



SICHERUNGEN/FUSES

VDE 0671 Teil 105: Fortsetzung eines bewährten Konzeptes

Sicherer Schutz von Verteil- transformatoren mit Lastschalter- Sicherungs-Kombinationen

von Heinz Ulrich Haas und Dirk Wilhelm

VDE 0671 Teil 105: Fortsetzung eines bewährten Konzeptes

Sicherer Schutz von Verteiltransformatoren mit Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen

Wenn es um die Absicherung von Verteiltransformatoren geht, fällt es schwer, Informationen mit einem gewissen Neuigkeitswert zu geben. Schließlich geht es um Transformatoren, die zum Teil schon seit mehr als 30 Jahren installiert sind. Die zugehörigen Hochspannungs-Sicherungen überwachen seit ebenso vielen Jahren mögliche Fehlerströme. In nur wenigen Fällen war ein Austausch der Sicherungen erforderlich, beispielsweise wenn es nach einem Kurzschluss zur Abschaltung gekommen ist. Häufig sind die Sicherungen in Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen integriert, und auch diese Schalter haben im Störfall zufriedenstellend »ihren Dienst« getan.

Was gäbe es also zu berichten?

Mit dem Erscheinen der VDE 0671 Teil 105 ist nun eine gewisse Verunsicherung aufgekommen. Eine Verunsicherung deshalb, weil bei Verwendung von Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen alte, bewährte Absicherungskonzepte plötzlich infrage gestellt werden. Bei näherer Betrachtung ist jedoch schnell festzustellen, dass in den meisten Fällen eine Beunruhigung nicht angebracht ist, da frühere Vorgaben zum Schutz des Transformators ihre Gültigkeit behalten. Vorliegende Veröffentlichung soll dem Fachmann eine Hilfestellung bieten, eigene Absicherungskonzepte zu überprüfen, deren Richtigkeit zu bestätigen oder den Wechsel zu einem geeigneteren Sicherungseinsatz herbeizuführen.

Kriterien zum Schutz des Transformators

Zunächst soll auf die für eine korrekte Absicherung grundlegenden Kriterien zum Schutz des Verteiltransformators eingegangen werden. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis der Transformator-Nennleistung, der zulässigen Überlast, der Betriebsspannung, der relative Kurzschlussspannung und des Einschaltstroms (Inrush). Nachfolgend und wie in *Bild 1* veranschaulicht, sind die Abhängigkeiten zur Auswahl eines geeigneten Hochspannungs-Sicherungseinsatzes (HH-Sicherung) aufgeführt:

- Die HH-Sicherung muss den Transformator-Nennstrom, sowie dessen zulässige Überlast führen können. Hierbei dürfen die vorgegebenen Werte der Erwärmung, als auch die maximal zulässige

Leistungsaufnahme einer möglicherweise verwendeten Schaltanlage nicht überschritten werden.

- Der Einschaltstrom des Transformators beträgt je nach Transformatortyp und Größe zwischen dem 6- und 20-fachen seines Bemessungsstromes über eine Dauer von 0,1 s. Diesem Einschaltimpuls muss von der HH-Sicherung widerstanden werden.
- Über die relative Kurzschlussspannung u_k [%] des Transformators ergibt sich bei Einleitung eines dreipoligen Klemmenkurzschlusses auf der Sekundärseite, der auf der Primärseite fließende Dauerkurzschlussstrom I_{sc} . Dieser muss innerhalb einer festgelegten Zeit, vom HH-Sicherungseinsatz abgeschaltet werden, um ein Bersten des Transformators zu verhindern.

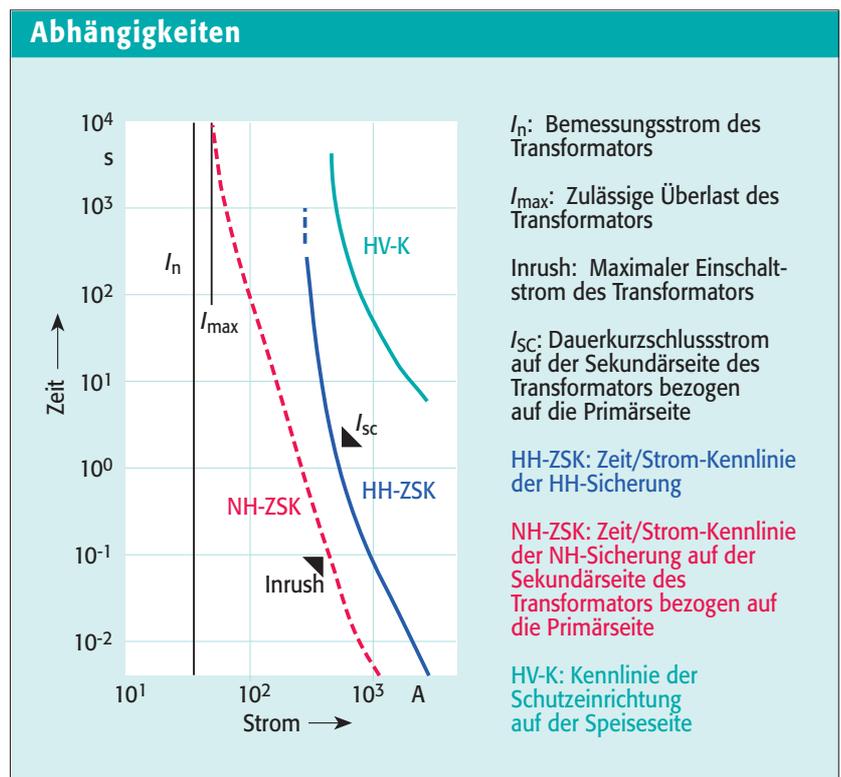


Bild 1: Abhängigkeiten beim Schutz des Transformators

Dipl.-Ing. **Heinz Ulrich Haas**, Leiter der Forschung und Entwicklung;
 Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. **Dirk Wilhelm**, technischer Projektleiter;
 Siba GmbH & Co. KG, Lünen

- Im gesamten Absicherungskonzept ist ferner die Selektivität des HH-Sicherungseinsatzes zu über- bzw. untergeordneten Schutzorganen zu berücksichtigen. Während sekundärseitig die Niederspannungssicherungen (NH-Sicherungen) in die Betrachtungen einzubeziehen sind, sind es auf der SpeiseSeite Schutzeinrichtungen wie übergeordnete Sicherungen, Relais etc.

Normen und Empfehlungen

Die Vorgaben zur Bestimmung der geeigneten Absicherung von Netztransformatoren konzentrieren sich auf die internationale Norm IEC 60787, sowie deren deutsche Übersetzung VDE 0670 Teil 402. Werden die Hochspannungssicherungseinsätze in luft- oder gasisolierten Lastschalter-Sicherungskombinationen eingesetzt, müssen Bestimmungen aus IEC 61271-105 bzw. VDE 0671 Teil 105 berücksichtigt werden. [2 – 5]

VDE 0670 Teil 402 beinhaltet über die Festlegung der IEC-Schrift hinaus Empfehlungen (*Tafel 1*) für Hochspannungssicherungen, wenn niederspannungsseitig Transformatorschutzsicherungen der Betriebsklasse gTr nach VDE 0636 Teil 2011 verwendet werden. Die Empfehlungen dieser Norm finden darüber hinaus anwenderseitig eine große Akzeptanz, auch wenn auf der Sekundärseite des Transformators statt der Transformatorschutzsicherungen gTr Leitungsschutzsicherungen gG nach VDE 0636 Teil 201 eingesetzt werden oder auch kein Sammelschienenschutz vorgesehen ist. [6 – 7]

Für eine weitere Betrachtung ist es wichtig, diese drei Einsatzfälle zu unterscheiden, da hierdurch ein größerer Bereich für die Zuordnung des Sicherungs-Bemessungsstroms zum Transformator gegeben ist. In *Bild 2* sind die drei Möglichkeiten dargestellt.

Zur praktischen Veranschaulichung wird im Folgenden beispielhaft die Vorgehensweise für einen Netztransformator mit 630 kVA bei 10 kV beschrieben. Der Einschaltstrom wird mit zwölffachem Transformatornennstrom und die rel. Kurzschlussleistung mit $u_k=4\%$ über maximal 2 s angesetzt.

Im Fall A in *Bild 2* wurden für diesen Transformator die für eine Berücksichtigung nach VDE 0670 Teil 402 relevanten Sicherungen dargestellt. Es können Hochspannungssicherungen mit einem Bemessungsstrom von 80 und 100 A verwendet werden (*Tafel 1*). Sekundärseitig werden Transformatorschutzsicherungen gTr mit 630 kVA (099 A) eingesetzt. Für den Schutz der Kabelabgänge sind Niederspannungssicherungen der Betriebsklasse gG mit maximal 400 A möglich. Wie *Bild 3* anhand einer Gegenüberstellung der betroffenen Kennlinien zeigt, arbeiten die drei Sicherungsgruppen selektiv zueinander. Im Falle eines Fehlerstroms schaltet nur der jeweils im Leitungszweig vorgeschaltete Sicherungseinsatz ab.

Den Schutz auf der Sammelschiene nach B in *Bild 2* übernehmen Niederspannungssicherungen der Betriebsklasse gG. Als Bemessungsstrom wird 800 A, als größter Wert unterhalb des Transformator-

Nennstroms, gewählt. Bedingt durch den flinkeren Verlauf dieser Sicherungen lassen sich HH-Sicherungen mit Bemessungsströmen von 80 bis 125 A verwenden. Damit verhalten sich auch hier alle drei betroffenen Sicherungsgruppen selektiv zueinander.

Gemäß C in *Bild 2* ist kein niederspannungsseitiger Sammelschienenschutz vorgesehen. Sofern ein ausreichender Kennlinienabstand der Hochspannungssicherungen zum Inrush-Punkt des Transformators gegeben ist, können jetzt sogar HH-Sicherungen mit Bemessungsströmen von 63 bis 125 A verwendet werden.

Kriterien zur Auswahl der geeigneten Sicherung

Nachdem der Bemessungsstrombereich der infrage kommenden HH-Sicherungen definiert wurde, ist nun die Auswahl der geeigneten Sicherungstypen zu treffen. Kriterien sind hier die Bemessungsspannung, die Betriebsklasse, der kleinste und größte Ausschaltstrom sowie die Art des Schlagstifts:

- Die Bemessungsspannung U_N des HH-Sicherungseinsatzes muss stets größer oder gleich der maximalen Betriebsspannung U_{trafo} des Transformators sein. Für den im Beispiel verwendeten Transformator wäre eine Bemessungsspannung von 12 kV zu verwenden.
- Der Sicherungseinsatz muss über ein ausreichend hohes Bemessungs-Ausschaltvermögen I_1 verfügen. Ein typischer Wert für Sicherungen in der betrachteten Bemessungsspannung ist 63 kA.

Absicherungsempfehlung											
Bemessungs-Spannung kV	Transformator-Scheinleistung in kVA										
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
	$u_k = 4\%$									$u_k = 5\%$	
	Höchstzulässige Kurzschlussdauer 2 s										
Nennströme der Hochspannungs-Sicherungseinsätze in A											
6/7,2	20 und 25	25 und 31,5	31,5 und 40	40 und 50	50 und 63	63 und 80	80 und 100	100 und 125	125 und 160	160	160 und 200
10/12	16	16	20 und 25	25 und 31,5	31,5 und 40	40 und 50	50 und 63	63 und 80	80 und 100	100 und 125	125 und 160
20/24	10	10	16	16	16 und 25	25	25 und 31,5	31,5 und 40	40 und 50	63	63 und 80
30/36	6,3	10	10	16	16 und 20	20 und 25	25	25 und 31,5	31,5 und 40	40 und 50	40 und 50

Tafel 1: Absicherungsempfehlung nach VDE 0670 Teil 402

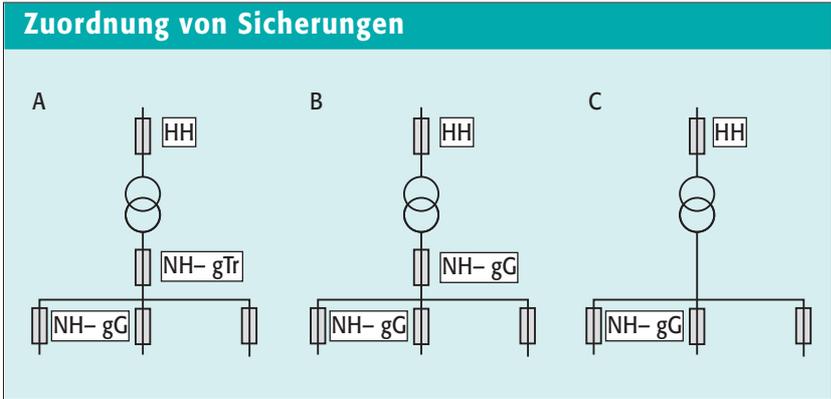


Bild 2: Zuordnung von Sicherungen zum Transformator

- Bei dem Schutz von Transformatoren kommen üblicherweise HH-Sicherungseinsätze vom Typ Teilbereich (Back up) zum Einsatz. Diese Sicherungseinsätze bieten einen Schutz beginnend bei ihrem jeweiligen minimalen Ausschaltstrom I_{min} , hinauf bis zum bereits erwähnten Bemessungs-Ausschaltvermögen I_1 . HH-Sicherungseinsätze der Siba besitzen einen I_{min} , welcher zwischen dem 3,2- bis 4-fachen Sicherungs-bemessungsstrom liegt.
- Sofern eine Schaltanlage mit einer dreipoligen Freiauslösung ver-

wendet wird, ist der Einsatz von Sicherungen mit einem temperaturbegrenzenden Schlagstift besonders zu empfehlen. Hohe, die Schaltanlage oder die Sicherung belastende Temperaturen werden vom Schlagstift erkannt und führen zu seinem Ansprechen. Dies wiederum führt zur Triggereung der Schaltanlage und zur Unterbrechung des Fehlerstroms. HH-Sicherungen des Herstellers Siba sind bis zu einem Bemessungsstrom von 160 A standardmäßig mit einem derartigen Schlagstiftsystem ausgestattet. [8]

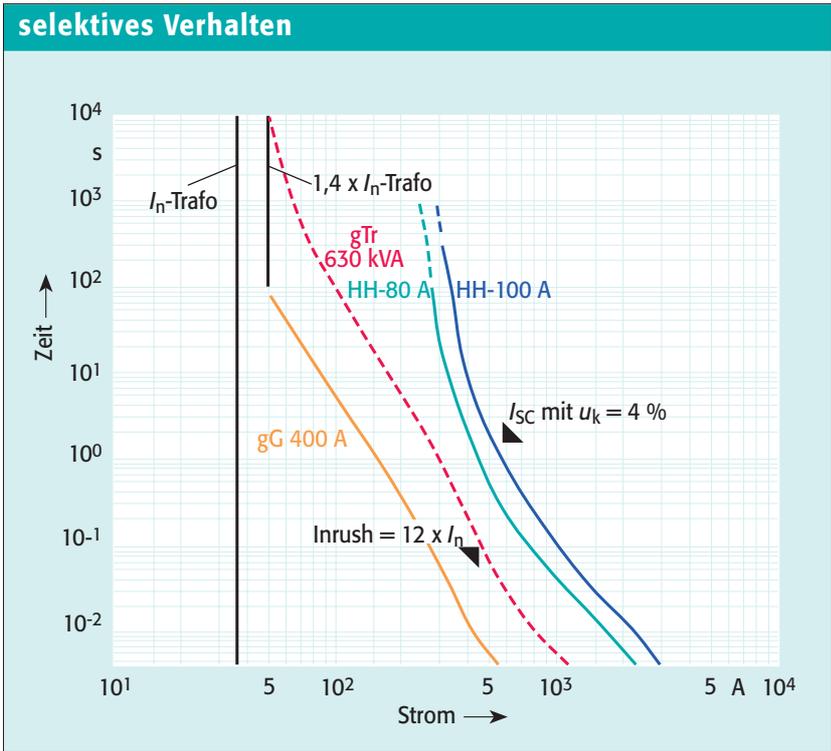


Bild 3: Selektives Verhalten der Sicherungen (Fall A)

Einbeziehung der Lastschalter-Sicherungs-Kombination in das Schutzkonzept

In Hinsicht auf einen ausreichenden Schutz in Transformatorstromkreisen, werden über die oben aufgeführten Kriterien hinaus in VDE 0671 Teil 105 Bedingungen an das Zusammenwirken von Lastschalter und Sicherungen gestellt. In dieser Norm ist abhängig von der Höhe des Fehlerstroms die Schaltaufgabe für den Lastschalter oder die Sicherung festgelegt. Die Trennung erfolgt dabei bei einem aus den Schalterdaten und der Sicherungskennlinie zu ermittelnden Übergangsstrom:

- Die Sicherungen haben alle Fehlerströme größer dem Übergangsstrom zu unterbrechen. Auch der aus der rel. Kurzschlussspannung ermittelte Kurzschlussstrom I_{SC} muss von den HH-Sicherungen abgeschaltet werden.
- Ströme kleiner dem Übergangsstrom der Sicherungen werden in einem Zusammenwirken von Sicherungen und Lastschalter unterbrochen. Dabei betätigt der Sicherungsschlagstift der erstanprechenden Sicherung die dreipolige Freiauslösung der Schaltanlage. Die Netztrennung findet letztlich durch den Lastschalter statt.

Zur Prüfung dieser Abhängigkeiten stellt der Schalterhersteller den Bemessungs-Übergangsstrom des Schalters $I_{transfer}$ und die Schalteröffnungszeit bei Schlagstiftbetätigung T_0 zur Verfügung. Vom Sicherungshersteller sind die Zeit-/Strom-Kennlinien der bevorzugten Sicherungen zu verwenden. Um das oben begonnene Beispiel weiterzuführen wird ein Bemessungs-Übergangsstrom des Schalters von 1.100 A und eine Schalteröffnungszeit von 45 ms zugrunde gelegt.

Die Bestimmung des Übergangsstroms stellt den umfangreichsten Teil in der Ermittlung des geeigneten Sicherungseinsatzes dar. Dieser Stroms wird im Hause SIBA mittels des in VDE 0671 Teil 105 unter Anhang B.2 genannten Verfahrens »Mathematische Bestimmung von ΔT « hergeleitet. Da sich die Kennliniensteigungen der Siba-HH-Sicherungen im Zeitintervall der üb-

lichen Schalteröffnungszeiten als konstant erweisen, ist eine wesentliche Verkürzung des ansonsten aufwändigen Iterationsverfahrens möglich. In Bild 4 sind die wesentlichen Schritte zur Berechnung des Übergangstroms dargestellt.

Für die beispielhafte Berechnung wurde ein Sicherungs-Bemessungsstrom von 80 A gewählt, der für alle drei Fälle gemäß Bild 2 verwendbar wäre. Aus der Berechnung werden folgende Werte ermittelt:

Übergangstrom der Sicherung
= 850 A
Kurzschlussstrom I_{SC} bei $u_K=4\%$
= 910 A

Es folgt der Vergleich des ermittelten Übergangstroms der Sicherung mit dem Bemessungs-Übergangstrom des Schalters:

- Übergangstrom der Sicherung \times Bemessungs-Übergangstrom des Schalters

- $850 \text{ A} \times 1100 \text{ A} ?$

Bedingung erfüllt mit $I_N = 80 \text{ A}$

In einem zweiten Vergleich wird geprüft, ob der Übergangstrom der Sicherung kleiner ist als der aus der relativen Kurzschlussspannung ermittelte Kurzschlussstrom:

- Übergangstrom der Sicherung $<$ Kurzschlussstrom I_{SC} (bei $u_K 4\%$)

- $850 \text{ A} < 910 \text{ A} ?$

Bedingung erfüllt mit $I_N = 80 \text{ A}$

Damit würde der Sicherungseinsatz mit einem Bemessungsstrom von 80 A die Bedingungen an einen Transformatorschutz hinsichtlich des relevanten Stands der Normung erfüllen.

SSK-Sicherungen, Spagat zwischen den Standards

In wenigen Fällen ist nach eingehender Berechnung allerdings festzustellen, dass die Schalterbedingungen mit der bevorzugten Sicherung nicht erfüllt werden können. So verringert eine größere relative Kurzschlussspannung u_K den Kurzschlussstrom, in unserem Beispiel würde er mit 6 % nur 606 A betragen. Ebenfalls würden niedrigere Werte des Bemessungs-Übergangstroms oder eine kurze Schalteröffnungszeit zu einer Nichterfüllung der Schalterbedingungen führen. Es gilt, einen Sicherungseinsatz mit einer flinkeren Kennlinie zu verwenden, um einen Übergangs-

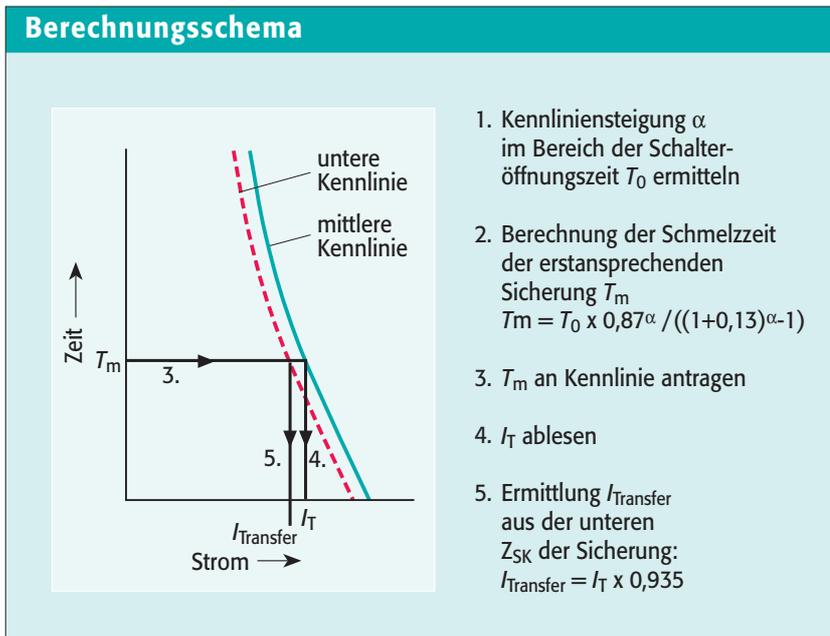


Bild 3: Selektives Verhalten der Sicherungen (Fall A)

strom unterhalb des errechneten Kurzschlussstroms zu erhalten.

Eine derartige Kennlinie wäre die des nächst niedrigeren Sicherungs-Bemessungsstroms. Die Verwendung dieser Sicherung hätte jedoch den Nachteil einer höheren Leistungsabgabe und Erwärmung. Darüber hinaus könnte die Selektivität zum nachgeschalteten Schutzorgan infrage gestellt werden.

Im Hause Siba wurden Sicherungseinsätze entwickelt, welche unter gleichem Bemessungsstrom ein deutlich flinkerer Verhalten bei vergleichbar niedrigen Werten der Leistungsabgabe aufweisen. Die Sicherungen unter der Bezeichnung »SSK-Sicherungen« werden verwendet, wenn obige Berechnung zu einer Nichterfüllung der Schalterbedingungen führte. Im Bemessungsstrom-Bereich von 63-A-SSK bis 160-A-SSK erlauben die Sicherungen in vielen Fällen die Verwendung einer Schalter-Sicherungs-Kombination, wenn sich die Standard-Sicherungen als zu »träge« erweisen. [9]

In einer Variante des obigen Beispiels kommt bei einem u_K von 6% eine Sicherung 80 A-SSK zum Einsatz:

- Übergangstrom der Sicherung $<$ Kurzschlussstrom (bei $u_K 6\%$)
 $850 \text{ A} < 606 \text{ A} ?$

1. Kennliniensteigung α im Bereich der Schalteröffnungszeit T_0 ermitteln
2. Berechnung der Schmelzzeit der erstansprechenden Sicherung T_m
 $T_m = T_0 \times 0,87^\alpha / ((1+0,13)^\alpha - 1)$
3. T_m an Kennlinie antragen
4. I_T ablesen
5. Ermittlung $I_{Transfer}$ aus der unteren Z_{SK} der Sicherung:
 $I_{Transfer} = I_T \times 0,935$

Bedingung nicht erfüllt mit $I_N = 80 \text{ A}$

- Übergangstrom der Sicherung $<$ Kurzschlussstrom (bei $u_K 6\%$)
 $590 \text{ A} < 606 \text{ A} ?$

Bedingung erfüllt mit $I_N = 80 \text{ A-SSK}$

Bezüglich des minimalen und maximalen Ausschaltstroms sind SSK-Sicherungen vergleichbar mit den Standard-HH-Sicherungen. Bei identischen Abmessungen ist die Leistungsabgabe meist noch niedriger. Auch diese Sicherungen sind mit einem temperaturbegrenzenden Schlagstift ausgerüstet und erfüllen damit alle Forderungen, die an einen modernen Transformatorschutz gestellt werden.

Die Sicherungen haben bei den Schalterherstellern internationale Beachtung gefunden und wurden in deren Empfehlungslisten aufgenommen.

Zusammenfassung

Sofern Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen nach VDE 0671 Teil 105 verwendet werden, ist die Ermittlung einer geeigneten Hochspannungssicherung zum Schutz der Verteiltransformatoren zumindest im theoretischen Ansatz komplizierter geworden. Während in den meisten Fällen die seit vielen Jahren bewährten Sicherungen weiterhin im Einsatz bleiben kön-

nen, kann es in wenigen Fällen zum Wechsel auf einen kleineren Bemessungsstrom oder einen anderen Sicherungstyp, der speziell auf die Vorgaben der Norm ausgerichtet ist, kommen.

Bevor ein Sicherungswechsel jedoch durchgeführt wird, sollte der Schaltanlagenhersteller bzw. der Sicherungshersteller zu Rate gezogen werden. Unter praktischen Gesichtspunkten gilt es dann abzuwägen, inwieweit die Anlagedaten eine Erweiterung der Vorgabewerte zulassen und damit die Verwendung der bisherigen Sicherung ermöglichen.

Schrifttum

[1] www.siba.de

[2] IEC 60787:1983-01 Application guide for the selection of fuse-links of high-voltage fuses for transformer circuit application

[3] DIN VDE 0670-402 (VDE 0670 Teil 402):1988-05 Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Auswahl von strombegrenzenden Sicherungseinsätzen für Transformatorstromkreise

[4] IEC 61272-105:2002 High-voltage switchgear and controlgear – Part 105: Alternating current switch-fuse combinations

[5] DIN EN 62271-105 (VDE 0671 Teil 105):2003-12 Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen – Teil 105: Hochspannungs-Lastschalter-Sicherungskombinationen

[6] DIN VDE 0636-2011 (VDE 0636 Teil 2011):1999-05 Niederspannungssicherungen (NH-System) – Teil 2-1: Zusätzliche Anforderungen an Sicherungen zum Gebrauch durch Elektrofachkräfte bzw. elektrotechnisch unterwiesene Personen – Nationale Ergänzung 1: Schutz von elektrischen Sonderanlagen

[7] DIN VDE 0636-201 (VDE 0636 Teil 201):2004-10 Niederspannungssicherungen (NH-System) – Teil 2-1: Zusätzliche Anforderungen an Sicherungen zum Gebrauch durch Elektrofachkräfte bzw. elektrotechnisch unterwiesene Personen – Hauptabschnitt I bis VI: Beispiele von genormten Sicherungstypen

[8] *Haas, H. U.*: Thermal system protection of switchgear through high-voltage fuse-links with integrated temperature limiter under consideration of IEC 420:1990. Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Fuses and their Application (ICEFA), 25. – 27. 09. 1995, TU Ilmenau

[9] *Löffler, R.; Haas, H. U.*: Hochspannungssicherungen für Schalter-Sicherungs-Kombinationen. Etz, Elektrotechnik und Automation, 7-8/2001, VDE-Verlag GmbH, Berlin und Offenbach

ulrich.haas@siba.de

www.siba.de