Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 29 (1938)

Heft: 12

Artikel: L'image thermique de machines électriques : base d'un relais de protection contre les surcharges

Autor: Stösser, J. / Bernhardt, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058980

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

4° La seule protection efficace, théoriquement du moins, semble résider en un système différentiel (usine de l'Etzel). Cependant les expériences pratiques à son sujet font encore défaut. Sa réalisation pratique exige encore un appareillage compliqué et de nombreux circuits électriques, de sorte qu'il paraît difficile d'éliminer complètement les fermetures accidentelles par suite de perturbations dans l'appareillage, ce qui est aussi un danger dont il faut tenir compte.

5° La commande à distance des organes de fermeture a fait ses preuves; on devrait l'appliquer partout car elle permet de fermer rapidement les conduites, même si les automates ne fonctionnent pas ou s'il n'y en a point. Cela exige que la ligne de commande se trouve sur tout son parcours hors de la zone d'influence de la conduite forcée, et qu'on contrôle régulièrement le fonctionnement de l'installation, afin d'être sûr que, le cas échéant, elle puisse assumer sans défaillance la tâche qui lui revient.

L'image thermique de machines électriques, base d'un relais de protection contre les surcharges.

Par *J. Stösser* et *E. Bernhardt*, Baden.

621.316.925.44

La protection contre les surcharges d'installations électriques est essentiellement un problème thermique. La solution idéale est l'image thermique. Les auteurs examinent les conditions auxquelles doit satisfaire une image thermique et décrivent un nouveau relais de protection contre les surcharges qui y satisfait.

Der Ueberlastungsschutz elektrischer Anlageteile ist vorwiegend ein Wärmeproblem. Die zweckmässigste Lösung ist das thermische Abbild. Es werden die Anforderungen behandelt, denen eine thermische Abbildung genügen muss, und anschliessend ein neues Ueberlast-Schutzrelais beschrieben, das diese Forderungen praktisch verwirklicht.

(Traduction.)

L'utilisation économique de machines et de conduites électriques entraîne l'obligation d'admettre certaines surcharges temporaires. Cependant, si l'intensité et la durée d'une surcharge sont exagérées, la machine dépasse la température admissible et est endommagée. Le but de la protection contre les surcharges est d'empêcher de pareilles surélévations dangereuses de température en coupant à temps le courant, sans cependant empêcher les surcharges admissibles. La protection contre les surcharges est donc essentiellement un problème thermique, que nous allons examiner ci-après.

La courbe de température d'un conducteur électrique en fonction du temps comporte des régimes variables et des régimes stables. Le début de chaque régime variable coïncide avec une variation du courant et se termine lorsque la température stable correspondant à ce courant est atteinte. Un appareil qui reproduit à tout instant, à une certaine échelle, la température d'un conducteur est ce qu'on appelle une image thermique. La plupart des appareils de protection contre les surcharges cherchent plus ou moins à se rapprocher de l'image thermique, bien que le plus souvent la ressemblance ne soit qu'esquissée.

Examinons quelles sont les conditions auxquelles doit satisfaire une image thermique.

Nous utiliserons les désignations suivantes:

ΣP Somme des pertes en watts.
t Temps en secondes.
A Surface de refroidissement totale en cm².
α Coefficient de transmission de chaleur en W/cm²·°C·s.
ϑ Température relative (au-dessus de l'ambiance), en °C.
ϑ_{max} Température relative en régime permanent, en °C.
G Poids du corps en kg.
c Chaleur spécifique en W/°C·kg.
T Constante de temps thermique en s.

La première condition à remplir par une image thermique est que, pour différentes intensités, les températures de régime permanent de l'objet à protéger et de l'image soient égales ou tout au moins proportionnelles.

L'état d'équilibre est atteint lorsque la chaleur engendrée dans l'objet est égale à la chaleur dissipée par celui-ci, ce qu'on exprime par l'équation:

$$\Sigma P \cdot t = A \cdot \alpha \cdot \vartheta_{max} \cdot t \qquad (1)$$

d'où, pour la température de régime permanent de l'objet et de l'image, l'équation:

$$\vartheta_{max} = \frac{\Sigma P}{A \cdot \alpha} \qquad (2)$$

Alors que le régime permanent n'est caractérisé que par deux grandeurs, les pertes et le refroidissement, une troisième grandeur, la capacité calorifique, intervient dans les états transitoires. La quantité de chaleur produite pendant un temps donné est en partie accumulée dans l'objet et en partie transmise à l'extérieur. Pour un corps homogène, on peut poser:

$$\underbrace{\Sigma P \cdot \mathrm{d}t}_{\text{chaleur engendrée}} = \underbrace{G \cdot c \cdot \mathrm{d}\vartheta}_{\text{chaleur accumulée}} + \underbrace{A \cdot \alpha \cdot \vartheta \cdot \mathrm{d}t}_{\text{chaleur transmise}}$$

ou bien

$$\mathrm{d}\vartheta = \frac{\Sigma P - A \cdot \alpha \cdot \vartheta}{G \cdot c} \cdot \mathrm{d}t$$

$$\mathrm{d}\vartheta = \frac{\vartheta_{max} - \vartheta}{\dfrac{G \cdot c}{A \cdot \alpha}} \cdot \mathrm{d}t\,.$$

La quantité

$$T = \frac{G \cdot c}{A \cdot \alpha} \qquad (3)$$

est la constante de temps thermique.

L'équation 3 devient:

$$\mathrm{d}\vartheta = \frac{\vartheta_{max} - \vartheta}{T} \cdot \mathrm{d}t\,. \qquad (4)$$

En intégrant et en introduisant la condition limite: $t = 0$, $\vartheta = 0$, il vient:

$$\vartheta = \vartheta_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \qquad (5)$$

D'après l'équation (5), la température d'un corps homogène, chauffé avec une puissance constante et dont les conditions de refroidissement sont constantes, croît selon une fonction exponentielle (voir fig. 1). En faisant dans l'équation (5) $t = T$, on

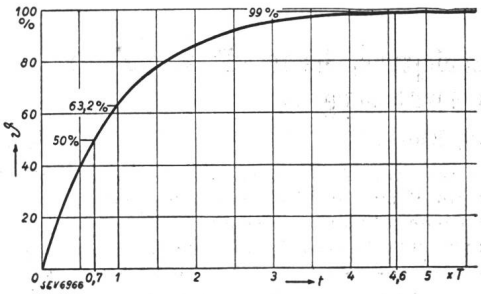

Fig. 1.
Fonction exponentielle.
Ordonnées: Température ϑ en % de la température de régime permanent.
Abscisses: Temps en multiples de la constante de temps T.

voit que la constante de temps est égale au temps nécessaire pour atteindre 63,2 % de la température de régime permanent.

Des mesures d'échauffement de machines et de câbles électriques montrent toutefois que leurs courbes d'échauffement à puissance constante s'écartent notablement de la fonction exponentielle. L'inclinaison des courbes mesurées *1* (fig. 2) est, d'une façon générale, sensiblement plus forte que celle de la fonction exponentielle. Ceci provient du fait que les machines, câbles, ou d'une façon générale

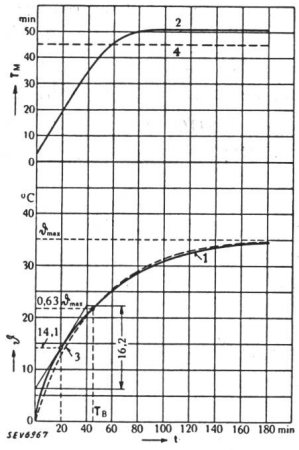

Fig. 2.

Courbe *1:* Température d'un câble mesurée à l'aide d'un thermo-élément dans le cuivre.

Courbe *2:* Variation de la constante de temps instantanée $T_M = f\ (t)$, en fonction du temps pour la courbe *1*.

Courbe *3:* Fonction exponentielle avec $T = T_B = 45$ minutes.

Courbe *4:* Constante de temps $T = f\ (t)$, en fonction du temps pour la courbe *3*.

les appareils électriques, ne sont pas, au point de vue thermique, des corps homogènes. Ils se composent au contraire de différents matériaux (cuivre, isolant, fer, etc.), dont les propriétés thermiques sont différentes. La production et la transmission de chaleur dans ces divers matériaux varient d'un objet à l'autre. La courbe d'échauffement des corps complexes que sont les machines et appareils électriques ne peut donc généralement pas être une exponentielle. C'est bien plutôt la résultante de plusieurs courbes d'échauffement partielles correspondant à différentes températures de régime permanent, différentes constantes de temps et à des origines différentes dans le temps.

Considérons une courbe d'échauffement mesurée sur un objet donné (courbe *1*, fig. 2). Marquons le point dont la température est de 63,2 % de la température de régime permanent. Nous définirons l'abscisse de ce point comme étant la «*constante de temps du régime permanent*» T_B. Elle sert à caractériser l'allure générale d'une courbe d'échauffement en l'assimilant à une exponentielle.

Pour caractériser autour d'un point donné l'allure de la courbe d'échauffement mesurée, nous introduirons la notion de la constante de temps instantanée T_M.

Nous définirons celle-ci comme suit:

La «*constante de temps instantanée*» T_M est la constante de temps de la fonction exponentielle qui, à l'instant considéré, coïncide avec la courbe mesurée, c'est-à-dire qui, au point considéré, a la même tangente que la courbe mesurée et passe par la même origine que celle-ci. A chaque point de la courbe mesurée correspond par conséquent une constante de temps instantanée particulière.

Nous considérerons pour chaque point de la courbe mesurée la fonction exponentielle définie par l'origine, le point en question et la tangente en ce point.

De l'équation (5), on déduit:

$$\vartheta_{max} = \frac{\vartheta}{1 - e^{-\frac{t}{T_M}}} \qquad (6)$$

puis

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\vartheta_{max}}{T_M} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$$

d'où

$$\vartheta_{max} = \frac{d\vartheta/dt \cdot T_M}{e^{-\frac{t}{T_M}}} \qquad (7)$$

Pour déterminer la constante de temps instantanée, on identifie (6) et (7) et l'on écrit T_M:

$$\frac{\vartheta}{d\vartheta/dt} = T_M \cdot (e^{\frac{t}{T_M}} - 1) \qquad (8)$$

L'équation (8) permet de déterminer pour chaque point d'une courbe d'échauffement mesurée la constante de temps instantanée T_M. La fig. 3 représente graphiquement l'équation (8). En ordonnées est reportée la valeur $\frac{\vartheta}{d\vartheta/dt}$, en abscisses la valeur T_M; le temps t est le paramètre.

La valeur limite ϑ_{max} de l'exponentielle relative à une constante de temps instantanée particulière se calcule en partant de (7); il vient:

$$\frac{\vartheta_{max}}{d\vartheta/dt} = T_M \cdot e^{\frac{t}{T_M}} \qquad (9)$$

Sur la fig. 3, l'équation (9) est représentée par les

courbes pointillées. En ordonnées est portée la valeur $\frac{\vartheta_{max}}{d\vartheta/dt}$, en abcisses T_M; t sert de paramètre.

L'équation (9) présente un minimum pour $\frac{\vartheta_{max}}{d\vartheta/dt} = T_M \cdot e$. Le lieu de ces minima pour différentes valeurs de t est représenté dans la fig. 3 par une droite; c'est donc une fonction exponentielle exacte.

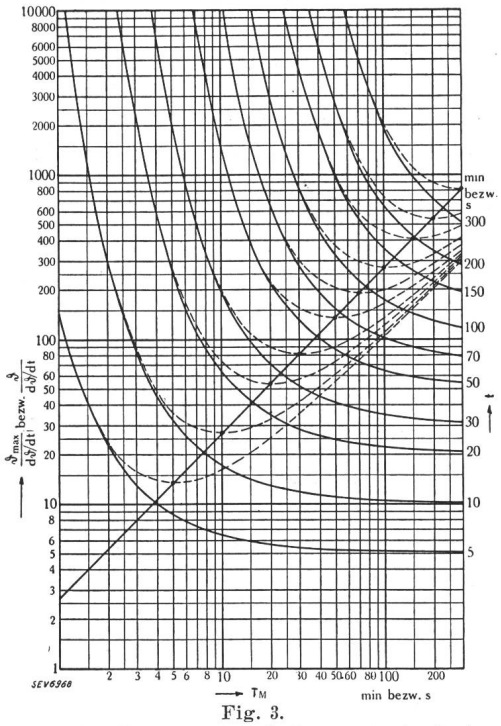

Fig. 3.
Tableau pour la détermination de la constante de temps instantanée en un point quelconque d'une courbe d'échauffement donnée.

—— Ordonnées: $\frac{\vartheta}{d\vartheta/dt}$ Abscisses T_M Paramètre: t

····· Ordonnées: $\frac{\vartheta_{max}}{d\vartheta/dt}$ Abscisses T_M Paramètre: t

Utilisons ce qui précède pour déterminer en fonction du temps l'allure de la constante de temps instantanée de la courbe d'échauffement mesurée de la fig. 2. Pour le point (t = 20 min), (ϑ = 14,1° C), on a l'équation:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{16{,}2^0\ C}{40\ min} = 0{,}405^0\ C/min$$

et

$$\frac{\vartheta}{d\vartheta/dt} = \frac{14{,}1^0\ C/min}{0{,}405^0\ C} = 35\ min.$$

D'après la courbe en trait plein de la fig. 3 pour t = 20 min et $\frac{\vartheta}{d\vartheta/dt}$ = 35 min, la constante de temps instantanée est:

$$T_M = 19{,}5\ min.$$

La constante de temps correspondante du régime permanent est déduite de la courbe en pointillé correspondant au paramètre 20 min pour T_M = 19,5 min.

On a: $\frac{\vartheta_{max}}{d\vartheta/dt}$ = 54 min; d'où

$$\vartheta_{max} = 54 \cdot 0{,}405 = 22^\circ\ C.$$

La courbe 2 de la fig. 2 représente les différentes valeurs de T_M correspondant à la courbe d'échauffement mesurée et déterminée par la méthode ci-dessus. Dans l'exemple choisi, la constante de temps instantanée commence au temps zéro avec la valeur T_M = 3 min et atteint finalement la valeur de 51 min. La constante de temps du régime permanent T_B est ici de 45 min.

Ce résultat, qui est valable d'une façon approximative pour toutes les courbes d'échauffement de machines et de câbles électriques, montre tout d'abord que l'allure de l'échauffement d'un conducteur ne peut pas être caractérisée à l'aide d'une seule constante de temps. En pratique, l'échauffement d'un enroulement de moteur par exemple, lors d'une surcharge, est au début beaucoup plus rapide que ne l'indique la fonction exponentielle correspondant à la constante de temps T_B. Il est essentiel de tenir compte de ce qui précède pour obtenir une image thermique correcte. Une protection

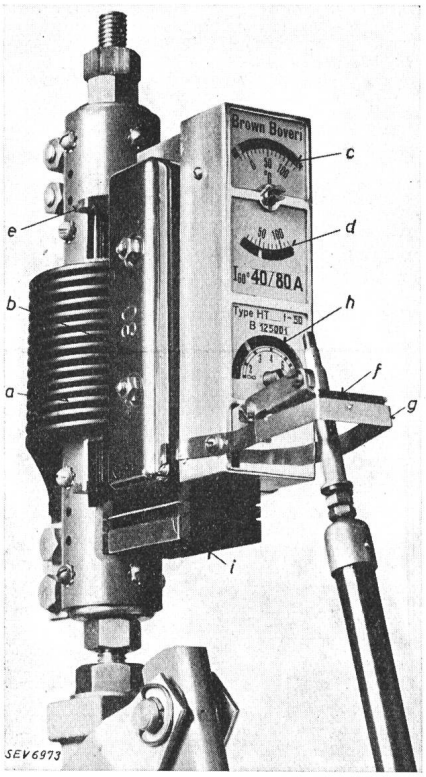

Fig. 4.
Relais thermique direct, type HT.
a Bobine. *b* Masselotte. *c* Echelle de la température effective. *d* Echelle de réglage de la température de déclenchement. *e* Clavettes. *f* Levier de déclenchement. *g* Volet. *h* Echelle de réglage du déclenchement instantané pour fortes surintensités. *i* Compensation de la température ambiante.

contre les surcharges, basée sur le principe de l'image thermique, doit tenir compte de la variation de la constante de temps instantanée de l'objet à protéger.

Les considérations précédentes, concernant l'établissement d'une image thermique exacte, ont été appliquées pour la première fois à la construction du relais thermique direct représenté à la fig. 4. Ce relais sert à la protection de machines électriques et de câbles contre les échauffements dange-

reux. Lors de surcharges, il est destiné à être monté directement sur les interrupteurs, comme les relais directs bien connus à maximum d'intensité. Il diffère de ces derniers en ce qu'il ne comporte pas de réglage de l'intensité de déblocage. En effet, pour pouvoir tenir compte de l'échauffement antérieur à la surcharge, il est influencé en permanence par le courant de service. Il ne comporte pas non plus d'ajustage du temps de déclenchement, car celui-ci est déterminé complètement par la cons-

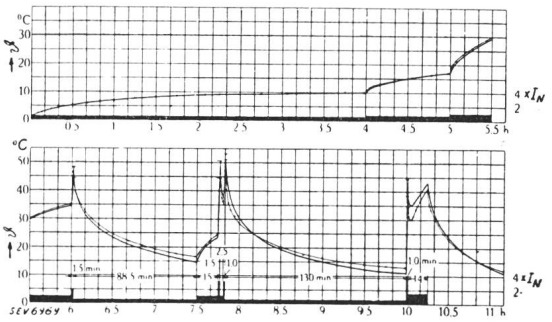

Fig. 5.
Protection d'un câble (8 kV, 3 × 16 mm²). Comparaison des températures du relais et de l'objet à protéger.
—— Température de l'âme du câble mesurée par thermo-éléments.
--x--x-- Température indiquée sur l'échelle du relais.

tante de temps thermique choisie, la température de déclenchement ajustée, le régime de charge avant le début de la surcharge et par l'intensité de celle-ci. L'enroulement *a* est parcouru par le courant traversant l'objet à protéger et engendre la chaleur dans la partie active du relais placé sur le même circuit magnétique. La température de celle-ci est mesurée par un élément thermométrique et indiquée sur l'échelle *c*. La constante de temps du

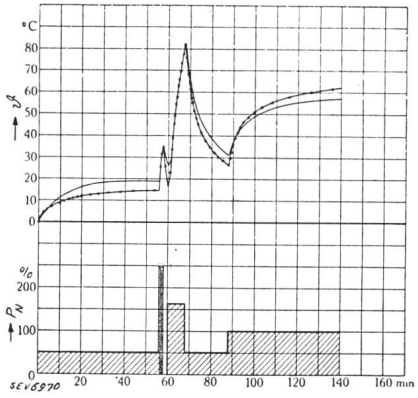

Fig. 6.
Moteur tournant en permanence.
—— Température du moteur mesurée par couple thermo-électrique dans l'enroulement au milieu de l'empilage. Moteur 140 kW, 500 V, 1500 t/min, 50 pér./s.
-x-x-x- Température indiquée par le relais thermique HT, 200 A, $T_B = 15$ minutes. P_N = Charge nominale.

régime permanent T_B peut être ajustée en plaçant sur le relais les différentes masselottes *b*, aux valeurs de 15, 30 et 45 min; elle peut ainsi être adaptée à celle de l'objet à protéger. Il est particulièrement intéressant de noter qu'on a tenu compte de la variation de la constante de temps instantanée T_M, de telle sorte que l'échauffement du relais lors de très fortes surcharges est toujours plus rapide que celui de l'objet, d'où une grande sécurité. L'image thermique d'un câble à 8 kV réalisée à l'aide du relais, type HT, a été démontrée à l'assemblée de discussion de l'ASE consacrée aux câbles électriques, à Bienne le 27 novembre 1937. L'application du relais thermique à la protection contre les surcharges de machines électriques est également intéressante, ainsi qu'il ressort des résultats d'essai dans l'exemple ci-après:

L'essai a été effectué à l'aide d'un moteur triphasé 140 kW, 500 V, 1500 t/min, 50 pér./s, dont l'une des bobines statoriques a été munie de couples thermo-électriques pour mesurer la température du cuivre. Un relais thermique HT, avec constante de temps de 15 min, a été monté sur l'un des conducteurs d'alimentation du moteur, lequel a été soumis à différents états de charge. La température

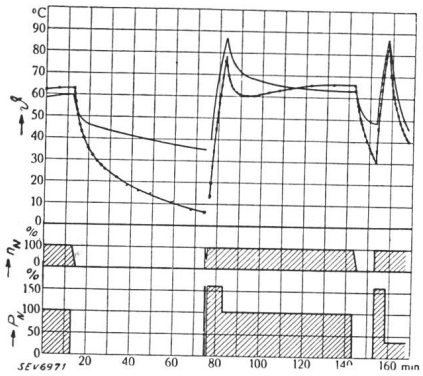

Fig. 7.
Moteur tournant par intermittences.
—— Température du moteur mesurée par couple thermo-électrique dans l'enroulement au milieu de l'empilage. Moteur 140 kW, 500 V, 1500 t/min, 50 pér./s.
-x-x-x- Température indiquée par le relais thermique HT, 200 A, $T_B = 15$ minutes. P_N Charge nominale. n_N nombre de tours par minute nominal.

du moteur et celle du relais ont été relevées simultanément. La fig. 6 donne ces valeurs dans le cas du moteur tournant en permanence.

Le moteur a tout d'abord été soumis à la moitié de sa charge nominale. Au bout de 55 min, le moteur et le relais prennent une température de régime correspondant à cet état de charge. La température du moteur est d'environ 5° C plus élevée que celle du relais, car aux faibles charges, les pertes dans le fer prennent plus d'importance par rapport aux pertes totales. Au bout de 60 min, la charge est augmenté à 160 % de la charge normale et maintenue à cette valeur pendant 8 min. Pendant cette surcharge, la température du moteur et celle du relais coïncident exactement et atteignent la valeur maximum de 81° C. Après la surcharge le moteur et le relais se refroidissent. 88 min après le début de l'essai, le moteur est chargé à sa valeur normale et un nouvel état d'équilibre tend à s'établir. La température du relais dépasse celle du moteur d'environ 5° C, ce qui assure ainsi la sécurité de fonctionnement aux faibles surcharges.

L'échauffement du moteur en marche intermittente est indiqué sur la fig. 7. Au début de l'essai, la température du moteur et celle du relais sont celles atteintes à la suite d'une charge permanente

normale: 63° C pour le relais, 60° C dans le moteur. Au bout de 13 min le moteur est déclenché et celui-ci s'arrête environ 2 min après. Le moteur reste au repos pendant une heure environ et se refroidit, toutefois beaucoup plus lentement que le relais, car, la machine étant arrêtée, la ventilation fait défaut. La température indiquée par le relais pendant cette période est plus faible que celle du moteur et l'on est en droit de se demander si, lors d'une nouvelle surcharge dans cet état défavorable, une surélévation de température inadmissible dans le moteur peut être empêchée par le relais. Pour contrôler ce point, le moteur a été chargé à 160 % de sa charge normale, au moment le plus défavorable, c'est-à-dire lorsque la différence de température entre le moteur et le relais était maximum. La fig. 7 montre que la grosse différence de température entre le moteur et le relais est très rapidement corrigée. A la suite de cette surcharge, la charge a été ramenée à sa valeur normale pendant un certain temps. La même essai que ci-dessus a été répété ensuite, la durée de l'interruption de la charge ayant été toutefois sensiblement plus courte que précédemment. Lors de cet essai, moins défavorable que le précédent, la température du moteur et celle du relais coïncident pratiquement.

La protection du moteur contre les surcharges est ainsi assurée grâce à la variation de la constante de temps instantanée, même en service intermittent.

Un autre domaine d'application important du relais HT est la protection des transformateurs. Il est vrai que la constante de temps des transformateurs est en général sensiblement plus grande que la constante de temps du relais HT, ce qui réduit l'exactitude de l'indication de la température lors de charges très variables. Toutefois, la différence des constantes de temps se traduit toujours par une augmentation de la sécurité contre les échauffements dangereux. Les résultats de mesure suivants donnent une idée de la marge de surcharge que permet le relais: un transformateur de 200 kVA, 10 000/240 V, chargé pendant 10 h à 80 % de sa puissance nominale, peut être chargé à 120 % de cette puissance pendant 48 minutes (64 minutes), à 160 % pendant 12 minutes (14 minutes) et à 200 % pendant 5 minutes (7,5 minutes). Les valeurs entre parenthèses donnent les temps au bout desquels la température du cuivre du transformateur atteindrait 70° C. Si le transformateur a été chargé au préalable à moins de 80 %, les temps de déclenchement du relais sont augmentés. Pour une charge préalable de 50 %, ils sont environ le double des valeurs ci-dessus.

La température indiquée par le relais sur l'échelle *c* est la température relative de l'objet par rapport à l'air ambiant. En effet, l'influence de la température ambiante sur le relais est compensée par le dispositif *i*. La température de déclenchement du relais peut être ajustée sur l'échelle *d*. Dès que l'index *c* atteint la température ajustée sur l'échelle *d*, le déclenchement se produit. La fig. 8 donne, à titre d'exemple, les temps de déclenchement du relais muni de masselottes pour la constante de temps T_B = 15 min, pour différents ajustages de la température de déclenchement en fonction de la surcharge, à partir de l'état froid. Le temps de déclenchement diminue d'autant plus que la température de l'objet, avant le début de la surcharge, était plus élevée. Les temps de déclenchement du relais, type HT, ne sont augmentés par l'influence de la saturation du circuit magnétique que pour les surcharges dépassant environ 5 fois le

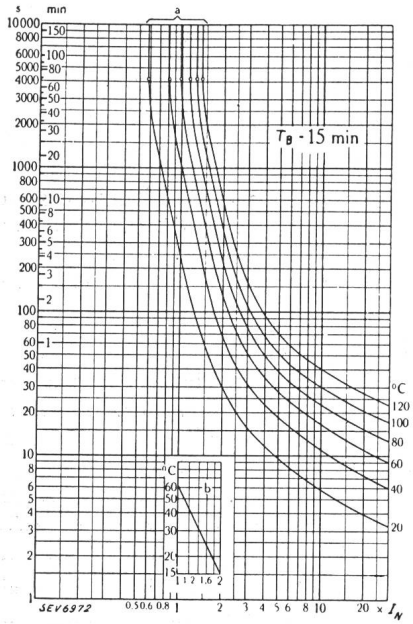

Fig. 8.
Relais thermique direct, type HT.
a Temps de déclenchement à partir de l'état froid en fonction de la surintensité pour différents ajustages de la température de déclenchement. T_B =15 min.
b Température de régime indiquée par le relais lorsque celui-ci est alimenté par le courant nominal I_N en fonction de la position des clavettes.

courant nominal. Toutes les surcharges qu'il est intéressant d'admettre en service restent ainsi dans le domaine non saturé, où l'image thermique est fidèle. Des intensités plus élevées ne se produisent que lors de courts-circuits; un déclenchement rapide est alors nécessaire. A cet effet, le relais HT est muni d'un dispositif de déclenchement électromagnétique instantané *h* pour fortes surintensités. Celui-ci est réglable pour 2 à 10 fois le courant nominal. Il peut également être bloqué; le déclenchement a lieu alors uniquement en fonction de la température.

Les considérations précédentes donnent une idée des bases physiques et des propriétés du relais thermique. Les exemples cités montrent l'exactitude avec laquelle la température de l'objet est reproduite et indiquée. Les dispositifs de protection thermique n'étaient applicables jusqu'ici, en raison de leur prix, qu'aux machines importantes [1]). Le but du relais thermique n'est pas de remplacer ces dispositifs de mesure de précision. Par contre, avec ce nouveau modèle d'application facile et de construction très simple, la protection contre les surcharges peut être réalisée d'une façon tout à fait générale, de la même manière que la protection contre les courts-circuits.

[1]) cf. Bull. ASE 1932, No. 3, p. 74.