Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 48 (1957)
Heft: 12

Artikel: Le contrôle de la surcharge des lignes aériennes par image thermique
Autor: Cuénod, M.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058682

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: 14.12.2025

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

einige neu zu beschaffende Ae-4/4-Lokomotiven treten müssen. Im übrigen werden auch einige der dem lokalen Verkehr dienenden Personenzüge durch Triebwagenzüge ersetzt werden können.

Damit steht im Jubiläumsjahr der Gotthardbahn eine baldige und weitgreifende Verjüngung ihres Triebfahrzeugparkes in Aussicht. Diese Verjüngung wird wesentlich dazu beitragen können, eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit dieses wichtigen Schienenweges herbeizuführen.

37 Jahre elektrische Zugförderung auf der Gotthardstrecke! Dies ist eine kurze Spanne in der Entwicklungsgeschichte der Technik. Aber wie oft und wie rasch haben sich doch schon während dieser kurzen Zeit nicht nur die an die Zugförderung gestellten Anforderungen, sondern auch die zu ihrer Erfüllung gebotenen Möglichkeiten geändert! Die Ansprüche sind gewaltig gestiegen, aber auch die Technik ist fortgeschritten und hat keine Wünsche unerfüllt gelassen.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. *E. Meyer*, dipl. Elektroingenieur ETH, Maschineningenieur des Kreises III der Schweizerischen Bundesbahnen, Sihlpostgebäude, Zürich 4.

Le contrôle de la surcharge des lignes aériennes par image thermique

Par *M. Cuénod*, Genève, et *R. Renchon*, Bruxelles

621.315.1 : 621.3.017.7

Dans l'ensemble des installations destinées au transport de l'énergie électrique, les lignes constituent l'élément le plus couteux; il est donc essentiel d'utiliser aussi complètement que possible leur capacité et de les protéger contre tout risque. Dans ce but, le critère le plus rationnel à prendre en considération dans un grand nombre de cas est la température du câble. Cette température dépend d'une part de conditions externes au câble, température de l'air ambiant, vent, etc., d'autre part du courant transporté et de l'allure des variations de ce courant.

L'image thermique de lignes aériennes tient compte aussi fidèlement que possible de ces différents facteurs; elle est ainsi susceptible d'assurer une protection efficace de ces lignes tout en permettant d'utiliser au maximum leur capacité de surcharge, en particulier dans le cas des fluctuations des puissances d'échange qui se produisent sur les lignes d'interconnexion.

Unter den Einrichtungen, die dem Transport elektrischer Energie dienen, stellen die Hochspannungsleitungen das teuerste Element dar. Es ist deshalb zweckmässig, ihre Leistungsfähigkeit möglichst weitgehend auszunützen und sie gegen jedes Risiko zu schützen. Bei der Verwirklichung dieser Aufgabe dient in vielen Fällen die Temperatur der Leiter als geeignetstes Kriterium zur Beurteilung der Verhältnisse. Sie hängt einerseits von den äusseren Bedingungen ab, denen die Leiter ausgesetzt sind (Umgebungstemperatur, Wind usw.), anderseits von der Strombelastung und deren zeitlichem Verlauf.

Das «thermische Nachbild» von Freileitungen trägt diesen verschiedenen Faktoren möglichst getreu Rechnung. Damit ist man in der Lage, die Leitungen wirksam zu schützen, wobei sich diese bis an die Grenze ihrer Überlastbarkeit ausnützen lassen, was insbesondere bei den Belastungsschwankungen, wie sie bei der Übertragung von Ausgleichslast vorkommen, vorteilhaft ist.

I. Introduction

Dans l'ensemble des installations à haute tension que nécessite le transport de l'énergie électrique, les lignes constituent l'élément le plus coûteux. Il est donc essentiel, d'une part, d'en tirer le meilleur parti possible et, d'autre part, de les protéger contre tout risque de dégâts.

Des moyens très complets ont été développés pour protéger les lignes contre les risques «externes» (coups de foudre, courts-circuits, etc.); par contre en ce qui concerne les risques «internes» provenant de l'échauffement du conducteur à la suite des surcharges de puissance transitée par la ligne, les moyens usuels de protection, basés sur des relais à maximum de courant plus ou moins temporisés, sont relativement primitifs et ne tiennent compte que très indirectement du véritable critère à prendre en considération, à savoir la température des conducteurs.

D'une part cette température dépend de conditions extérieures au câble: température de l'air ambiant, vent, etc.; d'autre part, la capacité thermique du câble amortit les variations de sa température par rapport aux variations du courant qu'il transporte.

Une solution qui tient compte de façon systématique des différents facteurs tant externes qu'internes, dont dépend la température des conducteurs, est constituée par «*l'image thermique*» de ligne [1, 2, 3, 19][1]). Le but de cet article est de décrire succinctement ce moyen de contrôle et de montrer les principales perspectives qu'il ouvre pour l'exploitation des réseaux.

La capacité des lignes d'interconnexion en particulier est souvent faible par rapport à la puissance des complexes qu'elles raccordent. La puissance d'échange qu'elles transportent est soumise à de continuelles fluctuations, ainsi qu'à de brusques changements en cas d'incident, fourniture de secours, etc. Il en résulte que cette puissance peut parfois largement dépasser, de façon momentanée, le calibre nominal de la ligne sans toutefois provoquer nécessairement un échauffement dangereux.

L'élimination complète des fluctuations de charge sur les lignes de transport d'énergie nécessiterait la mise en œuvre de moyens locaux de réglage très importants et de coûteux efforts de variation de production; elle diminuerait ainsi le bénéfice que l'on est en droit d'attendre de l'interconnexion. Aussi la tendance actuelle est-elle de chercher à régler la valeur «moyenne» des puissances d'échange et de tolérer de fortes variations passagères, pour autant toutefois que la température du câble n'atteigne pas une valeur inadmissible.

On se propose d'étudier plus particulièrement la répercussion de l'allure de ces variations de charge sur la capacité de surcharge d'une ligne et de mettre

[1]) Voir la bibliographie à la fin de l'article.

en évidence l'intérêt d'une image thermique de ligne pour le contrôle ou la protection des lignes aériennes.

II. Capacité de charge d'une ligne aérienne

A. En fonction des facteurs caractéristiques de son milieu ambiant

La température atmosphérique subit d'importantes variations, tant journalières que saisonnières. D'autre part, il est exceptionnel que l'atmosphère soit absolument calme. L'influence du vent et de la température atmosphérique sur la capacité de charge d'une ligne aérienne est importante [3...12, 17...19]. A titre de rappel, la fig. 1 montre la charge

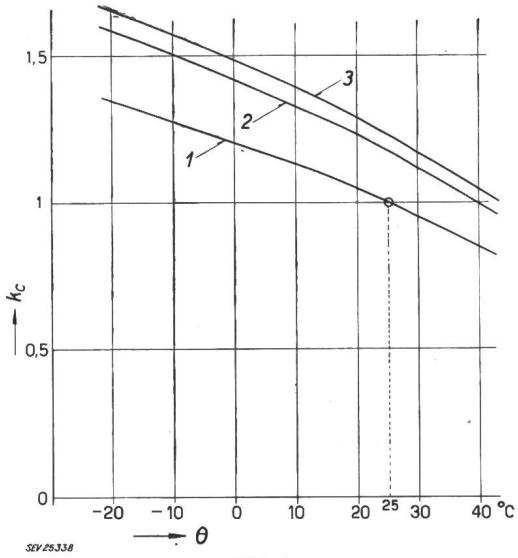


Fig. 1
Capacité de charge permanente d'une ligne aérienne en fonction de la température extérieure Θ et du vent

$$k_c = \frac{I_m}{I_{m,r}} = \text{facteur de charge}$$

I_m courant maximum admissible; $I_{m,r}$ courant maximum admissible pour le régime de référence (25 °C, air calme, température du métal 70 °C). 400 A pour câble 210 mm² Al-Ac, 810 A pour câble 550 mm² Aldrey

1 air calme, câble 210 mm² Al-Ac et câble 550 mm² Aldrey; *2* vent de 0,6 m/s, câble 550 mm² Aldrey; *3* vent de 0,6 m/s, câble 210 mm² Al-Ac

admissible de 2 types de câbles en fonction de la température de l'air, en prenant comme référence le courant maximum admissible pour une température de l'air de 25 °C. La courbe *1* se rapporte au cas où il n'y a pas de vent, les courbes *2* et *3* correspondent au cas où il y a un vent de 0,6 m/s. On voit ainsi, par exemple, qu'en hiver, avec une température de —10 °C et un vent encore relativement faible, de 0,6 m/s, toutes autres choses restant égales, la ligne peut être surchargée d'environ 50 à 55 % par rapport au régime pris comme référence correspondant au temps calme d'été [7].

B. En fonction de l'allure des variations de la puissance qu'elle transporte

Les fluctuations par rapport au programme de la puissance d'échange transmise par une ligne et les fluctuations corrélatives de la température de ses conducteurs apparaissent généralement comme des grandeurs aléatoires pouvant comprendre ou non des termes cycliques.

Pour un certain diagramme de puissance transportée et compte tenu de la capacité thermique des conducteurs, il est possible de prédéterminer le diagramme correspondant des fluctuations de la température et de prévoir ainsi la charge admissible de la ligne.

On peut notamment chercher à établir une statistique des à-coups de température, c'est-à-dire du nombre de ces à-coups en fonction de leur amplitude, dans un intervalle de temps donné. On peut également s'efforcer de déterminer l'écart type (écart moyen quadratique) caractérisant la distribution statistique des fluctuations de la température.

1. Détermination de la valeur maximum des à-coups de température du câble

a) Variation brusque de charge

La variation de la température résultant d'une variation brusque de charge, c'est-à-dire se présentant sous forme d'un échelon rectangulaire, soit la réponse indicielle $\Phi_{I\Theta}(t)$, est donnée par la loi exponentielle (annexe I).

$$\Phi_{I\Theta}(t) = \frac{\Delta\Theta/\Theta_0}{\Delta I/I_0} = k_p\,(1 - e^{-\frac{t}{T_t}})$$

$\Delta\Theta$ variation de la température par rapport à la température du régime initial pris comme référence

ΔI variation du courant transporté par la ligne par rapport au courant du régime initial pris comme référence

Θ_0, I_0 température et courant du régime initial pris comme référence (surtempérature des conducteurs par rapport à la température ambiante)

t temps

T_t constante de temps thermique de la ligne (de l'ordre de 5 à 15 minutes suivant le type de conducteur)

k_p «coefficient permanent» caractérisant les écarts de température en régime permanent ($k_p \approx 2$).

b) Variation quelconque de la charge

Dans le cas d'un diagramme de charge de forme quelconque, il est possible, au moyen du calcul à l'aide de suites [13] de calculer le diagramme de température correspondant:

On décompose le diagramme de charge de la ligne en une succession d'à-coups caractérisés par une certaine durée de base T_s et une certaine amplitude maximum ΔI_m. Pour chaque forme et chaque durée d'à-coups de charge, on détermine la température maximum $\Delta\Theta_m$ de l'à-coup de température correspondant. A partir de la statistique des à-coups de charge, on peut ainsi établir la statistique des à-coups de température. La fig. 2 représente ainsi la variation relative de la température résultant d'un à-coup de charge de forme rectangulaire; la fig. 3 représente cette même variation pour un à-coup de charge de forme triangulaire.

Les courbes *1* et *2* de la fig. 4 représentent le «*coefficient d'amortissement* k_a» que l'on peut déduire des fig. 2 et 3, c'est-à-dire le rapport en fonction de la durée des à-coups entre la valeur maximum de la variation de température $\Delta\Theta_m$ et l'écart de la température qui serait atteint en régime permanent $\Delta\Theta_r$.

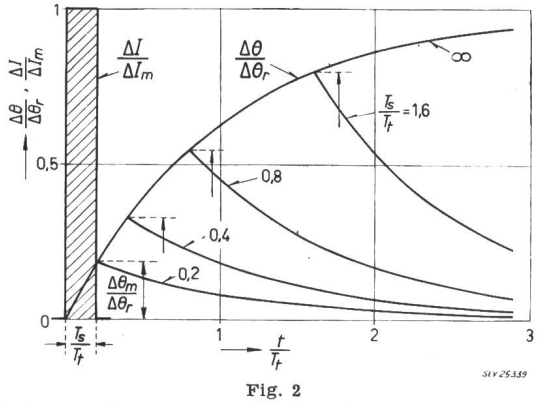


Fig. 2

Variation relative de la température résultant d'une surcharge ayant la forme d'une impulsion rectangulaire

Surface hachurée: Variation rectangulaire de la charge d'une durée relative $T_s/T_t = 0{,}2$

t/T_t temps relatif; T_s/T_t durée relative de la surcharge; T_t constante de temps thermique du conducteur (prise comme valeur de référence); $\Delta\Theta$ variation de la température par rapport à la température du régime initial; $\Delta\Theta_r$ écart de la température qui serait atteint en régime permanent; $\Delta\Theta_m$ valeur maximum de la variation de la température $\Delta\Theta$; ΔI variation du courant transporté par la ligne; ΔI_m valeur maximum de l'à-coup de courant prise comme valeur de référence

D'une façon générale, on peut considérer que la forme des à-coups de charge est comprise entre les deux cas extrêmes d'à-coups rectangulaires (courbe *1*) et triangulaires (courbe *2*), et que le coefficient d'amortissement pour un à-coup quelconque se situe dans la zone hachurée de la fig. 4. On obtient ainsi:

$$\frac{\Delta\Theta_m/\Theta_0}{\Delta I_m/I_0} = k_p \cdot k_a$$

avec k_p coefficient correspondant au régime permanent

k_a coefficient d'amortissement dynamique

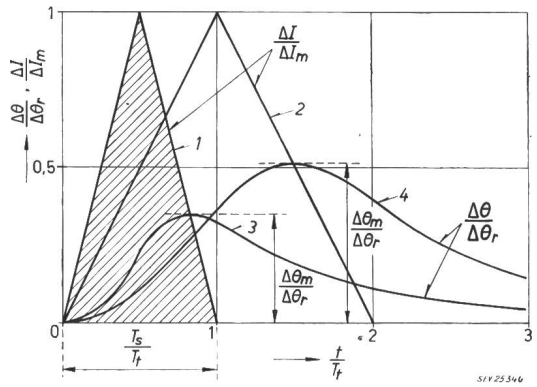


Fig. 3

Variation relative de la température résultant d'une surcharge ayant une forme triangulaire

Courbes 1 et 2: Variation relative de charge

Courbes 3 et 4: Variation relative correspondante de la température

(pour les autres symboles voir la légende de la fig. 2)

La courbe supérieure de la fig. 5 donne un échantillon du diagramme de la puissance d'échange relevé le 30 mars 1956 sur une ligne à 150 kV reliant à ce moment le réseau belge au réseau allemand. Cette ligne est composée de 3 câbles d'aluminium acier de 210 mm² de section totale; on voit que ce

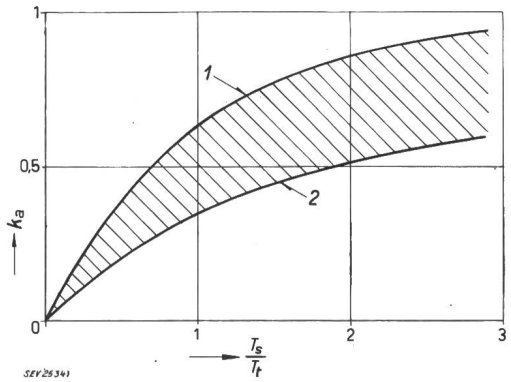


Fig. 4

Détermination du coefficient d'amortissement dynamique k_a en fonction de la durée relative de l'à-coup T_s/T_t

Courbe 1: A-coup de charge rectangulaire

Courbe 2: A-coup de charge triangulaire

$k_a = \frac{\Delta\Theta_m}{\Delta\Theta_r}$ = coefficient d'amortissement dynamique

(pour les autres symboles voir la légende de la fig. 2)

diagramme peut être décomposé en une superposition de deux genres d'à-coups: à-coups *courte durée* (au maximum 1 à 1,5 minutes) se traduisant sur l'enregistrement représenté à la fig. 5 par une succession de pointes encadrant la valeur moyenne, et à-coups de *longues durées* (15 à 30 minutes) correspondant à des variations du niveau moyen de la puissance échangée.

Admettant à titre d'exemple une constante de temps thermique T_t du câble de 10 minutes, on peut déduire de la fig. 4 que les variations de température résultant des à-coups de courte durée ($T_s \approx$ 1 min, $T_s/T_t \approx 1/10$) n'atteignent environ que 10 % de la surtempérature qui serait atteinte si les variations de charge avaient un caractère permanent, ou si, autrement dit, la capacité thermique du câble était nulle. Il en résulte que ces fluctuations de courte durée sont pratiquement filtrées et se traduisent par des fluctuations de température pratiquement négligeables. Cette constatation est confirmée par l'allure continue de la courbe inférieure de la fig. 5 représentant les variations de la température du câble correspondant au diagramme de charge donné par la courbe supérieure de la même figure.

La fig. 4 indique également la répercussion des à-coups de charge de plus longue durée sur les variations de la température du câble. On peut en particulier en déduire que le coefficient d'amortissement dynamique k_a, correspondant à une durée d'à-coup T_s égale à la constante de temps thermique T_t, est d'environ 0,5. Ainsi, en partant d'une charge nulle, une ligne peut notamment être chargée à 1,4 fois le courant permanent admissible pendant un temps inférieur ou égal à la constante de temps thermique sans dépasser l'échauffement tolérable.

Fortsetzung des allgemeinen Teils auf Seite 575
Es folgen «Die Seiten des VSE»

Fortsetzung von Seite 566

Le contrôle de la surcharge des lignes aériennes par image thermique (Suite)

Considérons à la fig. 5, l'à-coup de charge de 16.12 h à 16.32 h ayant duré 20 minutes; la charge moyenne est passée de 40 à 72 MW pour revenir à 40 MW, soit une variation de 80 %.

La température est passée de 20 à 27 °C, soit une variation d'échauffement de 116 % (avec une température de l'air égale à 14 °C). En admettant un coefficient $k_p = 2$, on trouve pour k_a la valeur de 0,73 qui correspond bien à la zone indiquée par le diagramme de la fig. 4 lorsque $T_s/T_t = 2$.

La fig. 6 représente la valeur de ce coefficient en fonction du rapport T_v/T_t.

Pour les fluctuations de courtes durées on peut estimer que le temps caractéristique de la variabilité de la charge se tient entre 10 et 15 s. En admettant à nouveau $T_t = 10$ min $= 600$ s et en posant $T_v = 12{,}5$ s nous obtenons p. ex.

$$k_a' = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{600}{12{,}5}}} = \frac{1}{7} \approx 14{,}3\,\%$$

L'écart type des fluctuations de la température n'est que de 14,3 % de celui qui serait obtenu si la capacité de la ligne était nulle ($T_t = 0$) et si les variations de température suivaient immédiatement les fluctuations de la charge. Si, par exemple, l'écart

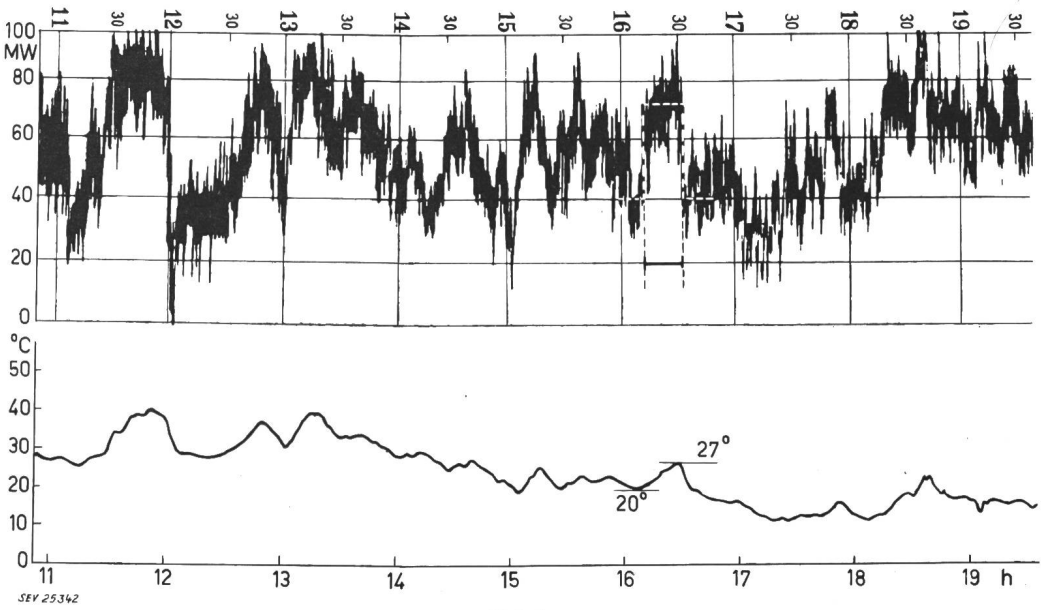


Fig. 5
Echantillon d'un diagramme de puissance d'échange et des variations correspondantes de la température du câble de la ligne d'interconnexion

2. Détermination de l'écart type des fluctuations de la température du câble

Il est connu que l'allure générale d'une fonction aléatoire peut-être caractérisée par sa fonction d'autocorrélation, et que la fonction d'autocorrélation des fluctuations de la charge d'un réseau électrique est donnée en première approximation par une courbe exponentielle [14 et 15] avec la constante de temps T_v = temps caractéristique de la variabilité de la charge.

Ainsi que le développe l'annexe II, le rapport entre l'écart type $s(\Delta\Theta)$ des fluctuations de la température et celui $s(\Delta I)$ des fluctuations du courant a la forme suivante:

$$\frac{s\,(\Delta\Theta)}{s\,(\Delta I)} = k_p \cdot k'_a$$

avec

k_p coefficient correspondant au régime permanent

k_a' coefficient d'amortissement statistique

$$k_a' = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{T_t}{T_v}}}$$

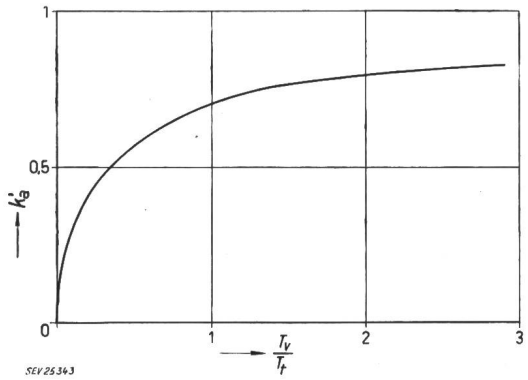


Fig. 6
Détermination du coefficient d'amortissement statistique k_a' en fonction du temps caractéristique relatif de la variabilité de la charge T_v/T_t

$$k_a' = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{T_t}{T_v}}}$$

T_t constante de temps thermique du câble

T_v temps caractéristique de la variabilité de la charge

type des fluctuations de la charge est égal à 10 %, l'écart type des fluctuations de la température est égal à $s(\Delta\Theta) = s(\Delta I) \cdot k_p \cdot k_a' = 10\,\% \cdot 2 \cdot 14{,}3\,\% \approx 3\,\%$. On sait que la probabilité qu'une fonction aléatoire obéissant à une distribution normale soit en dehors d'un intervalle correspondant à 8 fois l'écart type, est égale à 0,06 pour mille. Autrement dit, la probabilité que la variation de la température dépasse $4 \times 3 = 12\,\%$ est égale à 0,03 pour mille.

Ceci confirme la conclusion selon laquelle, par suite de la capacité thermique du conducteur, la variation de la température, provoquée par les à-coups de charge d'une durée inférieure à 1 minute, n'atteint que 10 à 15 % de celle que l'on obtiendrait si les mêmes variations de charge s'établissaient en permanence.

L'analyse est basée sur l'hypothèse que le courant est proportionnel à la puissance et sur celle que le phénomène considéré est linéaire; cette dernière hypothèse est remplie pour de faibles variations de charge; elle l'est d'autant moins que ces variations sont importantes. Il faut alors introduire comme paramètre des valeurs moyennes; cependant, étant donné la nature même des phénomènes en cause, une imprécision sur la constante de temps thermique du câble ne change pas les conclusions générales à tirer des calculs.

III. Description succincte de l'image thermique de ligne

Ainsi que le représentent les fig. 7 et 8, l'image thermique est en principe constituée par un tube de 40 à 50 cm de longueur, d'une même matière que le câble à protéger. Elle est placée sur un des portiquer d'un poste extérieur d'où part la ligne à surveilles,

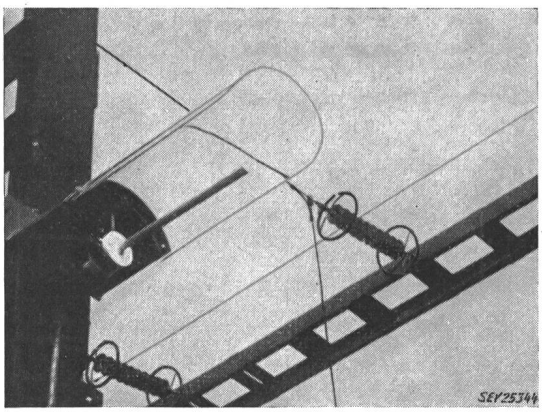
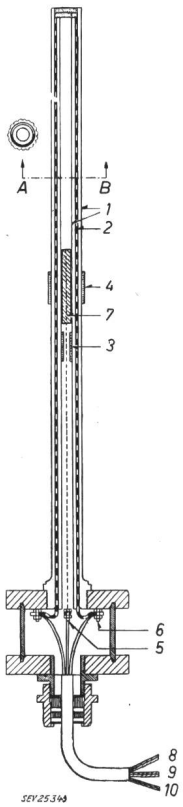


Fig. 7
Vue d'une image thermique de ligne aérienne

si possible dans un endroit exposé au soleil. L'expérience a montré qu'il était souhaitable de la protéger par un écran transparent, visible sur la fig. 7, de façon à éliminer l'influence favorable, mais souvent locale, des précipitations atmosphériques.

L'élément thermique proprement dit est constitué par un filament visible sur la coupe donnée par la fig. 8 et parcouru par le courant secondaire d'un transformateur d'intensité branché sur la ligne à



protéger, transformateur qui, d'une façon générale, existe déjà. L'image est munie, à volonté, d'un ou plusieurs thermo-contacts, réglés à différentes valeurs de température, par exemple 50, 60 et 70 °C. Une sonde thermique est raccordée à un indicateur ou un enregistreur qui permet de lire la température atteinte par l'image, c'est-à-dire par le câble de la ligne au départ du poste.

Fig. 8
Représentation simplifiée de l'image thermique de ligne 210 mm² Al-Ac

1 tubes en aluminium; *2* élément chauffant; *3* sonde interne; *4* sonde externe d'essais; *5* borne de sortie circuit de mesure interne; *6* borne de sortie circuit de chauffage; *7* thermostat; *8* circuit du thermostat; *9* circuit de chauffage; *10* circuit de mesure de la température interne

IV. Utilisation de l'image thermique

Les contacts de l'image thermique, correspondant aux températures les plus basses, peuvent être utilisés pour faire fonctionner des signaux d'avertissement ou de réglage, le dernier éventuellement pour le déclenchement de la ligne dans les postes non surveillés, par exemple.

Par suite de la constante de temps thermique du conducteur, le dépassement des paliers de température correspondant aux différents contacts est séparé par des délais relativement élevés, ce qui donne le temps au personnel d'exploitation d'intervenir suffisamment tôt, de façon à éviter tout déclenchement indésirable de la ligne.

Si une ligne à protéger a une longueur de plusieurs dizaines de km, la température de son câble n'est probablement pas exactement la même sur tout son parcours. Cependant, les expériences déjà acquises dans ce domaine ont montré que les grands écarts de température sont relativement rares. Par mesure de sécurité, il est possible de garder une certaine marge de sécurité entre la température correspondant au seuil de fonctionnement de la protection et la température maximum admissible pour les conducteurs. Il est également intéressant de placer une image à chaque extrémité d'une ligne si sa longueur dépasse 30 à 50 km en plaine.

La fig. 9 montre que la température mesurée par une image thermique correspond bien à la température des conducteurs.

Il peut parfois y avoir des raisons autres que la température du câble des lignes pour limiter la charge d'un transport d'énergie électrique: capacité des organes de couplage, faiblesse du matériel de

jonction, des sectionneurs, disjoncteurs, condensateurs séries, circuits-bouchons, transformateurs de mesure ou de puissance, chute de tension en ligne, stabilité du transport, etc.

Il n'apparaît cependant pas rationnel que la puissance transmise par une ligne soit limitée par le dimensionnement du matériel des postes de coupure, matériel dont le coût est relativement faible par rapport à celui de la ligne. D'autre part, une production et un réglage adéquat de l'énergie réactive doivent permettre de réduire à une valeur acceptable les chutes de tension en ligne. Pour des transports inférieurs à quelques centaines de km, le problème de la stabilité statique ne se pose pas et les pertes comptent peu en régime exceptionnel. Il en résulte que, dans un grand nombre de cas, la température des conducteurs est bien le critère à prendre en considération pour apprécier la charge maximum possible d'une ligne aérienne.

V. Conclusion

Dans une exploitation rationnelle des réseaux, ce qui doit limiter la puissance transmise par les lignes d'interconnexion est en premier lieu le risque d'échauffement de leurs câbles.

L'image thermique constitue un moyen adéquat de prévenir ce risque, compte tenu des facteurs extérieurs à la ligne généralement favorables (vent, température) et de l'allure des variations de puissance qu'elles transportent.

Par suite de la capacité thermique relativement élevée de la ligne, des surcharges considérables ne conduisent pas à une température inadmissible si elles sont suffisamment courtes (inférieures à quelques minutes). Ce problème est étroitement lié à celui du réglage des puissances d'échange. Les paramètres de ce réglage (énergie réglante, vitesse de réponse des régulateurs) doivent être choisis en fonction de la capacité de surcharge des lignes d'interconnexion et des fluctuations de charge qu'elles peuvent supporter.

En cas de perturbation dans un réseau partiel, l'interconnexion permet aux autres réseaux de fournir de l'énergie de secours et il est indispensable dans ce cas que les lignes d'interconnexion puissent être utilisées au maximum de leur capacité de surcharge que l'image thermique permet particulièrement bien de mettre à profit. Cette image peut ainsi jouer un rôle notamment dans le cadre des interconnexions internationales.

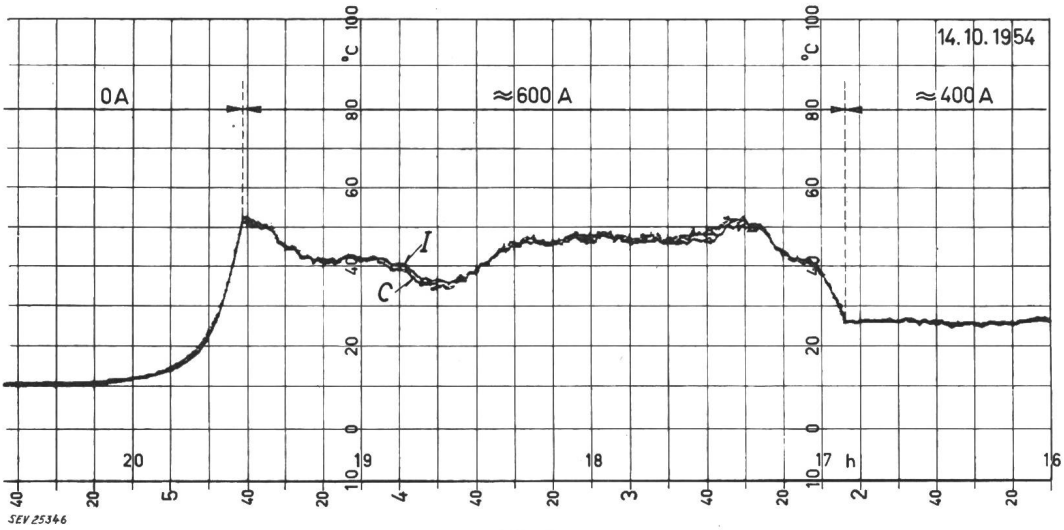


Fig. 9
Comparaison des températures superficielles d'un câble 210 mm² Aluminium-Acier et de son image
I Image; C Câble
Température ambiante 14...10 °C, vent faible, temps sec et ensoleillé
Rapport des courants câble/image: 500/5 A
La température interne maximum du câble est de 15 °C supérieure aux valeurs indiquées pour la charge de 600 A et de 7 °C supérieure pour 400 A

L'image thermique a subi avec succès l'épreuve de l'exploitation. En mai et en octobre 1956, elle a favorisé le transfert, en toute sécurité, sur une ligne à 150 kV en Belgique, de charges dépassant les valeurs admises jusqu'à ce moment et cela dans des conditions économiques avantageuses.

Le résultat de ces expériences incite à généraliser l'utilisation d'une image thermique chaque fois que la puissance transmise par une ligne est susceptible de se rapprocher des limites de capacité de charge de cette ligne.

Annexe I

Calcul théorique de l'échauffement des conducteurs d'une ligne aérienne

L'équation bien connue qui caractérise l'échauffement d'un corps est basée sur la condition suivante [16]:

chaleur engendrée = chaleur accumulée + chaleur dissipée

$$Q\,\mathrm{d}t = c\,m\,\mathrm{d}\Theta + \alpha\,A\,\Theta\,\mathrm{d}t$$

avec

Q chaleur engendrée par unité de temps (W)

m masse du conducteur (kg)
c chaleur spécifique (Ws/°C·kg)
A surface de refroidissement (cm²)
α coefficient de transmission de la chaleur (W/cm²·°C)
Θ surtempérature des conducteurs par rapport à la température ambiante (°C).

On prend en considération une variation selon un échelon rectangulaire de la chaleur engendrée et on se propose de déterminer la variation $\Delta\Theta$ de la surtempérature du conducteur par rapport à sa valeur initiale; en résolvant l'équation différentielle indiquée ci-dessus, on obtient, en prenant comme référence l'état initial:

$$\frac{\Delta\Theta}{\Theta_0} = \frac{\Delta Q}{Q_0}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_t}}\right)$$

avec $T_t = \frac{mc}{A\alpha}$ = constante de temps thermique de la ligne.

Par exemple dans le cas particulier d'un câble aluminium de 150 mm² nous obtenons par mètre de câble:

$$T_t = \frac{mc}{A\alpha} = \frac{0{,}417 \cdot 870}{500 \cdot 1{,}16 \cdot 10^{-3}} = 630 \text{ s} \approx 10 \text{ min}$$

La chaleur engendrée est proportionnelle au carré du courant transporté I; la variation relative de chaleur engendrée est donc en première approximation égale au double de la variation relative du courant:

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{(I_0 + \Delta I)^2 - I_0^2}{I_0^2} = \frac{\Delta I^2}{I_0^2} + \frac{2\,\Delta I}{I_0} \approx 2\,\frac{\Delta I}{I_0}$$

On obtient ainsi la réponse indicielle:

$$\Phi_{I\Theta}(t) = \frac{\Delta\Theta/\Theta_0}{\Delta I/I_0} = k_p\left(1 - e^{-\frac{t}{T_t}}\right)$$

avec $k_p \approx 2$ = coefficient permanent caractérisant les écarts de température en régime permanent.

Si la variation du courant a une allure quelconque, la variation correspondante de la température peut se calculer au moyen de l'intégrale de Duhamel

$$\frac{\Delta\Theta(t)}{\Theta_0} = \int_0^t \frac{\Delta I}{I_0}(\tau)\,\Phi'_{I\Theta}(t-\tau)\,d\tau$$

avec $\Phi'_{I\Theta}(t)$ dérivée de la réponse indicielle
τ variable d'intégration

La résolution numérique de cette intégrale s'effectue le plus commodément au moyen du calcul à l'aide de suites [13] en effectuant le produit composé de la suite caractérisant la variation du courant et celle caractérisant la dérivée de la réponse indicielle. C'est par cette méthode que les courbes représentées par les fig. 2 et 3 ont été calculées.

Annexe II

Détermination de l'écart type des variations de la température au moyen de l'analyse impulsionnelle

A partir d'un échantillon du diagramme des puissances d'échange, il est possible de calculer le carré moyen des fluctuations de la température du câble au moyen de l'intégrale suivante [13 et 14]:

$$s^2(\Delta\Theta) = 2\int_0^\infty A_I(\tau)\,A_G(\tau)\,d\tau$$

avec

$s^2(\Delta\Theta)$ carré moyen des écarts de température égal au carré de l'écart type (par définition)
$A_I(\tau)$ fonction d'autocorrélation des fluctuations de courant
$A_G(\tau)$ fonction d'autocorrélation de la réponse impulsionnelle de la température par rapport au courant

$$= \frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} \Delta I(t)\,\Delta I(t+\tau)\,dt \Bigg|_{T\to\infty}$$

$$= \int_0^\infty G_{I\Theta}(t)\,G_{I\Theta}(t+\tau)\,dt$$

avec

$$G_{I\Theta}(t) = \frac{d}{dt}\Phi_{I\Theta}(t)$$

réponse impulsionnelle de la température par rapport au courant

Cette intégrale se calcule avantageusement au moyen du calcul à l'aide de suites; dans le cas particulier où les fonctions d'autocorrélation ont une expression très simple, elle peut être résolue analytiquement.

En première approximation, la fonction d'autocorrélation des fluctuations de la charge est donnée par une courbe exponentielle [15]:

$$\frac{A_I(\tau)}{A_I(0)} = e^{-\tau/T_v}$$

avec

T_v temps caractéristique de la variabilité de la charge
$A_I(0) = s^2(\Delta I)$
carré moyen des fluctuations du courant.

D'autre part

$$G_{I\Theta} = \frac{d}{dt}\Phi_{I\Theta}(t) = k_p\,\frac{e^{-t/T_t}}{T_t}$$

donc

$$A_G(\tau) = \frac{k_p^2}{T_t^2}\int_0^\infty e^{-t/T_t}\,e^{-(t+\tau)/T_t}\,dt = k_p^2\,\frac{e^{-\tau/T_t}}{2\,T_t}$$

Après quelques faciles calculs, nous obtenons pour le rapport des écarts types des fluctuations de courant et de température l'expression suivante:

$$\frac{s\,(\Delta\Theta)}{s\,(\Delta I)} = \frac{k_p}{\sqrt{1+\frac{T_t}{T_v}}} = k_p \cdot k_a'$$

avec

$$k_a' = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{T_t}{T_v}}}$$

coefficient d'amortissement statistique.

La fig. 6 représente la valeur du coefficient k_a' en fonction du rapport des temps caractéristiques T_v/T_t. Nous voyons que si les fluctuations de la charge transportée par la ligne sont très rapides par rapport à la constante de temps thermique de la ligne ($T_v \ll T_t$), le coefficient d'amortissement tend vers zéro, c'est-à-dire que les variations de température sont très faibles par rapport à celles qui s'établiraient en régime permanent; si, au contraire, les fluctuations de charge sont très lentes, le coefficient k_a tend vers 1, c'est-à-dire que les variations de température rejoignent celles que l'on obtiendrait en négligeant l'influence de la capacité thermique de la ligne.

Bibliographie

[1] *Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE):* Compte rendu des réunions 1951 du groupe d'étude des protections.

[2] *Renchon, R.* dans «Texte sténographique des discussions». Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, t. 1, p. 583...585; 628...629.

[3] *Renchon, R.* et *G. Daumerie:* Image thermique de ligne aérienne. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1956, rapp. 303, 16 p.

[4] *Ailleret, P.:* Les limites de puissance des lignes électriques aériennes. Mém. et Docum. t. -(1944), n° 28, nov./déc.

[5] *Poma, M.:* Possibilités techniques et économiques offertes à l'exploitant par le contrôle permanent de l'état thermique des éléments des réseaux. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1946, t. 3, rapp. 311, 7 p.

[6] *Langlois-Berthelot, R.* et *M. Laborde:* Les capacités de surcharge, la coordination des comportements thermiques et les consignes qui y sont liées, pour l'exploitation rationnelle des grands réseaux. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1946, t. 3, rapp. 330, 19 p.

[7] *Ludwig, H.:* Die Belastbarkeit von Freileitungen mit Rücksicht auf höchstzulässige Leitertemperaturen. Bull. ASE t. 38(1947), n° 3, p. 49...58.

[8] *Butterworth, S.* et *E. E. Hutchings:* Caractéristiques électriques et régimes thermiques des lignes électriques aériennes. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1950, t. 2, rapp. 204, 24 p.

[9] *Recommandations relatives à l'intensité de courant admissible en permanence dans les conducteurs aériens.* Bull. ASE t. 42(1951), n° 15, p. 562...564.

[10] *Forrest, J. S.:* High Voltage Overhead-Line Transmission Problems. Electr. Power Engr. t. -(1950), fév./mars.

[11] *Ailleret, P.:* L'évolution de la technique des transports d'énergie électrique. Rev. gén. Electr. t. 63(1954), n° 7, p. 371...378.

[12] *Fleischmann, E.:* How Temperature Affects Load. Electr. Wld. t. 142(1954), n° 14, p. 75...78; 169.

[13] *Cuénod, M.:* Méthode de calcul à l'aide de suites. Lausanne: La Concorde 1955.

[14] *Cuénod, M.:* Etude de la réponse d'un système linéaire à une fonction aléatoire au moyen de l'analyse impulsionnelle. Rev. gén. Electr. t. 65(1956), n° 2, p. 118...124.

[15] *Lehmann, G.:* Calcul du spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. Bull. Soc. franç. Electr. 7e série, t. 3(1953), n° 34, p. 593...595.

[16] *Stösser, J.* et *E. Bernhardt:* L'image thermique des machines électriques, base d'un relais de protection contre les surcharges. Bull. ASE t. 29(1938), n° 12, p. 290...294.

[17] *Lang, V.:* L'échauffement des conducteurs câblés des lignes aériennes. Bull. ASE t. 47(1956), n° 14, p. 631...632; 641.

[18] *Lesch, G.:* La capacité de transport de lignes à très haute tension. Bull. ASE t. 47(1956), n° 20, p. 913...918.

[19] *Renchon, R.:* Aspects pratiques de l'utilisation d'une image thermique de lignes aériennes. Exposé à la Société Belge des Electriciens le 21 novembre 1956.

Adresses des auteurs:

M. Cuénod, ingénieur dipl. EPF, Dr. ès sc. techn., c/o Société Générale pour l'Industrie, 17, rue Bovy-Lysberg, Genève;

R. Renchon, ingénieur él. ESE Paris, c/o Union Générale Belge d'Electricité, 78, rue de Livourne, Bruxelles.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Die Schweizerischen Bundesbahnen erhalten die grössten Einphasen-Generatoren der Welt

621.313.322-82 : 625.1(494)

Die Kraftwerk Göschenen A.-G. erstellt gegenwärtig für die Bedürfnisse der Schweizerischen Bundesbahnen und der Centralschweizerischen Kraftwerke eine unterirdische Zentrale, deren Leistung im Vollausbau 206,6 MVA betragen wird. In den Antriebsturbinen wird das Gefälle zwischen dem Stausee auf der Göscheneralp und Göschenen, das zwischen 546 und 650 m netto variiert, ausgenützt.

Zur Aufstellung gelangen insgesamt vier vertikalachsige Generatoren, und zwar zwei Einphasen-Generatoren von je 50 MVA, 500 U./min, 16²/₃ Hz, cos φ = 0,8 für den Bahnbetrieb, sowie zwei Dreiphasen-Generatoren zu je 53,3 MVA, 50 Hz, für den übrigen Energiebedarf.

Alle vier Generatoren werden geschlossen mit Umlaufkühlung und in versenkter Anordnung ausgeführt, wobei Tragstern, kombiniertes Trag- und Führungslager, Haupt- und Hilfserreger, sowie der Pendelgenerator über dem Maschinensaalboden liegen. Die Statoren der Einphasen-Generatoren werden vorläufig starr auf dem Turbinengehäuse aufgebaut; es sind aber Vorkehrungen getroffen, um später, falls es wünschenswert werden sollte, ohne weiteres auf elastische Verbindung übergehen zu können. Die genannten Statoren sind zweiteilig und werden mit Rücksicht auf das Bahnprofil erst auf dem Platz bewickelt. Die Statorwicklung wird als Einschicht-Gitterwicklung mit einem Leiter pro Nute ausgeführt; als Nutenisolation kommt eine neuartige Kombination von Kunstharz und Micanit-Orlitsa mit hervorragenden elektrischen und mechanischen Eigenschaften zur Verwendung.

Das aus mehreren Stahlgußscheiben zusammengesetzte Polrad in Kammkonstruktion erhält eingesetzte Stahlgusspolschuhe. Die Wellen werden beidseitig am Rotorkörper angeflanscht. Der Durchmesser des 4poligen Rotors beträgt ca. 3 m und das Rotorgewicht samt Polen ca. 160 t.

Diese beiden Einphasen-Generatoren, die von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaut werden, sind hinsichtlich Leistung die grössten Bahngeneratoren der Welt. *Sh.*

Erfahrungen mit Reaktor-Regelmechanismen

621.039.42 : 621-53

[Nach *G. E. Lockett:* Some Design Aspects of Nuclear Reactor Control Mechanisms. Proc. Inst. Electr. Engrs. Bd. 103(1956), Part B, Nr. 11, S. 597...607]

Auf Grund der Erfahrungen mit Experimental-Reaktoren in Harwell (graphit- und schwerwassermoderierte Typen, sowie schnelle Reaktoren) wurden einige Gesichtspunkte be-