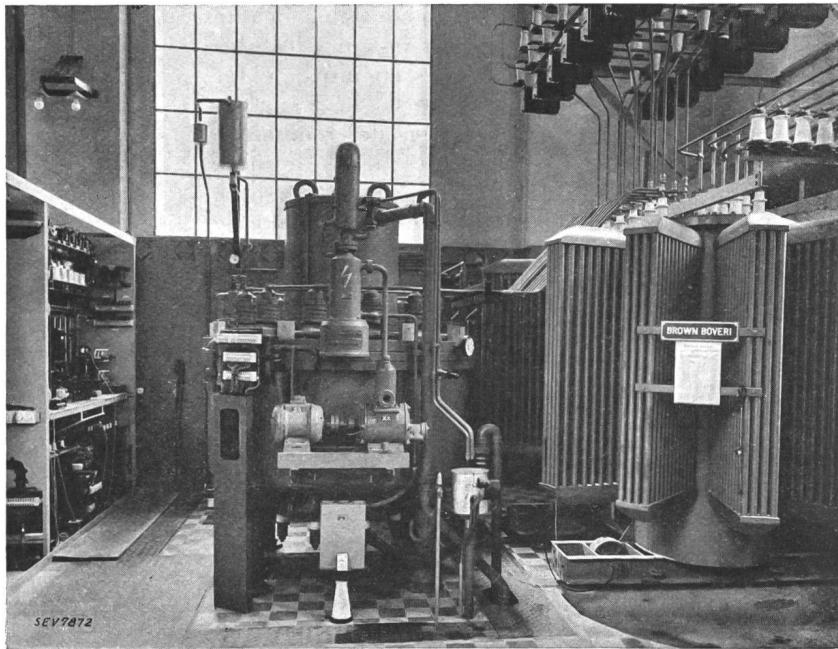


Fig. 3.
Vue du mutateur de la sous-station Lütschental.

seau d'alimentation, soit sur celle du réseau consommateur, l'un des deux transformateurs est muni d'un commutateur à gradins permettant de compen-

ser l'effet des fluctuations de tension se présentant en service normal dans les deux réseaux. Cet appareil est manœuvrable à la main, aussi bien qu'automatiquement par un relais sensible à tout écart dans le rapport des deux tensions alternatives imprimées aux anodes du mutateur, rapport fixé à une valeur bien déterminée. L'effet des fluctuations de la tension des réseaux sur la puissance transmise se trouve

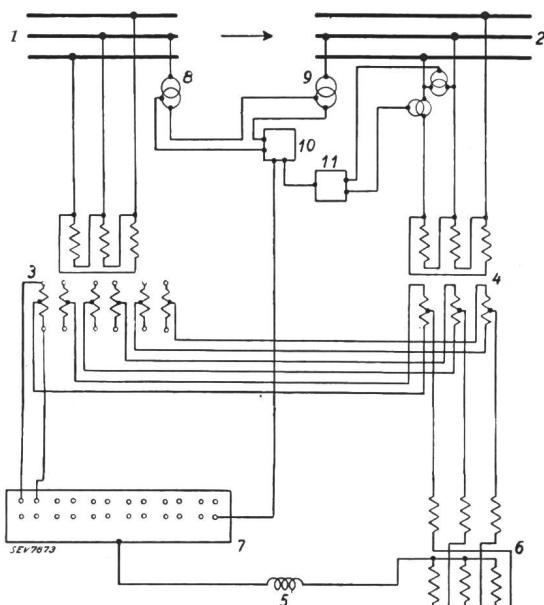


Fig. 4.

Schéma de principe de la sous-station Lütschenthal à mutateur triphasé-triphasé.

- 1 Réseau primaire triphasé à 50 pér./s. 2 Réseau secondaire triphasé à 40 pér./s. 3 Transformateur d'entrée, 50 pér./s. 4 Transformateur de sortie, 40 pér./s. 5 Bobine de self d'égalisation. 6 Bobine de self d'équilibrage. 7 Mutateur. 8, 9 Transformateur auxiliaire. 10 Appareillage de commande. 11 Régulateur.

ainsi compensé. De cette façon, la transmission d'énergie s'effectue à facteur de puissance pratiquement constant pour les deux réseaux interconnectés. Pour de plus amples détails concernant ce système, le lecteur voudra bien se référer à l'article paru précédemment sur ce sujet³⁾. Chacun des deux transformateurs est relié à son réseau correspondant par l'intermédiaire d'un disjoncteur dans l'huile muni de relais directs à maximum d'intensité. De plus, un disjoncteur ultra-rapide à courant continu avec déclenchement à maximum est inséré dans le circuit cathodique du mutateur. La bobine de self d'équilibrage et celle d'égalisation, à bain d'huile, sont logées dans un bac unique. Le mutateur est du type à 12 anodes, alimentées par les deux systèmes hexaphasés du transformateur auquel il est directement relié. La construction du mutateur, muni de grilles polarisées, correspond en tous points à celle d'un mutateur triphasé-continu d'exécution normale. L'eau de réfrigération du cylindre, circulant en circuit fermé sous l'effet d'une pompe, abandonne ses calories dans un réfrigérant à ventilation forcée. Le groupe ne consomme donc pas d'eau.

Les impulsions de tension nécessaires aux grilles de commande pour la conversion directe de courant

alternatif en courant alternatif de caractère différent sont engendrées sous une forme adéquate par un système dépourvu de tout organe rotatif et de tout appareil de contact. Cette méthode permet en outre, par comparaison directe de deux grandeurs électriques, d'adapter le fonctionnement du mutateur à n'importe quel programme de réglage, avec une puissance de réglage extrêmement faible. Les impulsions de polarisation sont produites dans de petits mutateurs auxiliaires de commande, sur lesquels s'exerce aussi l'influence du régulateur de puissance et de fréquence. Le principe de cette commande ayant déjà été donné dans un autre article⁴⁾, nous n'y reviendrons pas ici. Dans des installations du genre décrit, il s'agit en général soit de transmettre à l'aide du convertisseur une puissance constante indépendamment de fluctuations de tension et de fréquence, soit de régler la puissance du groupe en fonction de la fréquence de façon à éviter que les écarts de cette dernière ne dépassent une certaine valeur, soit enfin — et c'est le cas limite — de maintenir la fréquence de l'un des réseaux à une valeur constante à l'aide du groupe mutateur. Ce dernier cas se présente par exemple lorsque, comme à la sous-station Lütschenthal, un certain débit d'eau limité, constant et passager, doit être utilisé de façon optimum dans les groupes turbo-alternateurs du réseau consommateur, les pointes de consommation devant être couvertes par le groupe mutateur en empruntant à l'autre réseau la puissance d'appoint nécessaire. La grande sensibilité du mutateur de commande permet, par application aux grilles de ce dernier de tensions dépendant soit de la puissance soit de la fréquence, de réaliser n'importe quel programme de réglage de façon très simple, grâce à la très faible inertie de ce système.

3^e Résultats d'exploitation.

La mise en service de la sous-station, soit mise sous tension des services auxiliaires du mutateur, enclenchement des trois disjoncteurs principaux et enfin mise au point du groupe pour l'obtention d'un programme de réglage déterminé et d'une puissance donnée, s'effectue dans un laps de temps ne dépassant pas quelques secondes. Aucune comparaison de tensions, de fréquences ou d'autres grandeurs ne sont nécessaires: il suffit d'exécuter les diverses opérations de couplage dans un ordre déterminé. L'inversion du sens d'écoulement de l'énergie s'effectue, après avoir déclenché le disjoncteur continu du groupe, à l'aide de la simple manipulation d'un commutateur auxiliaire, après quoi le groupe peut être réenclenché de façon tout à fait normale. Le facteur de puissance présente une valeur moyenne de 91 % sur le réseau d'alimentation, et de 80 % sur le réseau consommateur. Les deux réseaux débiteront une puissance réactive inductive correspondant à ces facteurs de puissance. L'installation telle qu'elle est établie ne permet pas de fournir de l'énergie réactive inductive aux réseaux. Les rendements mesurés sont représentés graphiquement à

⁴⁾ Voir Revue Brown Boveri 1938, Nos 5 et 6, p. 103 et 124.

³⁾ Revue Brown Boveri 1934, No. 12, p. 214.

la figure 5. En se basant sur ces valeurs et sur une durée annuelle de service de 1000 heures en régime de pleine charge et de 3000 heures à demi-charge, le calcul des pertes annuelles prouve, en supposant le prix du kWh à 5 centimes, qu'il est possible de réaliser une économie d'énergie de quelque fr. 20 000.— par an, par rapport à une sous-station similaire à convertisseurs rotatifs. Les courants fournis ou absorbés par les réseaux interconnectés

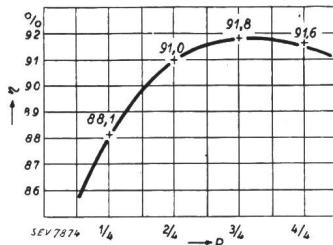
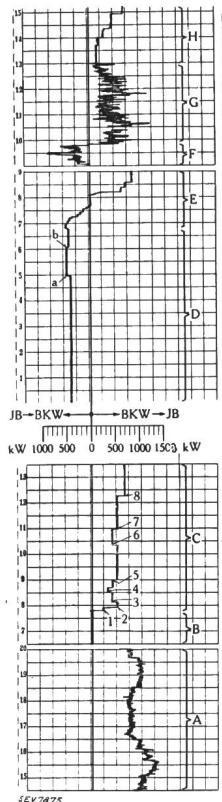


Fig. 5 (en haut).

Rendement de la sous-station Lütschenthal en fonction de la charge.

Fig. 6 (à droite).

Diagramme de puissance avec diverses méthodes de réglage.



par suite du fonctionnement du mutateur ont pratiquement la même forme et contiennent les mêmes harmoniques que ceux d'un mutateur hexaphasé normal. Comme on le sait, il est possible, dans le cas de groupes mutateurs de puissance plus élevée, d'améliorer la forme du courant alternatif en adoptant un nombre de phases plus élevé. L'installation est susceptible de surcharges de 30 % de la pleine charge pendant 1/2 h et de 50 % pendant 2 minutes. Le changement du sens d'écoulement de l'énergie est sans aucune influence sur la sollicitation des divers organes du groupe. La pleine puissance peut donc être transmise indifféremment dans les deux sens.

Quelques fragments de diagrammes de puissance relevés par un wattmètre enregistreur inséré du côté à 40 pér./s font l'objet de la figure 6. Il ressort d'une comparaison de la partie A, représentant la puissance transmise du réseau des Forces motrices bernoises à celui de la Jungfrau lors du réglage à la main, avec la partie C illustrant le diagramme de puissance lors du réglage par régulateur à tubes électroniques, que les fluctuations de puissance dues aux variations de tension des deux réseaux ont en-

tièrement disparu dans la partie C. Les gradins que l'on distingue en C ont été causés par des modifications à la main de la mise au point du régulateur. A titre de comparaison, on a indiqué en B l'épaisseur du trait du diagramme de puissance lorsque l'installation est déclenchée, d'où l'on déduit qu'en C le régulateur fonctionne avec une inertie pratiquement nulle. La partie D représente le sens inverse d'écoulement d'énergie, soit du réseau du Chemin de fer de la Jungfrau à celui des Forces motrices bernoises, tandis qu'en E la puissance est réglée par gradins jusqu'à zéro pour être augmentée à nouveau, dans le sens inverse, après commutation. Les parties F et G enfin, représentent le réglage à fréquence constante pour diverses conditions de service bien déterminées. Ce réglage implique la fourniture par le groupe mutateur de la puissance d'appoint variable, en-dessus ou en-dessous de la puissance fixe des alternateurs du réseau consommateur, et ceci dans les deux sens de transmission d'énergie.

En cas de perturbation au mutateur, soit retours d'amorçage aux anodes ou défauts d'amorçage aux grilles de commande, une surintensité se produit dans les diverses phases des deux transformateurs. Cette surintensité agit sur un relais de commande spécial à très faible inertie, lequel influence la commande de toutes les anodes de façon que ces dernières ne puissent s'amorcer que dans les intervalles de temps pendant lesquels les tensions des deux transformateurs sont opposées au courant. De cette manière, l'arc du mutateur est entièrement interrompu momentanément et se réamorce après un laps de temps de l'ordre de un à deux dixièmes de seconde, après quoi le service est rétabli. La perturbation est ainsi éliminée avec une rapidité telle qu'elle passe en général entièrement inaperçue dans les deux réseaux interconnectés et ne nuit en rien au service. Indépendamment de ce fait, la sous-station Lütschenthal a prouvé jusqu'à ce jour que de telles perturbations sont extrêmement rares et qu'elles ne peuvent donc être la cause d'aucun affaiblissement ou d'aucune détérioration de l'un quelconque des organes de l'installation. Le même processus se produit lorsque la tension du réseau consommateur disparaît par suite de courts-circuits. Si le déclenchement, par la protection sélective, du tronçon de réseau avarié s'effectue dans les limites aujourd'hui usuelles de quelques fractions de seconde, la puissance du groupe mutateur peut être rétablie aussitôt que la tension a repris sa valeur normale. Une diminution de tension dans le réseau d'alimentation n'a pour seule conséquence qu'une diminution de la puissance transmise, sans qu'il se produise pour cela de surintensité. Ce fonctionnement du groupe mutateur doit être attribué au fait que, lorsque le régulateur est bloqué, la puissance transmise dépend entre autres de l'équilibre entre les deux tensions alternatives imprimées aux anodes du mutateur. Tout accroissement de la tension du réseau d'alimentation et toute diminution de la tension du réseau consommateur impliquent une augmentation de la puissance transmise et vice versa.

Depuis sa mise en service, le 23 décembre 1938, la sous-station Lütschental a fonctionné chaque jour à pleine satisfaction.

En résumé, l'on peut affirmer à juste titre que cette première réalisation du couplage élastique de deux réseaux à courant triphasé de fréquences dif-

férentes à l'aide d'un seul mutateur satisfait à toutes les conditions posées lorsque cette installation fut projetée. Elle ouvre des voies nouvelles à la solution du problème du couplage élastique des réseaux à courant triphasé, tout en contribuant à le simplifier.

Ein Verfahren zur Messung der Lichtbogenspannung von Mutatoren.

Von A. Uno Lamm, Ludvika (Schweden)¹⁾.

621.317.32 : 621.314.65

Es wird eine erweiterte Wattmetermethode zur Messung des Lichtbogenabfalls beschrieben. Es werden die Einzelteile der Meßschaltung zur Erreichung einer bestimmten Genauigkeit berechnet.

L'auteur décrit une méthode wattmétrique perfectionnée pour la mesure de la chute de tension dans l'arc, et détermine par le calcul les éléments du montage, de façon à obtenir une précision de mesure donnée.

Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades von Mutatoren nach der direkten Messmethode erhält man bekanntlich Ergebnisse, die auch bei Anwendung der grössten Vorsichtsmassregeln recht unbefriedigend sind. Man sucht deshalb immer mehr, dieses Verfahren zu verlassen und bestimmt die Verluste der Mutatoranlage für ihre einzelnen Teile gesondert. Für die Mutatortransformatoren gibt es dabei einfache und leicht durchzuführende Verfahren, nicht aber für die Mutatoren selbst. Unter der grossen Zahl von Vorschlägen zur Messung der Lichtbogenverluste findet sich kaum einer, der für Abnahmemessungen wirklich geeignet wäre. Die üblichste Methode ist die oszillographische, trotz der erforderlichen teuren und unhandlichen Apparatur; sie gibt aber nicht einmal theoretisch die richtigen Ergebnisse, wenn man nicht ausserdem noch den Anodenstrom aufnimmt und die Produktkurve der beiden planimetriert. Einige Vorschläge mit Trockengleichrichter und Voltmeter sind zwar bequem durchzuführen, geben aber völlig falsche Ergebnisse, sobald Ueberlappung und Zündspannungsspitzen vorkommen. Am einfachsten und richtigsten erhält man den Lichtbogenabfall mit der Wattmetermethode. Dabei liegt die Stromspule in der Anodenleitung, die Spannungsspule zwischen Anode und Kathode. So misst das Wattmeter direkt die Lichtbogenverluste; dividiert man diesen Wert durch den mittleren Anodenstrom, so erhält man den richtigen Wert für den Lichtbogenabfall.

Die allgemeine Verwendung dieser Methode stösst aber auf das Hindernis, dass es gute Wattmeter für grosse Ströme nicht gibt. Man versuchte deshalb²⁾, Stromwandler zwischenzuschalten und vermied die Gleichstrommagnetisierung des Wandlers dadurch, dass man ihm zwei Primärwicklungen gab, die von zwei verschiedenen Anodenströmen in umgekehrter Richtung durchflossen wurden. Die hier behandelte Methode verwendet einen vollkommen normalen Stromwandler und vermeidet seine Gleichstrommagnetisierung durch einen Trockengleichrichter. Dadurch wird das Verhalten der Anordnung durchsichtiger und unabhängig von zufälligen Unsymmetrien in den Anodenströmen. Das Verfahren geht auf einen Vorschlag von W. B. Bat-

ten³⁾ zum Oszillographieren von Anodenströmen zurück.

Beschreibung der Schaltung.⁴⁾

Fig. 1 zeigt die Schaltung. Das Wattmeter *P* ist an einen normalen Stromwandler *T* angeschlossen. Das Gleichrichterelement *M* auf der Sekundärseite

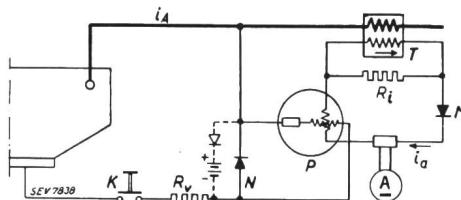


Fig. 1.

Schaltung der Messeinrichtung.

Die mit gestrichelten Linien gezeichnete Anordnung ist nur bei Messung an gittergesteuerten Mutatoren erforderlich.

lässt den Strom nur in der Richtung entgegen dem primären Wandlerstrom fliessen. Dadurch ist der Wandler zu Beginn jedes neuen Arbeitsintervales fast strom- und feldfrei und die Amperewindungen können sich wie bei einem normalen Wandler bis auf den geringen Magnetisierungsstrom aufheben. Der Strom in der Wattmeterspule ist somit ein getreues Abbild des Anodenstromes in dem gewählten Maßstab.

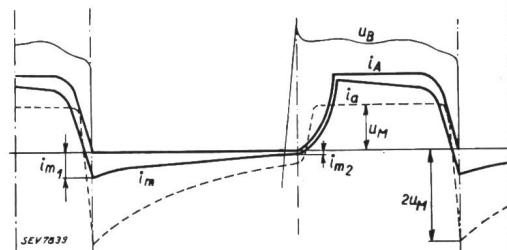


Fig. 2.

Strom- und Spannungsverlauf.

i_A Anodenstrom, *i_s* Strom durch die Messinstrumente, *u_B* Lichtbogenabfall, *i_{m1}* Anfangswert des Rückstromes durch die Sekundärwicklung, *i_{m2}* Endwert dieses Rückstromes. Die gestrichelte Linie bezeichnet die Spannung an der Sekundärwicklung des Wandlers mit dem Wert *u_M*, während des Arbeitsintervales.

Fig. 2 zeigt den Stromverlauf für einen Wandler mit der Uebersetzung 1 : 1. Infolge des Magnetisierungsstromes *i_m* verläuft der Sekundärstrom *i_a* unterhalb des Anodenstromes *i_A*. *i_m* steigt während

¹⁾ Zu dieser Arbeit haben meine Mitarbeiter J. Plöen, H. Forssell und K. E. Ungerholm beigetragen.

²⁾ Brown-Boveri-Mitteilungen 1931, S. 362.

³⁾ Electrical Journal, Oct. 1934, S. 418.

⁴⁾ Siehe auch A. U. Lamm, Teknisk Tidskrift, Elektrotechnik, Febr. 1935.