Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 31 (1940)

Heft: 17

Artikel: Le dégivrage des lignes : considérations pratiques sur divers modes de chauffage

Autor: Maret, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058014

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: 22.08.2025

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

exigence n'est point nouvelle, mais elle ne peut que rarement être considérée. Cependant, lorsque cela est possible, on devrait toujours déclencher les transformateurs des réseaux de distribution qui sont superflus aux heures creuses.

4° L'influence du facteur de puissance cos φ.

L'influence du cos φ avec lequel une certaine énergie est produite ou transmise est bien connue. Nous l'avons mentionnée au chapitre 3°, mais nous aimerions insister sur ce point. Cette influence s'exerce nettement sur le rendement des alternateurs, comme sur celui des transformateurs et des lignes. Comme nous l'avons dit, les pertes de transmission croissent avec le carré de la réduction du cos φ, c'est-à-dire que pour cos $\varphi = 0{,}7$ les pertes sont deux fois plus grandes que pour cos $\varphi = 1$. Il nous paraît superflu de donner des exemples numériques. A lui seul, ce fait doit inciter les chefs d'exploitation à utiliser les possibilités d'amélioration du facteur de puissance. A vrai dire, ces possibilités sont limitées, car le cos φ dépend surtout du consommateur. Les consommateurs présentant un mauvais cos φ dû à des moteurs peuvent et doivent être améliorés par des condensateurs statiques ou en subsistant aux moteurs asynchrones défavorables des moteurs synchrones, qui offrent d'autre part l'avantage d'une vitesse constante. Nous avons déjà mentionné l'amélioration qu'il est possible de réaliser par une réduction des transformateurs. Une autre possibilité consiste à ne pas augmenter au-dessus de la normale les inductions dans le fer des transformateurs, c'est-à-dire de veiller attentivement à ce que le branchement des lignes primaires se fasse aux prises convenables des transformateurs. La grande puissance capacitive des lignes à très hautes tensions et des câbles réduit maintenant d'un façon appréciable le courant réactif inductif des alternateurs des grandes usines. Dans les réseaux de distribution, le problème des pertes n'est cependant pas résolu de ce fait, de sorte qu'il faut continuer à apporter toute l'attention désirable au facteur de puissance cos φ. Il ne devrait plus arriver que, de deux usines en parallèle, l'une fonctionne en surexcitation et l'autre en sous-excitation, car de telles conditions provoquent toujours des pertes additionnelles et sont la preuve d'une exploitation négligente, indamissible à l'heure actuelle.

En résumé, l'utilisation rationnelle et le choix judicieux de la grandeur et de la charge des machines en service permettent de mettre en valeur, sans frais, des quantités d'énergie qui seront particulièrement précieuses cet hiver. Il vaut en outre la peine de vérifier soigneusement les autres dispositifs de l'ensemble des réseaux, afin d'éviter des pertes inutiles et d'accroître la production.

Le dégivrage des lignes.

Considérations pratiques sur divers modes de chauffage.

Par *A. Maret*, Baden.

621.315.175

L'auteur indique d'abord, à l'aide d'un exemple, le mode de détermination de la puissance et de la durée de réchauffage d'une ligne givrée et trouve qu'un dégivrage rapide exige une puissance passablement plus élevée que celle qui est mise en jeu en service normal. Il passe ensuite en revue les divers modes de dégivrage usités en énumérant brièvement leurs désavantages dont le principal est, la plupart du temps, d'obliger à interrompre l'exploitation. Il suggère une autre méthode permettant de réduire la puissance de chauffe: le ***chauffage préventif*** *en cours de service. Le genre de courant qui conviendrait le mieux serait, comme l'a préconisé en son temps M. B. Jobin, le courant continu, la tension de chauffe ne dépendant que de la résistance de la ligne et non de sa réactance. L'auteur signale un couplage proposé par M. Jobin, permettant de faire circuler du courant continu à travers les transformateurs de service. Il propose également un couplage un peu plus simple pour ce même but. Il suggère de même l'emploi de deux bobines permettant de raccorder la source de courant continu en n'importe quel point d'une ligne aux deux extrémités du tronçon sujet au givre; il indique une formule servant à déterminer la puissance de ces bobines dont l'une est parcourue par une superposition de courant continu et de courant alternatif. Il établit ensuite un tableau comparatif des puissances des divers appareils de chauffage entrant en compte; une formule approchée donne la puissance de chacun d'eux. Enfin, il examine l'application de divers modes de dégivrage et de chauffage préventif à un réseau de distribution ramifié à 11 kV, puis à un réseau d'interconnexion bouclé à 20 kV et enfin à un réseau de transport de force à 130 kV.*

Il arrive à la conclusion que, si le dégivrage par mise en court-circuit ou circulation de courant est indiqué pour les lignes doubles, le chauffage préventif par courant continu, par contre, utilisant soit les transformateurs de service, soit des bobines de raccordement, est, au point de vue coût, tout à fait applicable aux lignes simples et permet seul soit d'opérer dans des conditions atmosphériques déterminées et relativement favorables, soit de ne pas interrompre l'exploitation, condition qui tend à devenir essentielle.

Anhand eines Beispiels wird eine Methode der Bestimmung von Leistung und Heizdauer beim Heizen einer rauhreifbehängten Freileitung angegeben. Ein rasches Abheizen des Rauhreifes verlangt eine wesentlich grössere Leistung als die, welche im normalen Betrieb übertragen wird. Die verschiedenen Abheizmethoden werden berührt; der wichtigste Nachteil der meisten ist, dass während der Heizung der Betrieb unterbrochen werden muss. Es wird auf eine andere Methode hingewiesen, die der ***vorsorglichen Heizung*** *während des Betriebes. Hiezu eignet sich, entsprechend dem Vorschlag von B. Jobin, am besten der Gleichstrom, da die Heizspannung nur vom Leitungswiderstand, nicht von der Reaktanz abhängt. Es wird auch auf eine Schaltung von B. Jobin hingewiesen, nach der der Gleichstrom durch in Betrieb stehende Transformatoren zirkuliert. Eine etwas einfachere Schaltung wird für den gleichen Zweck vorgeschlagen. Ferner wird die Anwendung von zwei Drosselspulen vorgeschlagen, die erlauben, die Gleichstromquelle an irgendeiner Stelle einer Leitung zwischen den Enden des rauhreifgefährdeten Teilstückes anzuschliessen. Die Leistung der beiden Drosselspulen wird bestimmt; durch die eine fliesst Gleichstrom und Wechselstrom. Es wird ferner eine Tabelle aufgestellt, in der die Leistungen der bei den verschiedenen Methoden zur Heizung nötigen Apparate vergleichbar zusammengestellt sind. Schliesslich wird die Anwendung der verschiedenen Abheizungsmethoden und der vorsorglichen Heizung bei einem Verteilnetz von 11 kV, bei einem Maschennetz von 20 kV und schliesslich bei einer Kraftübertragung von 130 kV untersucht.*

Der Autor kommt zur Schlussfolgerung, dass die Abheizung durch Kurzschliessen der Leitung oder durch Stromzirkulation für Doppelleitungen angezeigt ist. Dagegen ist die vorsorgliche Heizung bei Verwendung der vorhandenen Transformatoren oder von Anschlußspulen hinsichtlich Kosten auf die einfachen Leitungen durchaus anwendbar, und sie allein erlaubt, den Betrieb aufrechtzuerhalten, ein Vorteil, der zweifellos wichtig ist.

De nombreuses publications ont déjà paru sur le givrage et l'enneigement des lignes [1]). Nous nous bornerons ici à évaluer les puissances de chauffe à mettre en jeu et à examiner les possibilités d'application de divers systèmes de réchauffage ou de chauffage préventif.

I. Détermination de la puissance et de la durée de chauffe.

Les méthodes de dégivrage pratiquées jusqu'ici, impliquant généralement une interruption du service, amènent à opérer le plus rapidement possible, c'est-à-dire à envoyer dans la ligne à chauffer un courant maximum. L'opération peut avoir à s'effectuer dans des conditions atmosphériques très diverses, mal déterminées. C'est pourquoi un certain empirisme et des tâtonnements ne sont pas absents, jusqu'ici, du calcul de ce courant.

Méthode.

On part du fait que la ligne à chauffer a des parties non givrées ou qui se dégivrent dès le début de l'opération; il faut donc que le courant qu'elle transporte ne la chauffe pas au point de compromettre la résistance mécanique du conducteur. La température limite est aux environs de 80° C. Cette température, la température ambiante, la vitesse du vent, la section du conducteur, déterminent le courant de chauffe admissible. De l'impédance de la ligne se déduit la tension de chauffe et la puissance apparente en kVA; de la résistance, la puissance de chauffe active consommée en kW, $3 \cdot i^2 \cdot r$.

Le poids de la fraction du manchon de glace adhérant à la ligne, qui est à fondre pour détacher la masse, détermine la quantité de calories nécessaire ou de kWh. Cette dernière dépend aussi du vent et de la température ambiante. Le rapport $\frac{\text{kWh}}{\text{kW}}$ donne la durée de chauffe

On peut aussi choisir une température plus basse pour le fil; la durée de chauffe en sera accrue d'autant.

Exemple.

Nous choisirons une ligne en exploitation de grande longueur par rapport à la section afin de mieux mettre en lumière la puissance de chauffe maximum requise.

Soit donc une ligne à 35 kV de 50 km, 3·28 mm² Cu.

Des tableaux et des courbes établis par divers auteurs sur la base tant de calculs que de nombreux essais de fusion, donnent les densités de courant nécessaires pour obtenir diverses températures du conducteur non givré, à diverses sections, vitesses du vent, températures ambiantes [2]).

[1]) Voir p. ex. les rapports de la CIGRE 1935, 1937 et 1939.

[2]) Voir entre autres le rapport Matthias No. 246 de la CIGRE 1935, l'article Halbach de l'ETZ de janvier 1933 et le rapport du même auteur No. 246 de la CIGRE 1935, le rapport Hammel No. 134 de la CIGRE 1933, le rapport Jobin No. 21 de la CIGRE 1937, ces publications se complétant mutuellement.

Des courbes établies par Hammel et traduisant des résultats d'essais donnent la température du conducteur en fonction de la vitesse du vent pour diverses valeurs de la puissance de chauffe à dissiper par cm² de surface du conducteur.

La température choisie dicte le courant, c'est-à-dire la durée de chauffe.

Les densités admises ci-après peuvent sembler un peu fortes comparées à certains chiffres publiés. Mais ces derniers tiennent trop peu compte de l'effet important du vent et de la température ambiante. De nombreuses observations recueillies un peu partout en Europe, il ressort en effet que le givre peut se former aussi par des températures ambiantes basses (jusqu'à —15°) et des vents forts. En Suisse les conditions sont assez bien déterminées: températures de —2 à —8°, vents moyens jusqu'à 5 m/s. Or une installation de chauffage ne peut être réputée utile que si elle permet le dégivrage non seulement dans les cas bénins, mais surtout dans les conditions critiques.

On peut admettre pour un calcul approximatif que la densité nécessaire pour le dégivrage rapide d'un conducteur Cu est comprise entre 12 et 5 A/mm² pour des sections de 16 à 220 mm².

Dans le cas présent, nous avons: diamètre du conducteur 0,65 cm; surface du conducteur par cm de longueur 2,04 cm²; courant de chauffe admis 295 A (env. 10,5 A/mm²); puissance de chauffe par cm de longueur $i^2 \cdot r = 295^2 \cdot 0{,}625 \cdot 10^{-5} = 0{,}54$ W/cm; puissance à dissiper par cm² 0,267 W. Cette puissance de 0,267 W/cm² donne au fil non givré, pour une vitesse du vent de 3 m/s, et une température ambiante de —10° C, une température de 82° C environ (ou, pour une vitesse de 5 m/s, une température de 58° C). A cette température, l'état stationnaire est atteint, la chaleur produite dans le fil se dissipe entièrement.

Les caractéristiques de la ligne, rapportées à une phase, sont: $r = 0{,}625$ ohm/km; $x = 0{,}4$ ohm/km; $z = 0{,}74$ ohm/km; $\cos\varphi = 0{,}85$. Tension de chauffe $= 295 \cdot 50 \cdot 0{,}74 = 10\,900$ V par phase. Puissance de chauffe $= 10{,}9 \cdot 295 \cdot 3 =$ env. 9700 kVA; ou, en kW, $3 \cdot i^2 \cdot r = 3 \cdot 295^2 \cdot 0{,}625 \cdot 50 = 8200$ kW.

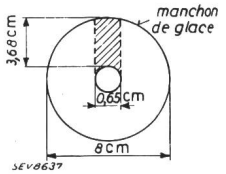

Fig. 1.

Nous faisons l'hypothèse d'une charge de givre de 2,5 kg/m; cela correspond, si l'on admet un poids spécifique de 0,5, à un manchon de givre d'un diamètre de 8 cm (Fig. 1); en effet

$$\left(\frac{3{,}14 \cdot 8^2}{4} - \frac{3{,}14 \cdot 0{,}65^2}{4}\right) \cdot 100 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3} = 2{,}5 \text{ kg/m.}$$

La quantité de glace à fondre pour que le manchon se détache du fil, correspond à la partie hachurée; le poids de celle-ci sera de $0{,}65 \cdot 3{,}68 \cdot 0{,}5 = 0{,}1195$ kg/m ou, pour 50 km et pour les 3 fils, de 18 000 kg.

Pour faire fondre un kilogramme de glace à 0° C, il faut 80 kcal. Pour amener un kilogramme de glace, qui est par hypothèse à la température ambiante, soit à —10° C, à la température de 0°, il faut 5 kcal. Nous calculerons donc avec 85 kcal. D'autre part, une partie seulement de la chaleur produite dans le fil sert à la fusion du secteur intéressé, le reste passant dans la masse du manchon ou arrivant à la surface par conduction, puis se dissipant par convection et rayonnement; nous admettrons dans ces conditions de vent et de température, un rendement de 0,7. La quantité de calories à produire sera par conséquent de

$$\frac{18\,000 \cdot 85}{0{,}7} = 2\,520\,000 \text{ kcal, ou } \frac{2\,520\,000}{860} = 2930 \text{ kWh.}$$

Nous avons vu plus haut que la puissance de chauffe était de 8200 kW. La durée de chauffe sera donc de $\frac{2930}{8200} = 0{,}36$ h, soit 22 min. Compte tenu d'une certaine marge couvrant les inexactitudes de ce mode de calcul, on constate que ce chiffre correspond assez bien aux temps minimum de dégivrage atteints en pratique avec le courant limite à une température ambiante basse et par un vent fort.

De nombres d'essais effectués il ressort qu'un courant donnant une température de 40° C au fil non givré permet encore d'obtenir la fusion en un temps convenable (1 à 2 heures), ceci toutefois à vent modéré et température ambiante supérieure à —10° C. Le courant est d'env. 70 % de celui qui produit 80° C. Nous nous en tiendrons dans ce qui suit à la température de 80° C.

Mais une densité de 10,5 A/mm² équivaut à presque 6 fois le courant normal de charge; si l'on tient compte que ce courant doit être produit à tension réduite, on voit que le transformateur alimentant la ligne ne peut généralement pas servir de transformateur de chauffage (excepté le cas où l'on pourrait mobiliser un transformateur alimentant plusieurs lignes sans avoir par là à désorganiser le service).

Le transformateur de chauffe serait à prévoir ici pour environ 10 000 kVA, 19 000 V. C'est un appareil spécial pour forte intensité et tension réduite.

Si l'on diminue la densité, par exemple à 7,5 A/mm², l'intensité serait donc de 210 A et la puissance de chauffe de 4150 kW. La température limite du conducteur atteindrait environ 44° C pour une vitesse du vent de 3 m/s et la durée de chauffe serait d'environ 45 min.

Une intensité de 100 A (3,6 A/mm²) exigerait théoriquement une durée de chauffe d'au moins 3 heures à vent moyen. En réalité, elle serait, par vent fort ou à température ambiante basse, peut-être insuffisante, les pertes par convection et par rayonnement l'emporteraient. Par exemple, des essais de fusion effectués par les «Bayernwerke» avec 350 A sur un câble d'aluminium de 120 mm² (ce qui correspondrait à une densité de courant de 4,9 A/mm² dans un fil Cu) sont restés sans succès; la température du conducteur n'a atteint que 33° C.

De toute façon, le courant de dégivrage surchargerait le transformateur de service.

II. Méthodes de dégivrage.

On pratique le plus généralement la mise en court-circuit de la ligne à dégivrer; mais cela entraîne, sauf si l'on dispose de lignes en parallèle, une interruption de l'exploitation; on sait assez les gros désagréments et les pertes de recettes qui s'ensuivent, car on ne peut pas toujours attendre pour opérer en heures creuses.

Il existe, il est vrai, diverses autres méthodes qui *permettent de ne pas interrompre le service* ou du moins de ne l'interrompre que pendant un court instant, mais la plupart ne peuvent être d'un emploi général. Elles consistent en:

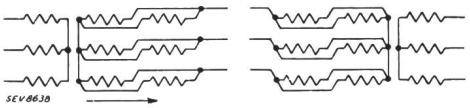

Fig. 2.

a) *Un abaissement de la tension de transmission;* la puissance transmise restant la même, le courant augmente proportionnellement dans les conducteurs. Mais cela exige un couplage spécial des transformateurs en tête et en bout de ligne et des commutations laborieuses tant dans le réseau que chez les usagers éventuels échelonnés en cours de route.

b) *Une charge artificielle;* une bobine de self absorbant une forte puissance réactive est branchée en bout de ligne. Elle est calculée de telle façon que le courant total parcourant la ligne (courant de la charge transmise + courant de la bobine = courant de chauffe), suffise à la dégivrer.

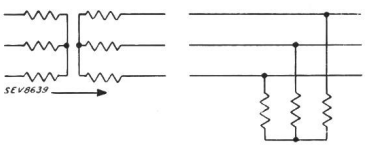

Fig. 3.

Cette solution est toutefois assez coûteuse car il faudra autant de bobines que de tronçons à dégivrer, à moins d'établir une bobine passe-partout munie de prises et transportable. Une telle bobine est à dimensionner pour la tension de la ligne et le courant de chauffe (cas de la ligne à vide). Par exemple, s'il s'agit d'un tronçon de 20 km à 30 kV et 50 mm² de section, demandant un courant de chauffe d'environ 300 A, la puissance de la bobine sera de $300 \cdot 30 \cdot \sqrt{3}$, soit de près de 16 000 kVA, ce qui correspond à un transformateur de 9000 kVA. Une telle bobine n'est pas transportable. La chute de tension provoquée dans la ligne sera forte.

L'impédance de la ligne étant de 10,6 ohms/phase, un transformateur de chauffe pour ce même tronçon mis en court-circuit devrait être dimensionné pour une tension de $300 \cdot 10{,}6 = 3{,}18$ kV/phase et pour une puissance de $3{,}18 \cdot 300 \cdot \sqrt{3}$, soit environ 2900 kVA. (Ceci seulement à titre de comparaison des puissances, puisque l'emploi du transformateur de chauffe exige une interruption du service). Un autre inconvénient de la self est d'exiger des alternateurs une forte puissance réactive; leur cos φ devient mauvais, le décalage de la tension en bout de ligne est élevé, la stabilité en marche en parallèle peut être compromise.

Fig. 4.

c) *Un dédoublement du conducteur.* Chaque conducteur de la ligne comporte une âme isolée de l'enveloppe et servant de conducteur de chauffe. L'enveloppe transporte la puissance normale. Une tension prise sur le transformateur

fait circuler un courant additionnel dans le circuit âme-enveloppe. Ce courant dans l'enveloppe s'ajoute au courant de la charge et en provoque l'échauffement.

Cette solution ne convient que pour des réseaux en projet ou prévus avec conducteur spécial.

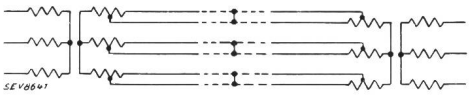

Fig. 5.

d) *Idem.* Une variante de la solution précédente consiste à établir, pour les longs tronçons, un court-circuit vers le milieu entre l'âme et l'enveloppe.

e) Dans le cas de deux ou plusieurs lignes en parallèle, on peut résoudre le problème très simplement en mettant une ou plusieurs lignes hors service. La ligne restante marche alors en surcharge et se chauffe.

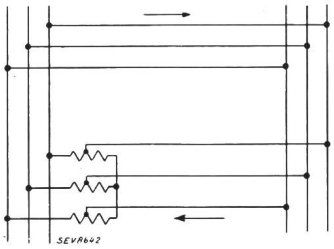

Fig. 6.

On peut aussi introduire une tension additionnelle dans la boucle formée par deux artères en parallèle de façon à y faire circuler un courant de superposition. En en commutant le sens, on surcharge successivement les deux artères.

f) Une variante de la solution précédente peut même, dans certains cas, être appliquée à une ligne simple, si celle-ci est munie d'un fil de terre. La tension additionnelle est introduite dans la boucle formée par le fil de terre et l'une des trois phases. On permute successivement ces dernières. Cette solution exige que la ligne puisse être exploitée avec

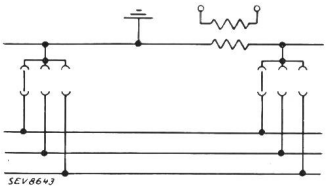

Fig. 7.

une phase à la terre et que le fil de terre puisse transporter un courant suffisant (ce qui est rarement le cas, le fil étant la plupart du temps en acier). Elle expose, à moins de verrouillages compliqués, à de fausses manœuvres.

III. Suggestion: Le chauffage préventif.

Ces diverses solution entraînent, comme on l'a vu plus haut, la mise en œuvre de grosses puissances de chauffe; toutes comportent, en effet, la fusion de manchons de givre qu'on a laissé se former.

Nous suggérons d'opérer autrement: on empêcherait la formation du givre sur la ligne en y faisant circuler un courant minimum au lieu d'avoir à la dégivrer. Ce serait la méthode du *chauffage préventif* par opposition à celle du *dégivrage.* Le problème consisterait alors à envoyer dans le fil le courant minimum nécessaire pour y entretenir une température un peu supérieure à 0° à une vitesse du vent maximum et une température ambiante minimum donnée. On éviterait ainsi les grosses puissances de fusion et l'emploi de transformateurs de chauffage. Le ou les transformateurs de service n'auraient à débiter que ce courant minimum, au total. Le service ne serait pas interrompu.

Cette méthode aurait en outre l'avantage que l'on opérerait durant les périodes de formation du givre, où les conditions atmosphériques sont bien déterminées et plus favorables, alors que le dégivrage peut obliger à opérer par des températures minimum et des vents forts.

M. Jobin [3]) a recherché entre autres quelle est la valeur du courant minimum donnant un temps de fusion théoriquement infini pour un manchon de givre donné. Ces calculs lui ont permis de déterminer des courbes donnant le temps de fusion en fonction de la densité de courant. Poursuivant ces calculs, il a été amené à proposer, pour une température ambiante de —5° et un vent de 5 m/s les densités suivantes: 4,1 A/mm² pour 16 mm² Cu, 3 A/mm² pour 50 mm² Cu et 2 A/mm² pour 240 mm² Cu. Nous resterons toutefois un peu au-dessus de ces valeurs afin de tenir compte des conditions critiques.

Un inconvénient apparent du chauffage préventif est que tous les tronçons susceptibles de se givrer doivent être alimentés à la fois mais en réalité ils ne représenteront jamais qu'une faible fraction du réseau.

Dégivrage ou chauffage préventif, la solution à adopter dépend du cas particulier.

On réservera le cas des lignes en parallèle dont le dégivrage peut se faire à peu de frais selon l'un des modes mentionnés plus haut. Seuls, les réseaux peu ramifiés et les lignes de transport simples à haute tension entreront en ligne de compte.

IV. Emploi du courant continu.

On cherchera à réaliser le chauffage préventif à l'aide de courant continu que l'on superposera au courant de la charge transmise; la tension et la puissance de chauffe apparente seront ainsi beaucoup plus basses qu'avec du courant alternatif, la résistance de la ligne intervenant seule et étant, dans le cas de conducteurs à haute tension de fort diamètre, 5 à 6 fois plus faible que l'impédance.

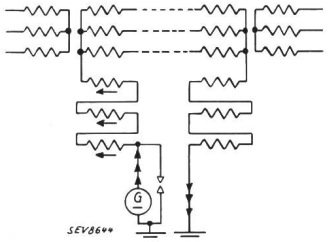

Fig. 8.

On peut en effet, selon une suggestion de M. B. Jobin, ingénieur de la Sté suisse de Traction et d'Electricité à Bâle, faire circuler du courant continu à travers un transformateur si l'on compense l'effet magnétisant de ce courant par des contre-ampèretours. Le couplage est représenté par la fig. 8. Le transformateur est muni d'un enroulement de compensation dont le nombre de spires est égal à 1/3 de celui de l'enroulement principal.

Ce couplage entraînera évidemment un certain renchérissement de l'appareil. Deux des trois enroulements des transformateurs situés aux deux

[3]) Voir rapport No. 216 de la CIGRE 1937.

bouts de tronçons à chauffer sont à dimensionner pour de fortes intensités; en effet, le courant de préchauffage, tout en étant inférieur à celui qui serait nécessaire pour le dégivrage, dépasse tout de même le courant normal du transformateur; la densité moyenne admise pour un appareil à refroidissement naturel étant de l'ordre de 2,5 A/mm² [4]) tandis que la densité nécessaire pour empêcher la formation du givre, par exemple à une température ambiante de —15° et une vitesse du vent de 3 m/s, est de l'ordre de 3,5 A/mm² au moins. D'où renforcement de l'enroulement principal et adjonction d'un enroulement de compensation de même puissance.

Un autre couplage (un peu plus simple et dans le cas de tensions moyennes plus économique) que nous suggérons à notre tour pour l'injection de courant continu dans une ligne est le couplage en zig-zag du transformateur de ligne. L'augmentation de puissance est moindre que dans

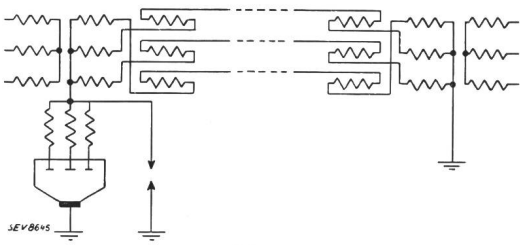

Fig. 9.

le couplage précédent. Par exemple dans le cas d'une densité du courant de chauffage égale à deux fois la densité du courant de service, la comparaison donne:

transformateur normal	2 enroulements	de puissance $P = 2\ P$
à 3 enroulements	$P + 2P + 2P$	$= 5\ P$
zigzag	$P + (2P \cdot 1{,}15)$	$= 3{,}3\ P$

Le transformateur zig-zag permet aussi l'adjonction d'un enroulement tertiaire pour l'alimentation de la source à courant continu, p. ex. d'un redresseur à mercure. Le transformateur avec enroulement de compensation, comprenant déjà trois enroulements, ne s'y prête guère.

La réalisation du couplage zig-zag est par contre plus malaisée. Pour les très hautes tensions, l'avantage sera peu sensible. Suivant les cas, on appliquera donc l'un ou l'autre couplage.

Pour le service, le couplage étoile-zig-zag est équivalent au couplage triangle-étoile. On protégera la source de courant continu, dans le cas d'un défaut à la terre, contre la tension de phase du réseau par l'adjonction d'un éclateur en parallèle, jusqu'à coupure du défaut par les relais de protection du disjoncteur de ligne.

On devra prendre des précautions spéciales pour les divers éléments intercalés dans la ligne (pontage des transformateurs d'intensité, vérification de la capacité de courant des joints, etc.).

[4]) Il s'agit ici, bien entendu, de l'ordre de grandeur seulement, propre à fixer les idées, car cette densité est variable.

Enfin, inconvénient inhérent au chauffage préventif simultané de l'ensemble du réseau, si les tronçons à chauffer sont tant soit peu nombreux, il faudra une source de trop grosse puissance. On est alors pratiquement réduit à appliquer le chauf-

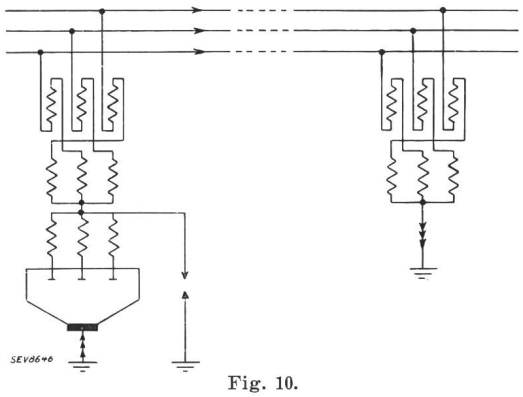

Fig. 10.

fage successif, c'est-à-dire en fin de compte à revenir au principe du dégivrage, avec cet avantage toutefois que, le service n'étant pas interrompu, on peut réduire les fortes intensités que ce système exige en admettant un temps de dégivrage plus long.

Autre suggestion.

L'idéal consisterait dans une solution du même ordre, mais plus générale, applicable sans modification des réseaux existants; par exemple, on enverrait le courant continu dans la ligne non plus à travers les transformateurs de service, mais par l'intermédiaire d'une self en zig-zag, selon le schéma de la fig. 10, raccordée à la ligne en un point convenable. Le courant continu serait créé comme précédemment à l'aide d'un mutateur. Un enroulement secondaire sur la self, représenté en triphasé dans le croquis, mais couplé en réalité en hexaphasé ou double étoile, servirait à alimenter le mutateur. L'ensemble mutateur et self serait monté de façon à constituer un tout transportable, qui serait déplacé d'un tronçon à l'autre, en même temps que la deuxième self à l'autre bout, pour procéder au dégivrage successif. Toutefois, la self, étant à dimensionner pour la pleine tension du réseau et le courant de chauffe, sera un appareil d'assez grosse puissance. On voit d'emblée que la self ne sera de puissance modérée que pour des tronçons de faible section et de tension basse, cas à vrai dire assez rares; la source, pour des tronçons courts, et de faible section.

Comme c'est le coût du mutateur qui prédomine, le dispositif pourra être intéressant lorsque les trajets à dégivrer ne sont qu'une portion du tronçon total, ce qui est assez fréquemment le cas, certains parages seulement des régions traversées par un tronçon étant sujets au givre. Les dispositif peut être accroché au réseau en n'importe quels points de façon à n'alimenter que la fraction givrée du tronçon.

Exemple.

Soit un tronçon à 20 kV de 15 km et 50 mm².

Admettons un temps de dégivrage de 7 ... 8 heures. Cela correspond, suivant les conditions atmosphériques, à une densité de courant de 3 à 4 A/mm².

La puissance du mutateur lui-même sera, pour le tronçon total, assez élevée. Il faudra, à 4 A/mm² (ce qui est un maximum), un courant de 200 A par phase. La résistance d'une phase étant de 5,25 ohms et la tension continue à appliquer de $5{,}25 \cdot 200 = 1050$ V, la source sera à prévoir pour 1100 V et 660 kW. Mais cette puissance se réduit à quelque 200 kW si un tiers seulement du tronçon est sujet au givre.

Quant aux deux selfs, elles seraient à calculer comme suit:

α) *Self alimentant le mutateur.* L'enroulement secondaire (en double étoile), qui sert à alimenter le redresseur, est à dimensionner approximativement pour 1,5 fois la puissance débitée P_{ch} en kW. Chaque phase est en effet affectée à tour de rôle par la pleine puissance et non plus seulement, comme dans un transformateur triphasé ordinaire, par un tiers de la puissance; en outre, il faut tenir compte des harmoniques qui sont très accusés, ce qui impose, pour un enroulement en double étoile, ce facteur de 1,5. Quant à l'enroulement primaire en zig-zag, il sera parcouru, abstraction faite du courant magnétisant, que nous négligerons, par deux courants superposés: un courant alternatif I_a servant à produire le courant redressé $3\ I_c$ au secondaire et un tiers du courant redressé lui-même qui va au réseau en se répartissant uniformément sur les trois phases. I_a est donné par la puissance de chauffe P_{ch} divisée par la tension appliquée à une phase, ou tension de phase du réseau: $I_a = \frac{P_{ch}}{U_{ph}} = \frac{P_{ch} \cdot \sqrt{3}}{U}$. Le courant résultant est donc égal à $\sqrt{I_c^2 + I_a^2}$; la puissance de cet enroulement, P_{pr}, sera, compte tenu du couplage zigzag:

$$P_{pr} = 1{,}15\ U \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{I_c^2 + I_a^2} = U \cdot 2\ \sqrt{I_c^2 + I_a^2}$$

La puissance de la self, comparée à celle d'un transformateur sera donc de

$$P = \frac{P_{pr} + P_{sec}}{2} = U \cdot \sqrt{I_c^2 + I_a^2} + 0{,}75\ P_{ch}$$

où

U tension composée du réseau,

I_c courant continu à envoyer dans chaque conducteur de la ligne,

I_a courant alternatif $= \frac{P_{ch} \cdot \sqrt{3}}{U}$

P_{ch} puissance de chauffe $= 3 \cdot I_c^2 \cdot r$.

Dans le cas présent, on a:

$$U = 20\ \text{kV};\ I_c = 200\ \text{A};\ I_a = \frac{660 \cdot \sqrt{3}}{20} = 57\ \text{A}.$$

La puissance d'un transformateur correspondant sera donc d'environ 4700 kVA.

β) *Self servant au retour du courant.* Elle est à bobiner en zigzag pour:

$$\frac{1{,}15 \cdot U \cdot \sqrt{3} \cdot I_c}{2}\ U \cdot I_c$$

$U = 20$ kV; $I_c = 200$ A.

La puissance d'un transformateur correspondant sera donc d'environ 4000 kVA.

On voit, étant donné les puissances des selfs, que le système ne convient guère pour des lignes de transport à haute tension.

On pourrait l'utiliser pour des réseaux de faible tension, mettant à profit le fait que le dispositif est commun à tous les tronçons du réseau et n'oblige à modifier en rien les transformateurs. Le domaine d'application pourrait être compris entre 6 et 15 kV, pour des conducteurs dont la section serait de 12,5 à 28 mm². A 10 kV et 28 mm² par exemple, on aurait une self de 1400 kVA pesant env. 3 tonnes. Pour un tronçon à dégivrer de 10 km, la source aurait à fournir env. 250 kW.

A titre de comparaison, on notera qu'un transformateur de chauffe pour dégivrage en un court laps de temps du même tronçon mis en court-circuit serait à dimensionner pour 280 A, 3,6 kV, 1800 kVA.

V. Comparaison des puissances.

On peut établir des formules approchées pour la comparaison des puissances des appareils de chauffe dans les divers systèmes, formules qui peuvent aiguiller vers la solution convenable. On se bornera ci-après aux réseaux triphasés.

Puissance d'un appareil de chauffe =

$$U_{ch} \cdot \sqrt{3} \cdot I_c \cdot n \cdot m$$

où

U_{ch} tension pour laquelle l'appareil est à prévoir.

I_c courant de chauffe dans chaque phase.

n nombre de tronçons à chauffer simultanément.

m nombre d'enroulements de l'appareil.

Rappelons en outre que

I_a courant alternatif dans l'enroulement primaire de l'appareil, servant à produire au secondaire le courant I_c.

Remarque générale: Un appareil de chauffe, self ou transformateur, peut être surchargé par rapport à un appareil normal, étant donné qu'il ne fonctionne qu'à température ambiante très basse. La surcharge ne dépasse cependant guère 10 %, car à basse température l'huile s'épaissit à la partie inférieure de la cuve et circule mal.

Nous admettons pour la comparaison une section identique du conducteur dans tous les cas. Nous pouvons donc écrire pour I_c la densité s. La formule devient

$$\underline{P = U_{ch} \cdot \sqrt{3} \cdot s \cdot n \cdot m}$$

Nous faisons en outre l'hypothèse que les lignes sont en cuivre. Les puissances ci-après s'entendent par mm² de section du conducteur.

a) *Transformateur* pour dégivrage successif en ½ h env. par mise en court-circuit. $U_{ch} = I_c \cdot Z \cdot \sqrt{3}$; $s = 10$ A/mm²; $n = 1$; $m = 2$. La formule devient

$$\underline{P = 600 \cdot Z}$$

où Z = Impédance par phase du tronçon à chauffer.

b) *Self de charge* pour dégivrage successif en ½ h env. $U_{ch} = U$; $I_c = 10$ A; $n = 1$; $m = 1$.

$$\underline{P = U \cdot 10 \cdot \sqrt{3}}$$

c) *Mutateur.* Le courant est le triple de celui des selfs de raccordement. Soit $s = 4$ A/mm²;

$P_{ch} = 3 \cdot I_c^2 \cdot r = 3 \cdot 4^2 \cdot r =$ Puissance par mm² =

$$\underline{P = 48 \cdot r}$$

où r = résistance par phase du tronçon à chauffer.

Self en zigzag pour raccordement et alimentation du mutateur. On a vu plus haut qu'elle était à dimensionner pour

$$P = 2 \cdot U \cdot \sqrt{I_c^2 + I_a^2} + 1{,}5\ P_{ch}$$

$$\text{où } I_a = \frac{P_{ch} \cdot \sqrt{3}}{U} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot I_c^2 \cdot r}{U}$$

En substituant, il vient:

$$P = 2 \cdot I_c \cdot \sqrt{U^2 + 27\ r^2 \cdot I_c^2} + 4{,}5 \cdot r \cdot I_c^2$$

Si l'on pose $I_c = 4$; $I_a = 48 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot r}{U}$

on obtient:

$$P = 8 \cdot \sqrt{U^2 + 432 \cdot r^2} + 72 \cdot r$$

Self en zigzag pour retour du courant continu. On a vu qu'elle était à dimensionner pour $2 \cdot U \cdot I_c$; pour $I_c = 4$

$$P = 8\,U$$

d) Transformateurs avec enroulement zigzag pour chauffage simultané du réseau entier par courant continu. Deux cas sont à considérer:

α) La centrale est du côté primaire.

Le schéma fig. 11 indique les puissances des divers enroulements. L'enroulement primaire *1* est à

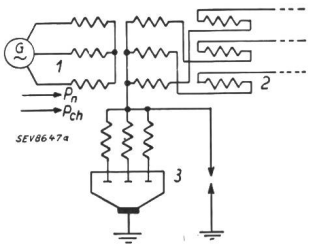

Fig. 11.

dimensionner pour la puissance normale transmise P_n + 1,05 fois la puissance de chauffe à produire : $P_n + 1{,}05 \cdot P_{ch}$ (le facteur 1,05 provient du mutateur); l'enroulement secondaire en zigzag *2*, pour le courant continu I_c plus le courant normal transmis I_n, soit $2 \cdot U \cdot \sqrt{I_c^2 + I_n^2}$; l'enroulement tertiaire *3* alimentant le mutateur, pour $1{,}5 \cdot P_{ch}$. La puissance du transformateur est donc:

$$P = 2 \cdot U \sqrt{I_c^2 + I_n^2} + 2{,}55 \cdot P_{ch} + P_n$$

Pour chauffer tout le tronçon, il faut: $P_{ch} = 3 \cdot I_c^2 \cdot$

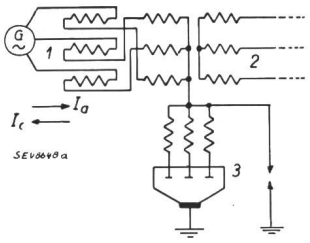

Fig. 12.

$r \cdot n$. Soit: $I_n = 2{,}5$; $I_c = 3{,}5$; $P_{ch} = 37 \cdot r \cdot n$. Substituant et simplifiant, il vient:

$$P = U \cdot 13 + 94 \cdot r \cdot n$$

β) La centrale est du côté mutateur (fig. 12). On obtient:

$$P_1 = 2 \cdot U \cdot \sqrt{I_c^2 + (I_a + I_n)^2}$$
$$P_2 = P_n$$
$$P_3 = 1{,}5 \cdot P_{ch}$$

d'où l'on tire:

$$P = 2 \cdot U \cdot \sqrt{I_c^2 + (I_a + I_n)^2} + 1{,}5\,P_{ch} + P_n$$

pour $I_c = 3{,}5$; $I_n = 2{,}5$; $I_a = \frac{64 \cdot r \cdot n}{U}$

il vient, après simplification:

$$P = 2\,U \cdot \sqrt{12 + \left(\frac{64 \cdot r \cdot n}{U} + 2{,}5\right)^2} + 55 \cdot r \cdot n$$

(Transformateur existant normal: $U \cdot \sqrt{3} \cdot 2{,}5 \cdot 2 = 8{,}65 \cdot U$). Mutateur: $P_{ch} = 37 \cdot r \cdot n$

e) *Transformateur* avec enroulement en zigzag pour dégivrage successif (en 7...8 heures) de chaque tronçon: Les formules restent les mêmes que sous d), mais $I_c = 4$; $n = 1$.

f) *Transformateur transversal* pour dégivrage successif (en 7...8 heures) par circulation de courant.

$$P = I_c \cdot Z \cdot 3 \cdot I_c = 3 \cdot I_c^2 \cdot Z = 3 \cdot 4^2 \cdot Z =$$
$$P = 48 \cdot Z$$

VI. Applications à des cas concrets.

Comparons les trois principaux systèmes, soit le dégivrage par mise en court-circuit, le chauffage préventif par courant continu et le dégivrage par courant continu sans interruption de service, en les appliquant à un exemple de réseau de distribution ramifié à 11 kV, puis à un réseau d'interconnexion bouclé de 20 kV et enfin à un réseau de transport de force à haute tension 130 kV. Nous exclurons le cas de plusieurs lignes en parallèle dont le dégivrage peut se faire sans dispositif spécial.

A. Réseau de distribution à 11 kV.

Ce réseau est alimenté par sa propre centrale A; en outre, il est relié à un réseau voisin en E par un transformateur de 2000 kVA. Divers tronçons dérivent de l'artère principale H-A-E. Dans le schéma figurent les transformateurs de distribution principaux.

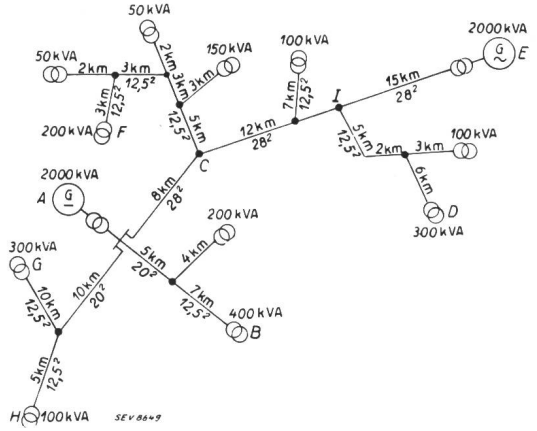

Fig. 13.

a) *La mise en court-circuit successive* des diverses artères et antennes serait applicable au point de vue coût; par exemple, le tronçon C-F à alimenter de A exigerait un courant de l'ordre de 125 A. L'impédance totale de A à F est de 24 ohms; la tension à appliquer serait de 5 kV et la puissance de chauffe de quelque 1150 kVA. Les tronçons EC et ED seraient à alimenter de E.

Un inconvénient sérieux est l'interruption de l'exploitation, laquelle, étant donné la ramifica-

tion du réseau, affectera tous les petits transformateurs du secteur intéressé.

b) *Le chauffage préventif simultané par courant continu* à partir d'un point central entraîne la surcharge en courant de chauffe de l'artère principale et par suite la mise en œuvre d'une puissance importante. En effet, supposons que le chauffage se fasse de A. La mise à terre aux extrémités des tronçons pour le retour du courant se ferait de préférence à travers les transformateurs d'une certaine puissance, par exemple B, D, E, F, G, voir fig. 14 où

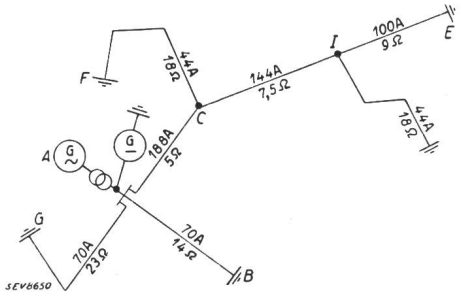

Fig. 14.

figurent les points de mise à terre, ainsi que les courants de chauffe et les résistances des divers tronçons. En calculant avec une densité de 3,5 A/mm², on obtient une puissance de chauffe de l'ordre de 1800 kW. Un mutateur pour une telle puissance coûterait, avec les accessoires, fr. 70 000.— à fr. 80 000.—.

Pour obtenir une répartition convenable du courant continu sur les divers tronçons il faudrait, la tension appliquée étant la même pour tous, intercaler des résistances de valeur appropriée en certains points de mise à la terre, ce qui augmenterait quelque peu la puissance à produire.

Les transformateurs de mise à la terre devront être renforcés. Par exemple, le transformateur F, d'une puissance nominale de 200 kVA, sera à prévoir au côté H T pour 44 A, couplage zigzag, soit $840 \cdot 1{,}15 = 970$ kVA, et au côté BT pour 200 kVA; la puissance augmenterait donc dans le rapport de 400 à 1170 kVA et le coût, approximativement dans le rapport 1 à 1,9. (La superposition de courant continu n'oblige, il est vrai, au point de vue puissance, à augmenter que le cuivre, le fer ne dépendant que de la tension du réseau; cependant l'encombrement plus grand des enroulements oblige pratiquement à augmenter le fer dans la même proportion.) Pour le transformateur 400 kVA en D, les rapports sont: 800 à 1400 kVA pour la puissance et 1 à 1,4 pour le coût. Quant au transformateur d'alimentation en A, sa puissance sera (voir formule sous V d, où $U = 11$ kV, $I_c = 328$ A, $I_n = 105$ A; $P_{ch} = 1800$ kW; $P_n = 2000$ kVA) de 14 200 kVA au lieu de $2 \cdot 2000 = 4000$ kVA; les rapports deviennent donc 1 à 3,55 et 1 à 2.

A noter qu'on laisserait nombre de tronçons en dehors des circuits de chauffe.

Remarque. Il est vrai que l'on n'aura pratiquement à chauffer qu'une partie du réseau, tous les tronçons n'étant pas sujets au givre. Le renforcement des transformateurs ne sera pas important. C'est le coût du mutateur qui, quoique moins élevé, prédomine.

c) Par contre on diminuera beaucoup la puissance de chauffe si l'on décentralise le chauffage, évitant par là de surcharger l'artère principale. P. ex., en chauffant à partir de A, de B, de F, de H et de D, on n'aurait besoin que de 7 à 800 kW au total. Le renchérissement des transformateurs ne serait pas considérable. Il faudra, il est vrai, 5 sources distinctes. On choisira la solution optimum en tenant compte des conditions locales.

d) *Dégivrage successif par courant continu. Selfs de raccordement.* Soit le tronçon CF. Le courant est, à une densité de 4 A/mm², de 50 A; la résistance, de 18 ohms; la puissance de la self en zigzag pour le retour du courant est de $50 \cdot 11 \cdot \sqrt{3} \cdot 1{,}15 =$ 1120 kVA (ce qui équivaut à un transformateur de 550 kVA); celle de la self d'alimentation, de 1400 kVA (voir formule sous V c); la puissance de la source, de $3 \cdot 50^2 \cdot 18 = 135$ kW.

Pour le tronçon CI, le courant est de 115 A, la résistance, de 7,5 ohms, la puissance des deux selfs, de 2500 et 3200 kVA (ce qui équivaudrait à des transformateurs de 1300 et de 1600 kVA pesant 3 t et coûtant fr. 6000.— à fr. 7000.—). La puissance du mutateur à courant continu serait de $3 \cdot 115^2 \cdot 7{,}5$ ohms $= 290$ kW; un tel mutateur, avec self de raccordement et appareillage coûterait quelque fr. 25 000.—. Le total de la dépense serait de l'ordre de fr. 35 000.—. L'ensemble, mutateur, self et appareillage, pèserait quelque 6 t.

En limitant le dégivrage à des tranches successives de 3 ou 4 km seulement, on ramènerait la puissance du mutateur à 100 kW. Une telle installation serait transportable.

β) *Emploi des transformateurs de service; chauffage à partir de A.* Le transformateur 2000 kVA en A sera muni d'un enroulement 11 kV en zigzag dimensionné pour $\sqrt{I_c^2 + I_n^2} = \sqrt{115^2 + 105^2} =$ 156 A, ainsi que d'un enroulement pour le mutateur; puissance et prix croîtront dans le rapport 1 à 1,55 et 1 à 1,3. Les transformateurs par lesquels le courant doit faire retour seront à dimensionner en conséquence (courant de chauffe du tronçon, couplage de l'enroulement 11 kV en zigzag; le renforcement n'est toutefois pas considérable, ces appareils étant généralement prévus pour une puissance assez élevée par rapport à la capacité de la ligne). Le dispositif étant composé d'appareils stationnaires, ce système est applicable.

On arrive à la *conclusion* que pour des réseaux de distribution ramifiés, le dégivrage par courant continu par l'intermédiaire des transformateurs de service, quoique un peu coûteux, est applicable. Le service n'est pas interrompu.

B. Réseau 20 kV.

Il s'agit de lignes 20 kV reliant les centrales de P, F et V au poste collecteur de T.

a) *Mise en court-circuit.* Les lignes F-T et V-T devront être mises successivement hors service. Par contre, la liaison V-F pourra être maintenue par l'une des deux lignes.

Le transformateur de chauffe sera installé au point central du réseau, c'est-à-dire en F, d'où l'on

peut dégivrer successivement les deux artères F-V et les lignes F-V et F-P. Quant à la ligne V-T, elle devra être alimentée par l'intermédiaire de l'une des artères F-V (64 mm²); on aura donc un tronçon total F-V-T à alimenter à la fois. La puissance de chauffe sera:

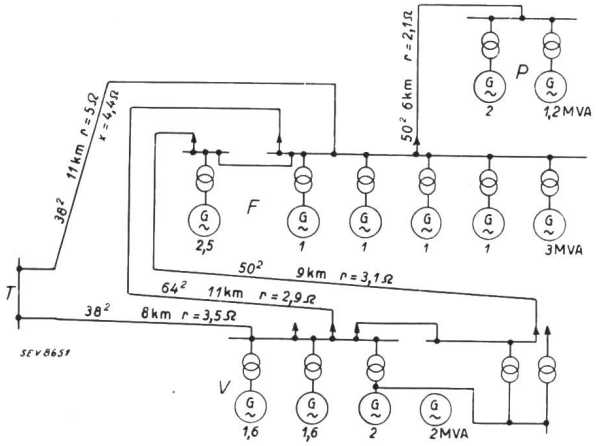

Fig. 15.

Ligne F-V-T: résistance = 6,4 ohms/phase, réactance = 7,2 ohms; impédance = 9,6 ohms, densité de courant = 10 A/mm²; intensité 385 A; tension de chauffe = $9{,}6 \cdot 385 \cdot \sqrt{3}$ = 6400 V; puissance de chauffe apparente : $6{,}4 \cdot \sqrt{3} \cdot 385$ = 4400 kVA; puissance effective = $3 \cdot i^2 \cdot r = 3 \cdot 385^2 \cdot 6{,}4$ = 3900 kW.

Ligne F-T: $r = 5$ ohms; $x = 4{,}4$ ohms; $z = 6{,}7$ ohms; densité = 10 A; intensité = 385 A; tension de chauffe = 4,5 kV; puissance apparente = 3000 kVA; puissance effective = 2250 kW.

Ligne F-V: $r = 2{,}9$ ohms; $x = 4{,}2$ ohms; $z = 5{,}1$ ohms; densité = 7,8 A; intensité = env. 500 A; tension de chauffe = 4,4 kV; puissance apparente = 3800 kVA; puissance effective 2180 kW.

Le transformateur de chauffe est donc à prévoir pour 4400 kVA, 6400 V.

On pourra probablement, dans le cas présent, chauffer aussi les lignes directement à l'aide des alternateurs 6000 V. Il faudra pour cela toutefois mobiliser deux machines, l'une de 3000, l'autre de 1000 kVA et constituer un service de chauffage séparé. Les conditions de service et les possibilités de connexions ou de commutations internes dictent le choix de la solution.

Mentionnons qu'une self de charge, pour dégivrage successif en 7 ... 8 heures, devrait absorber environ 4 A/mm², soit, pour le tronçon F-V, $4 \cdot 64 \cdot 20 \cdot \sqrt{3}$ = env. 9000 kVA puissance qui serait à peine disponible à la centrale. Une telle bobine, qui équivaut à un transformateur de 5000 kVA, n'est pas transportable.

b) Ce réseau, étant donné sa configuration (lignes doubles et boucles), se prête mal au *chauffage préventif simultané par courant continu.*

On peut obtenir un chauffage préventif plus économique simplement en provoquant une circulation de courant dans les boucles à l'aide d'un transformateur transversal. Par exemple, la boucle T-F-V-T a une résistance totale de 10 ohms, une réactance de 9,4 ohms et une impédance de 13,7 ohms. Pour obtenir un courant de $3{,}5 \cdot 38{,}5$ = 135 A dans les deux tronçons T-F, il faut une tension additionnelle de $135 \cdot 13{,}7 \cdot \sqrt{3}$ = 3200 V. Le transformateur transversal à intercaler dans la ligne aura une puissance propre de $135 \cdot 3{,}2 \cdot 3$ = 750 kVA et sera isolé pour 20 kV. Comme ce courant de 135 A se répartit sur les deux lignes V-F, il suffira, puisque par hypothèse on est en marche à faible charge, de couper l'une des deux lignes.

c) *Dégivrage successif par courant continu. Emploi de selfs de raccordement.* Le courant de chauffe exigé par le tronçon F-T est de $4 \cdot 38{,}5$ = 150 A; la tension de chauffe est de 750 V et la puissance de 340 kW. Quant au tronçon 64 mm² F-V, le courant est de 256 A, la tension, de 745 V et la puissance, de 570 kW. Le prix du mutateur avec les accessoires (766 A, 745 V, 570 kW) est de l'ordre de fr. 30 000.—. Quant aux selfs, d'une puissance de 11 300 et de 9000 kVA, elles coûteraient environ fr. 40 000.—. Le total de la dépense serait de fr. 70 ... 80 000.—. Les selfs sont difficilement transportables étant donné leur poids (10 t chacune).

Modification des transformateurs existants. Le transformateur 3000 kVA de F recevrait un enroulement 20 kV en zig-zag pour 256 A et un enroulement 570 kW pour alimentation des mutateurs; puissance et prix croîtraient dans le rapport 1 à 2,55 et 1 à 1,7; quant au transformateur où le courant fait retour, il recevrait de même un enroulement 20 kV en zigzag pour 256 A. La solution serait applicable, comportant uniquement des appareils stationnaires. La boucle serait à ouvrir pour l'opération.

La conclusion est que l'existence d'une boucle favorise soit la mise en court-circuit soit le chauffage préventif par circulation de courant. Toutefois le dégivrage à l'aide de courant continu sans interruption du service serait aussi applicable à ce réseau.

C. Réseau de transport à 130 kV.

Supposons un réseau à haute tension suivant le schéma de la fig. 16. Soit C la centrale principale. Le réseau est alimenté également en H, en G et en P.

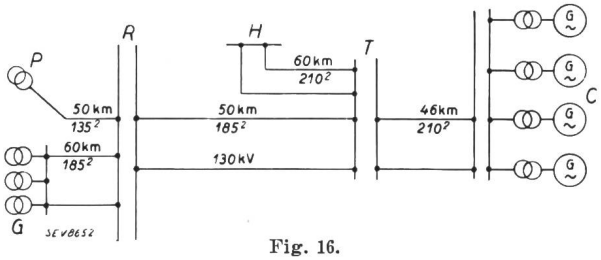

Fig. 16.

a) *Mise en court-circuit.* Les lignes doubles permettent le dégivrage sans interruption du service. Comme il s'agit de lignes d'aluminium, l'intensité sera de 58 % environ de celle d'une ligne de cuivre. On admettra un temps de dégivrage de 7 à 8 h, ce qui est, somme toute, loisible, puisqu'on n'interrompt pas le service. La densité nécessaire serait à peu près de 3,5 A/mm² pour

un conducteur Cu de cette section; c'est-à-dire que l'intensité serait d'environ 430 A pour l'aluminium, la tension de chauffe, de 30,6 kV et la puissance, de l'ordre de 23 000 kVA sous 30 600 V. On peut songer à employer dans ce but l'un des transformateurs de C dont la puissance est un peu supérieure à cette valeur, si son enroulement HT peut être commuté pour livrer env. 30 600 V.

Le dégivrage du tronçon T-H pourra se faire soit de C à l'aide du même transformateur, soit de H à l'aide d'un transformateur de 18,6 kV, 14 000 kVA.

Le dégivrage des tronçons P-R (21 ohms, 290 A, 10,6 kV, 5400 kVA) et G-R (26 ohms, 380 A, 17,1 kV, 11 300 kVA) se ferait de P et de G.

Si l'on désirait opérer rapidement, c'est-à-dire en une $^1/_2$ h environ, on calculerait comme suit:

Pour un conducteur en cuivre de 210 mm² il faudrait, à une température ambiante de —12° et un vent de 3 m/s, une densité de courant de l'ordre de 6,5 A (valeur obtenue par extrapolation des courbes Jobin) c'est-à-dire une intensité de 1400 A pour amener la fusion en $^1/_2$ h d'un manchon de glace comme plus haut; pour l'aluminium, cette intensité serait de 850 A environ.

Le dégivrage du tronçon C-R devra se faire de C; il faudrait donc alimenter une des artères avec ce courant. L'impédance étant de 41 ohms par phase, la tension de chauffe serait de 60 kV et la puissance du transformateur de chauffe de 85 000 kVA sous 60 kV.

Remarque: Pratiquement une portion seulement du tronçon sera givrée ce qui permettra, suivant les cas, de réduire la puissance de chauffe.

b) *Le chauffage préventif simultané par courant continu* de l'ensemble des lignes marchant à faible charge mettrait en œuvre des puissances très élevées. Le renforcement des transformateurs eux-mêmes serait acceptable; c'est le prix des mutateurs qui compromet la solution.

Si toutefois l'on tient compte que certains parages seulement sont sujets au givre, on peut alors en envisager l'application.

c) *Dégivrage successif des divers tronçons par courant continu.* *α) selfs de raccordement.* Elles permettent, il est vrai, de limiter l'injection du courant continu à la seule fraction givrée et par là de réduire considérablement la puissance du mutateur; mais elles seront elles-mêmes de grosse puissance.

β) Utilisation des transformateurs de service. On enverrait successivement le courant continu à travers une artère du tronçon C-H puis de C-G, etc. La résistance d'une artère C-G étant de 25 ohms, la puissance serait de l'ordre de 14 000 kW.

En utilisant deux transformateurs en C, on obtiendrait un accroissement des puissances par rapport aux transformateurs normaux de 1 à 1,7 et un accroissement des prix de 1 à 1,3, ce qui serait tout à fait acceptable. C'est le prix du mutateur qui serait élevé.

γ) On pourrait recourir à une *solution intermédiaire.*

Un ensemble stationnaire, mutateur et self, serait prévu à T d'où l'on alimenterait successivement T-C, T-H, T-R; les transformateurs de service des divers postes serviraient pour le retour du courant. Puissance du mutateur = 4000 kW; de la self = 100 000 kVA.

Enfin, on pourra réserver le chauffage par courant continu aux seules lignes simples, c'est-à-dire ici à R-P: 243 A, 12 Ω, puissance du mutateur = 2100 kW, puissance des enroulements primaires des transformateurs = 63 000 kVA.

Aux lignes doubles on appliquera:

d) *Le chauffage par circulation de courant.* Un transformateur transversal à T serait inséré successivement, à l'aide de jeux de sectionneurs, dans les boucles constituées par les deux artères de chaque tronçon T-C, T-H, T-R. On obtiendrait néanmoins encore de grosses puissances pour les appareils: par exemple la boucle C-T a une impédance de 39 ohms; pour obtenir un courant de 430 A, il faudrait une tension d'environ 29 kV et un transformateur additionnel d'une puissance propre de 21 600 kVA, ce transformateur se composant d'un appareil série isolé pour 130 kV et d'un appareil d'excitation.

Toutefois si l'on pouvait, sans trop de difficulté, établir une mise en parallèle provisoire des 2 artères, vers le milieu du tronçon, la tension passerait à 14,5 kV et la puissance du transformateur transversal, à 10 800 kVA. Comme on ne peut songer à déplacer ces appareils, d'un poids de 18 t chacun, d'un tronçon à l'autre, on chaufferait par mise en court-circuit les tronçons qui ne peuvent être atteints de T.

Conclusion. La mise en court-circuit successive ou, si la puissance transportée suffit, la simple mise hors service alternative de chacune des artères de la ligne double, sera la solution la plus économique. Cette conclusion ne vaut toutefois que pour des réseaux comportant des lignes doubles. L'emploi d'un mutateur avec self reste une solution accessible pour les lignes simples.

VII. Exemples de réalisation.

a) *Ligne du Gothard à 150 kV* [5]).

Cette ligne relie les usines du Tessin à celles de la Suisse du Centre et du Nord. Elle constitue le cas particulier d'une ligne à haute tension en artère *simple* formant barre collectrice pour les diverses

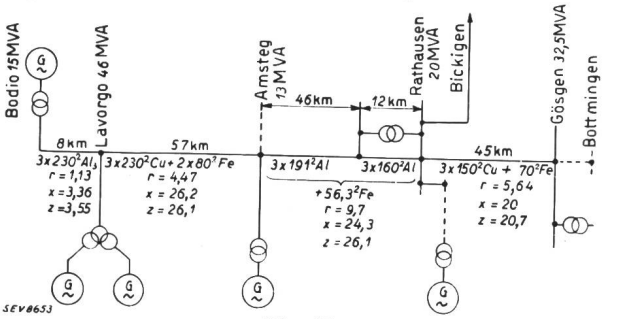

Fig. 17.

[5]) Voir Gervasoni, Bulletin ASE 1937, No. 8, et Pervangher, CIGRE 1937.

centrales échelonnées sur son parcours: Bodio, Lavorgo, Amsteg, Rathausen (Siebnen-Rempen), Gösgen.

La longueur totale actuelle est d'environ 160 km; après achèvement du tronçon Gösgen - Bottmingen, la ligne s'étendra jusqu'au Rhin (centrale de Rybourg-Schwörstadt).

La partie la plus exposée au givre est la portée du tronçon Lavorgo - Amsteg, qui franchit les Gorges des Schöllenen. Son profil au droit des pylônes est donné par le croquis de la fig. 18. C'est le seul tronçon que l'on ait prévu de dégivrer. On le fait pour l'instant par mise en court-circuit du tronçon à Göschenen, avec alimentation par Lavorgo.

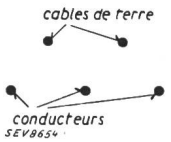

Fig. 18.

La longueur de ce tronçon est de 43 km, la section des conducteurs, de 230 mm² bronze au droit des grandes portées du parage à givre et de 230 mm² cuivre pour le reste du tronçon, l'impédance, de 19,7 ohms/ph. La densité du courant qu'on envoie dans la ligne pendant les heures creuses pour dégivrer les 3 fils en quelques heures n'est pas élevée, étant donné la forte résistivité du bronze et la forte section; elle varie, suivant la température ambiante et le vent, entre 1,2 et 2 A/mm² (1,2 ... —6°). Si l'on calcule avec 2 A/mm², on trouve qu'il faut 460 A, 15,8 kV et env. 12 500 kVA.

La ligne comporte aussi 2 câbles de terre = 80 mm²; leur résistance mécanique est assez élevée pour ne pas nécessiter, en général, de dégivrage. Comme les conducteurs sont disposés en nappe horizontale et que les câbles de terre sont compris dans l'espace libre entre les deux conducteurs, il est loisible de dégivrer ceux-ci sans les premiers, le coup de fouet consécutif à la disparition de la flèche n'amènera pas les conducteurs en contact avec les câbles de terre.

On peut toutefois, si l'on veut dégivrer ces derniers, former un circuit de chauffe séparé; il suffit d'un courant faible (80 A) étant donné leur haute résistivité.

Plus tard, le trafic d'énergie, en devenant plus intense, exclura probablement un mode de dégivrage comportant la mise hors service. Si l'on envisage l'application du chauffage par courant continu, on obtient: $I = 460$ A, $r = 4\ \Omega$, puissance = 2540 kW; augmentation de la puissance des transformateurs de l'Usine de Piottino = 70 %. Le chauffage par courant continu est donc tout à fait acceptable.

b) *Ligne 35 kV de la Société algérienne d'éclairage et de force.*

On a adopté le dégivrage par mise en court-circuit des tronçons. Le réseau est divisé en plusieurs secteurs de réchauffage qu'on alimente successivement de la centrale par un service séparé. Le rapport No. 203 de la CIGRE 1939, de M. Haour, ingénieur en chef, donne tous les détails désirables sur cette réalisation [6]).

VIII. Divers.

On a préconisé aussi entre autres solutions:

a) De chauffer les lignes avec du courant haute fréquence, ce qui, grâce à l'effet pelliculaire, permettrait de réduire fortement les intensités en jeu; ou bien, plus radicalement,

b) d'éliminer le chauffage en accroissant la sécurité contre les ruptures et les courts-circuits des lignes de telle façon qu'elles tolèrent la surcharge due au givre (augmentation des sections, réduction des portées, accroissement des flèches, renforcement des pylônes, multiplication des pylônes d'ancrage, modification du tracé, doublure des lignes par des lignes de réserve dans les parages à givre, adoption de pylônes articulés, disposition des conducteurs en nappe horizontale ou dans des plans verticaux différents, accroissement des distances entre conducteurs, etc.).

L'étude de telles lignes restant à faire, on ne peut guère se prononcer. On peut présumer toutefois qu'elles seront beaucoup plus coûteuses qu'une installation de chauffage, sans d'ailleurs, leur sécurité n'étant pas absolue, remplacer entièrement celle-là.

IX. Remarque finale.

Pour juger de l'opportunité d'une installation de chauffage contre le givre, il importe de ne pas perdre de vue que de plus en plus les réseaux se préoccupent avant tout d'assurer la continuité de l'exploitation. Les pertes de recettes et le tort moral causés par la rupture ou la disjonction prolongée d'une ligne, tendent à devenir, pour un service électrique, le facteur primordial, qui relègue à l'arrière-plan le prix de revient des installations.

Or le dégivrage, et plus particulièrement le dégivrage par mise en court-circuit, le plus fréquemment pratiqué jusqu'ici, entraîne des interruptions de service, et est en opposition directe avec les intérêts des exploitants. Il opère aussi dans des conditions atmosphériques défavorables qui forcent à mettre en jeu de très grosses puissances. Enfin il n'empêche les incidents que s'il intervient suffisamment tôt. Par contre le chauffage préventif par courant continu, en même temps qu'il opèrerait dans des conditions de température ambiante et de vent bien déterminées et nettement plus favorables, éliminerait les perturbations dues aux intempéries tout en permettant la continuité de l'exploitation.

[6]) Un autre exemple de dégivrage par mise en court-circuit, réalisé au Japon est décrit dans le rapport de Uyéno et Matsuoka, No. 212 de la CIGRE 1935.