Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 72 (1981)

Heft: 21

Artikel: Enclenchement à basse température des transformateurs

Autor: Boss, P. / Hermin, J.-L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905162

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: 09.12.2025

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

Enclenchement à basse température des transformateurs

Par P. Boss et J.-L. Hermin

621.314.21;

Des essais d'enclenchement en charge à −40 °C montrent que les huiles minérales paraffiniques permettent d'assurer un fonctionnement satisfaisant des transformateurs de distribution à cette température extrême. Les résultats obtenus avec une huile paraffinique modifiée sont semblables à ceux obtenus avec une huile naphténique. Ces fluides diélectriques permettront donc aux fabricants et aux utilisateurs de surmonter les difficultés d'approvisionnement dans le secteur des huiles minérales naphténiques.

Einschaltversuche unter Last bei −40 °C zeigen, dass Mineralöle auf Paraffinbasis ein befriedigendes Funktionieren der Verteiltransformatoren bei dieser extrem tiefen Temperatur erlauben. Die mit einem modifizierten Paraffinöl erzielten Resultate sind jenen mit Naphtenöl ähnlich. Diese dielektrischen Flüssigkeiten ermöglichen es also den Herstellern und Anwendern, die Versorgungsschwierigkeiten im Bereich der naphthenischen Mineralöle zu überwinden.

1. Introduction

L'objectif principal de la présente publication est l'étude du comportement à basse température de divers fluides isolants utilisés dans la construction des transformateurs. La viscosité du fluide prend une importance primordiale lorsqu'un transformateur fonctionne à très basse température (−30 °C à −40 °C), en particulier lors de l'enclenchement en charge.

La norme ASE 3163.1972 [1] autorise les constructeurs de transformateurs à utiliser principalement les fluides isolants des classes I et II, qui diffèrent surtout par leur point d'écoulement et leur viscosité (tableau I). La classe II comprend principalement des huiles minérales de type naphténique. Ces bruts se faisant de plus en plus rares, les constructeurs vont devoir également utiliser des huiles minérales de type paraffinique. Ces dernières font partie de la classe I, avec un point d'écoulement de −30 °C.

Il est à remarquer que certains producteurs d'huiles paraffiniques peuvent traiter celles-ci afin d'en abaisser le point d'écoulement de façon que les conditions requises par la classe II soient remplies. En pratique, l'utilisation d'huiles traditionnelles a donné de bons résultats. L'étude théorique du comportement de nouveaux fluides isolants à basse température est très difficile en raison de leur état visqueux mal défini. Nous avons choisi de porter un jugement sur l'utilisation de telles huiles à basse température, sur la base d'essais en vraie grandeur sur un transformateur de distribution de 400 kVA placé en chambre froide et rempli successivement avec:

- une huile minérale de type naphténique (classe II)
- une huile minérale de type paraffinique non modifiée (classe I)
- une huile minérale de type paraffinique modifiée (classe II)
- une huile silicone grade 50

Cette dernière huile peut remplacer l'Askarel, dont l'utilisation tend à disparaître pour des raisons écologiques.

Fluides isolants pour transformateurs selon norme ASE 3163.1972 Tableau I

		Classe I	Classe II	Classe III
Viscosité ($mm^2\ s^{-1}$)	+20 °C	≦ 40	≦ 25	≦ 6
	−15 °C	≦ 800	–	–
	−30 °C	–	≦ 1800	–
	−50 °C	–	–	≦ 500
Point d'éclair (°C)		≧ 140	≧ 130	≧ 90
Point d'écoulement (°C)		≦ −30	≦ −45	≦ −60

A très basse température, la forte augmentation de viscosité a pour conséquence un ralentissement, voire un arrêt, de la circulation du fluide réfrigérant dans les canaux de refroidissement. En pratique, la diminution du transfert de chaleur par convection n'a pas occasionné de surchauffe locale dangereuse pour l'isolation.

Dans cette première approche, nous n'avons pas l'intention de démontrer la possibilité d'utiliser de tels fluides pour les transformateurs de puissance puisque la longueur et la géométrie de leurs canaux de refroidissement diffèrent fortement de celles des transformateurs de distribution.

Le cas des transformateurs à circulation forcée est particulièrement critique.

2. Evolution des diélectriques liquides utilisés dans les transformateurs

Les huiles minérales naphténiques ont satisfait les besoins des constructeurs de transformateurs jusqu'à ce jour. En raison de l'épuisement des bruts d'hydrocarbure de type naphténique, les producteurs et les utilisateurs de fluides isolants ont été contraints à rechercher des produits de remplacement. Depuis plus de 40 ans, ces bruts provenant d'Amérique du Sud servent à la production des huiles minérales isolantes les plus courantes. Ces dernières sont caractérisées principalement par un bas point d'écoulement permettant de les utiliser comme diélectrique de la classe II selon ASE 3163.1972.

Depuis quelques années, des développements importants sont en cours chez les producteurs et les utilisateurs afin de vérifier le comportement de divers bruts paraffiniques présentant un point d'écoulement de −30 °C. L'intérêt des fabricants de transformateurs d'utiliser de tels fluides a été renforcé par l'arrivée sur le marché de bruts paraffiniques contenant des additifs permettant d'abaisser le point d'écoulement jusqu'à −45 °C. Ces améliorations permettent de faire passer ces diélectriques de la classe I à la classe II selon la norme citée précédemment.

La présente étude englobe également les huiles silicones, dont le comportement à basse température est particulièrement favorable.

3. Transfert de chaleur, caractéristiques fondamentales

Le dimensionnement d'un transformateur est lié étroitement aux échauffements limites imposés par les normes. La plupart de ces appareils sont remplis avec un diélectrique liquide qui, entre autres fonctions, assure le transfert de la

Valeurs caractéristiques comparées des divers fluides isolants utilisés pour les essais d'enclenchement à basse température Tableau II

Type d'huile	Unité	A Naphténique	C Paraffinique non modifiée	B Paraffinique modifiée	D Silicone grade 50
Point d'écoulement	°C	−50	−30	−49	−66
Densité (20 °C)	–	0,854	0,836	0,842	0,960
Viscosité +20 °C	$mm^2\ s^{-1}$	18	33	14,5	55
0 °C		55	90	40	90
−25 °C		460	620	280	170
−40 °C		2060	75 000	2500	270
Chaleur spécifique (25 °C)	$kJ \cdot kg^{-1} K^{-1}$	2,09	1,88	1,88	1,45
Conductibilité thermique (20 °C)	$Wm^{-1} K^{-1}$	0,13	0,13	0,13	0,15
Coefficient de dilatation	K^{-1}	$0{,}75 \cdot 10^{-3}$	$0{,}75 \cdot 10^{-3}$	$0{,}75 \cdot 10^{-3}$	$1{,}04 \cdot 10^{-3}$

chaleur entre la partie active et l'air ambiant. En général, à part des échanges par conduction peu importants, le constructeur doit assurer un refroidissement supplémentaire par convection. Deux modes de ce type de transfert sont usuels: la convection naturelle, résultant du mouvement du fluide sous l'effet des différences de densité entre les parties chaudes et les parties froides et la convection forcée, où la circulation est assurée par une pompe.

Des relations empiriques permettant de calculer les échanges thermiques en régime stationnaire sont à disposition des constructeurs, principalement pour les fluides naphténiques. Ces relations font intervenir les caractéristiques physiques du fluide d'une part (viscosité, chaleur spécifique, densité, conductibilité thermique, coefficient de dilatation), les dimensions géométriques ainsi que la puissance spécifique à dissiper dans les canaux de refroidissement d'autre part. L'élaboration de relations empiriques pour de nouveaux fluides peut être facilitée par l'utilisation de modèles théoriques [2].

En régime transitoire, tel que l'enclenchement à basse température d'un transformateur en charge, l'analyse théorique du transfert de chaleur est beaucoup plus complexe et se laisse difficilement traiter par la voie du calcul. En outre, au-dessous d'une certaine température, la mesure de la viscosité des huiles minérales est aléatoire puisque l'on observe un début de cristallisation des paraffines. L'augmentation de viscosité à basse température est si importante qu'on peut s'attendre à un ralentissement de l'écoulement du diélectrique liquide dans les canaux de refroidissement (fig. 1). Cette perte de mobilité a pour conséquence une diminution des échanges thermiques par convection. Le transfert de chaleur par conduction étant faible, l'on assistera dans une phase plus ou moins longue, suivant le type de l'huile utilisée, à une nette augmentation de la température dans les canaux, toutefois limitée par la capacité calorifique de la partie active et de l'huile environnante. Cette phase pourrait se révéler dangereuse pour l'isolation du bobinage.

Les caractéristiques physiques des différents fluides utilisés pour les essais sont portées dans le tableau II.

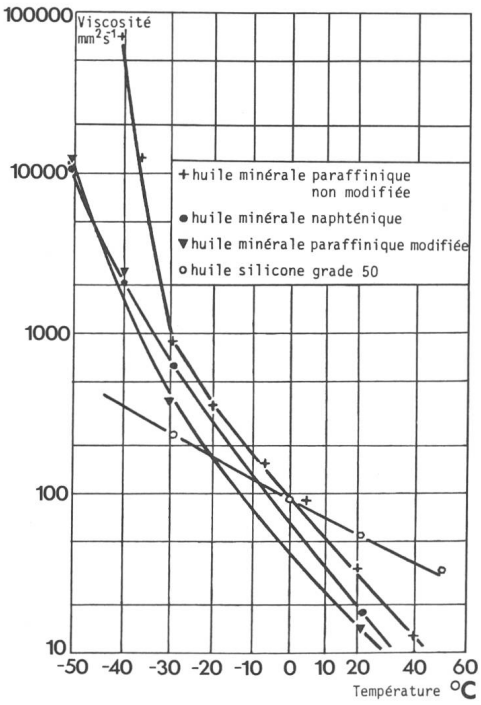

Fig. 1 Viscosité des divers fluides isolants, en fonction de la température

4. Essais, résultats

Un transformateur de distribution de 400 kVA, 16000/412 V; 14,4/560 A; 50 Hz comportant une cuve à plis avec refroidissement naturel est soumis à des essais d'enclenchement à pleine charge. Après remplissage, cet appareil est placé en chambre froide (fig. 2) à respectivement 0 °C, −25 °C et −40 °C jusqu'à l'obtention d'une température homogène dans tout le transformateur.

La capacité de refroidissement de la chambre froide est suffisante pour assurer une température ambiante pratiquement constante pendant l'essai d'échauffement en court-circuit à courant nominal. Il n'est pas tenu compte des pertes à vide, afin de mieux simuler un enclenchement en charge. En effet, un essai d'échauffement selon la norme ASE 3156 [3] ne serait pas appropriée pour cette étude: il aurait pour conséquence d'accélérer le réchauffage du fluide diélectrique dans les canaux de refroidissement.

Des thermocouples placés dans la partie active, dans l'huile, sur la cuve et autour du fer permettent d'enregistrer les températures pendant la durée de l'essai (fig. 3). De plus, tous les paramètres électriques (tension, courant, puissance) on été également relevés tout au long de l'expérience, afin d'en contrôler le bon déroulement.

Il est à noter que la mesure des températures moyennes du cuivre des enroulements HT et BT par la méthode des résistances n'est pas possible pendant un tel essai.

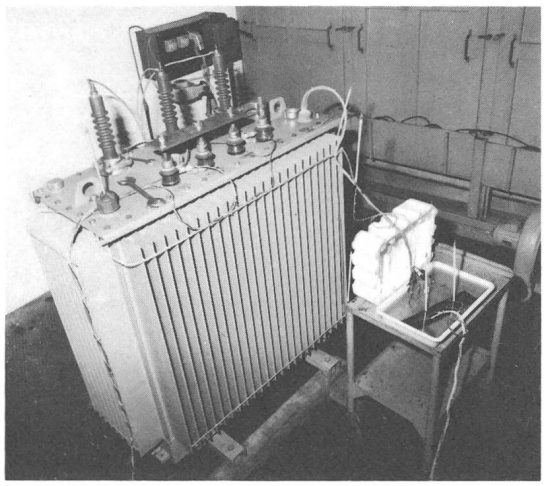

Fig. 2 Transformateur de distribution de 400 kVA en chambre froide, lors des essais d'enclenchement à basse température

En remplissant successivement le transformateur avec différentes huiles (tab. II), on obtient des résultats comparatifs où le seul paramètre variable est la qualité du diélectrique et sa viscosité.

Les résultats concernant l'évolution de l'échauffement en trois endroits d'un transformateur sont portés sur les figures 4 à 6, soit: ϑ_1 – haut du canal d'huile, ϑ_3 – bas du canal d'huile, ϑ_{10} – partie supérieure externe de la cuve. Les courbes représentent les échauffements obtenus lors d'essais à −40 °C, −25 °C et 0 °C. Au cours de ces deux derniers essais, on observe peu de différence entre les échauffements des diverses huiles. Toutefois, les courbes confirment par leur tendance que les huiles silicones conduisent à des échauffements supérieurs [4] à ceux enregistrés avec des huiles minérales pour des températures de service supérieures à 0 °C. Les essais à −40 °C révèlent des échauffements très différents selon le type de liquide utilisé. Le refroidissement par huile silicone y est particulièrement bon.

Les résultats obtenus dans le cas de l'huile paraffinique non modifiée reflètent parfaitement la forte augmentation de viscosité à basse température. En effet, au bas du canal d'huile (fig. 5c), un «overshoot» de courte durée après 65 min met en évidence la lenteur de la mise en mouvement du fluide. La même constatation peut être faite à partir de la mesure de ϑ_{10} (fig. 6c), puisqu'il faut attendre environ 2 heures pour que l'huile située à la partie supérieure de la cuve soit réchauffée.

Comme les mesures de viscosité le laissaient présager, les huiles de type naphténique et paraffinique modifié se comportent de façon très semblable. En outre, l'utilisation d'huiles

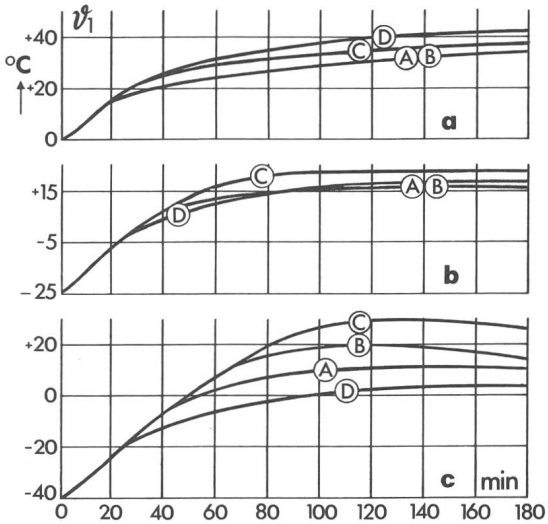

Fig. 4 Echauffements d'un transformateur de 400 kVA, rempli de différents fluides isolants

Mesures en haut du canal d'huile (pos. 1 de la fig. 3)

a température ambiante 0 °C
b température ambiante −25 °C
c température ambiante −40 °C

A Huile naphténique
B Huile paraffinique modifiée
C Huile paraffinique non modifiée
D Silicone Grade 50

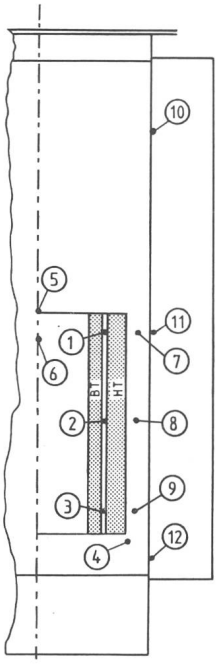

Fig. 3
Disposition des thermocouples

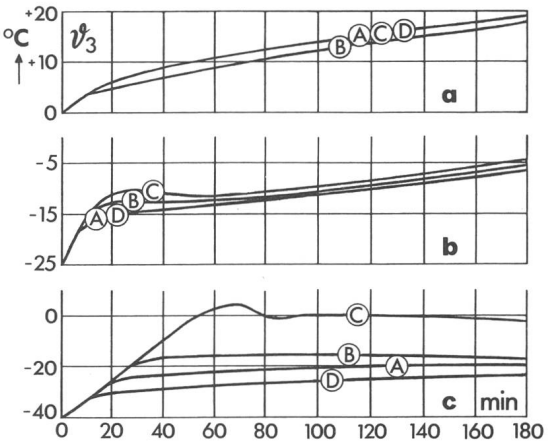

Fig. 5 Echauffements d'un transformateur de 400 kVA, rempli de différents fluides isolants

Mesures en bas du canal d'huile (Pos. 3 de la fig. 3)

a température ambiante 0 °C
b température ambiante −25 °C
c température ambiante −40 °C

A, B, C, D différentes qualités d'huile (voir fig. 4)

silicones grade 50 présente un avantage indéniable lorsqu'un transformateur doit assurer un service à très basse température.

Finalement, ces essais permettent de conclure qu'un enclenchement à pleine charge d'un transformateur de distribution rempli avec une huile de classe I (huile paraffinique non modifiée) et travaillant dans des conditions climatiques extrêmes ne présente pas de danger pour l'isolation du bobinage, même lorsque la température du transformateur à l'enclenchement est de 10 °C en dessous du point d'écoulement de l'huile utilisée.

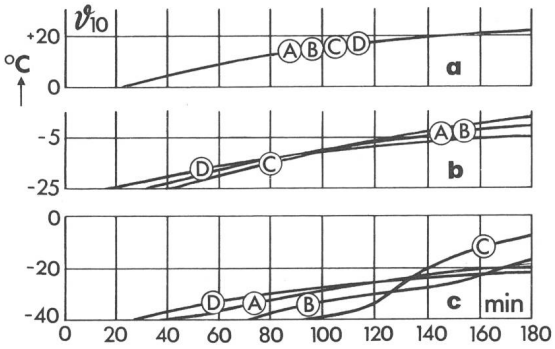

Fig. 6 Echauffements d'un transformateur de 400 kVA, rempli de différents fluides isolants

Mesures à la partie externe supérieure de la cuve (pos. 10, fig. 3)

a température ambiante 0 °C
b température ambiante − 25 °C
c température ambiante − 40 °C

A, B, C, D différentes qualités d'huile (voir fig. 4)

5. Conclusion

En raison des difficultés d'approvisionnement dans le secteur des huiles minérales naphténiques, les fabricants de transformateurs se trouvent dans la nécessité d'envisager l'utilisation d'huiles minérales paraffiniques.

Des essais d'enclenchement en charge à − 40 °C montrent que ces fluides diélectriques de la classe I permettent également un refroidissement satisfaisant de transformateurs de distribution soumis à nos conditions climatiques. Ce comportement semblable des huiles naphténiques et paraffiniques modifiées permet d'envisager l'utilisation de cette dernière dans les transformateurs de puissance.

Bibliographie

[1] Règles pour les huiles isolantes neuves pour transformateurs et interrupteurs. Publication de l'ASE No. 3163, 1972.

[2] *R. L. Grubb, M. Hudis* and *A. R. Traut:* A transformer thermal duct study of various insulating fluids. IEEE Trans PAS 100(1981)2, p. 466...473.

[3] Règles pour les transformateurs de puissance. Publication de l'ASE No. 3156, 1972.

[4] *C. Gandillon* et *P. Boss:* Utilisation des fluides silicones dans les transformateurs de distribution, en vue du remplacement des Askarels. Bull. ASE/UCS 72(1981)3, p. 142...146.

Adresse des auteurs

Pierre Boss, Ingénieur ETS et *Jean-Luc Hermin,* Ingénieur ETS, Sécheron, membre du groupe Brown Boveri, CH-1211 Genève 21.