

# Kurzschlusschutz von MS-Verteiltransformatoren (2)

**ERDKURZSCHLUSS UND SELEKTIVITÄT** Während sich der erste Beitragsteil zunächst allgemein mit dem Kurzschlusschutz von 20 kV/0,4 kV- bzw. 10 kV/0,4 kV-Verteiltransformatoren befasste, geht es hier nun konkret weiter mit Erdkurzschlussströmen bei niederohmiger Sternpunktterdung und den Selektivitätsverhältnissen zwischen den Überstromschutzeinrichtungen.



## AUF EINEN BLICK

**TEILBEREICHS-HH-SICHERUNGEN** Es gibt eine Reihe von Merkmalen, nach denen die passende Teilbereichs-HH-Sicherung sorgfältig auszuwählen ist

**BERECHNUNGEN** Der zweite Teil befasst sich mit Erdkurzschlussströmen bei niederohmiger Sternpunktterdung und den Selektivitätsverhältnissen zwischen Überstromschutzeinrichtungen

Fortsetzung aus »de« 12/2016, S. 37 ff.

Abschließend befasste sich der erste Beitragsteil mit dem Ausgleichsvorgang während des Einschaltens von Transformatoren. Den hierbei auftretenden hohen Einschaltstoßstrom bezeichnet man als rush current bzw. Rush-Strom.

## Erdkurzschlussströme bei niederohmiger Sternpunktterdung

Die Form der Behandlung des Sternpunktes des Transformators diktiert die Größe der Nullimpedanz und hat de facto entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Kurzschlussströme über Erde. Bei der niederohmigen Sternpunktterdung (NOSPE) handelt es sich um die Einschaltung einer Erdungsimpedanz (Resistanz oder Reaktanz) zwischen Sternpunkt und Erde des einspeisenden Transformators (Umspanners).

Diese Betriebsart der Sternpunktbehandlung wird in den städtischen Kabelnetzen, vor allem in Kabelnetzen mit der Nennspannung 10 kV gefahren, mit dem Ziel, einpolige Erdkurzschlussströme zu begrenzen. Deshalb spricht man dabei auch von der strombegrenzenden Sternpunktterdung.

Der Betrag des Anfangskurzschlusswechselstromes bei dem einpoligen Erdkurz-

schluss wird in der Regel auf 1000A oder 2000A begrenzt. Diese so in der Fehlerstromstärke begrenzten Erdfehler sind aber immer noch kurzschlussartig, so dass diese Art der Sternpunktbehandlung eine wirksame Sternpunktterdung bedeutet.

Die Teilbereichs-HH-Sicherung, die zum Kurzschlusschutz des Verteiltransformators gewählt wird, muss in der Lage sein, einpolige auf der Oberspannungsseite des Verteiltransformators auftretende Fehler – also auf der Fehlerstelle F1 (Bild 4, siehe Teil 1) – zu erkennen und schnell abzuschalten. Dies erfüllt die Sicherung dann, wenn ihr Bemessungsmindestausschaltstrom kleiner als der minimale durch einen einpoligen Erdkurzschluss hervorgerufene, einpolige Anfangskurzschlusswechselstrom ist.

Es empfiehlt sich, die Ansprechbarkeit des zum Kurzschlusschutz des Verteiltransformators auszuwählenden Sicherungseinsatzes hinsichtlich der Erkennung und Abschaltung der Erdkurzschlussströme bei der niederohmigen Sternpunktterdung des vorgelagerten Umspanners durch eine geeignete Kurzschlussstromberechnung zu überprüfen bzw. nachzuweisen.

Für das in Bild 4 konfigurierte Netz berechnet sich der kleinste einpolige Erdkurz-

schlussstrom bzw. Anfangskurzschlusswechselstrom auf der Fehlerstelle F1 wie folgt:

$$I'_{k1min} = \frac{c_{min} \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot e^{j \cdot 0}}{2 \cdot A + B}$$

mit:

$$A = Z_Q + Z_{T1} + Z_{ms1} + Z_{ms2} \text{ und}$$

$$B = Z_{0T1} + Z_{0ms1} + Z_{0ms2} + 3 \cdot Z_E$$

Bei der obigen Gleichung stellt  $c_{min}$  den Spannungsfaktor für die Berechnung der kleinsten Kurzschlussströme dar. Weiterhin sind Impedanz ( $Z$ ), Resistanz ( $R$ ) und Reaktanz ( $X$ ) des speisenden 110-kV-Netzes im Mitsystem:

$$Z_Q = |R_Q + j \cdot X_Q| \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{X_Q}{R_Q}\right)}$$

Impedanz ( $Z$ ), Resistanz ( $R$ ) und Reaktanz ( $X$ ) des Transformators 1 im Mitsystem:

$$Z_{T1} = |R_{T1} + j \cdot X_{T1}| \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{X_{T1}}{R_{T1}}\right)}$$

Impedanz ( $Z$ ), Resistanz ( $R$ ) und Reaktanz ( $X$ ) des Transformators 1 im Nullsystem:

$$Z_{0T1} = |R_{0T1} + j \cdot X_{0T1}| \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{X_{0T1}}{R_{0T1}}\right)}$$

Impedanz ( $Z$ ), Resistanz ( $R$ ) und Reaktanz ( $X$ ) des Mittelspannungskabels 1 im Mitsystem:

$$Z_{ms1} = |R_{ms1} + j \cdot X_{ms1}| \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{X_{ms1}}{R_{ms1}}\right)}$$

Impedanz ( $Z$ ), Resistanz ( $R$ ) und Reaktanz ( $X$ ) des Mittelspannungskabels 1 im Nullsystem:

$$Z_{0ms1} = |R_{0ms1} + j \cdot X_{0ms1}| \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{X_{0ms1}}{R_{0ms1}}\right)}$$

Impedanz ( $Z$ ), Resistanz ( $R$ ) und Reaktanz ( $X$ ) des Mittelspannungskabels 2 im Mitsystem:

$$Z_{ms2} = |R_{ms2} + j \cdot X_{ms2}| \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{X_{ms2}}{R_{ms2}}\right)}$$

Impedanz ( $Z$ ), Resistanz ( $R$ ) und Reaktanz ( $X$ ) des Mittelspannungskabels 2 im Nullsystem:

$$Z_{0ms2} = |R_{0ms2} + j \cdot X_{0ms2}| \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{X_{0ms2}}{R_{0ms2}}\right)}$$

Impedanz ( $Z$ ), Resistanz ( $R$ ) und Reaktanz ( $X$ ) der NOS-PE im Mitsystem:

$$Z_E = |R_E + j \cdot X_E| \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{X_E}{R_E}\right)}$$

Der so errechnete und durch einen Verminderungsfaktor (wegen zu berücksichtigender Lichtbogen- und Erdübergangswiderstände) korrigierte Fehlerstrom muss größer als der Bemessungsmindestausschaltstrom der Teilbereichs-HH-Sicherung sein.

### Zulässige Leistungsabgabe bei Sicherungseinbau in Behälter

Die thermischen Verhältnisse der in einem Isolierstoffbehälter eingebauten Sicherung unterscheiden sich wegen des begrenzten Verlustwärmeabführens gravierend von denen, die bei einer in freier Luft befindlichen Sicherung einer luftisolierten MS-Schaltanlage. Wegen der eingeschränkten Wärmeabfuhr sind die SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen kritisch. Hier sollen thermische Schäden an Sicherungsköchern und benachbarten Teilen vermieden werden. Um dies zu gewährleisten, muss man bei der Auswahl der Sicherung auf die Begrenzung der Leistungsabgabe der Sicherung achten.

In diesem Zusammenhang geben die Hersteller der SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen die maximale Leistungsaufnahme des Sicherungsköchers an, welche nicht überschritten werden darf.

Die maximale Leistungsaufnahme des Sicherungsköchers muss größer als die Leistungsabgabe (Verlustleistung) der Sicherung bei dem maximalen Betriebsstrom sein. Die Leistungsabgabe der Sicherung bei maximalem Betriebsstrom wird aus der Bemessungsleistungsaufgabe der Sicherung, dem maximalen Betriebsstrom des Transformators und dem Bemessungsstrom der Sicherung berechnet.

Um thermische Schäden an den Sicherungen selbst und den Sicherungsköchern der SF<sub>6</sub>-isolierten MS-Schaltanlagen zu vermeiden, werden HH-Sicherungen mit einer temperaturbegrenzenden Funktion ausgestattet. Bevor eine gefährliche Überhitzung eintritt, wird der Schlagstift der Sicherung aktiviert, welcher dann den Lastschalter auslöst. Der Überlastschutz des Verteiltransformators ist durch die Sicherungen mit der temperaturbegrenzenden Funktion nicht vorgesehen.

### Selektivität zu Überstromsicherheitseinrichtungen

Der Aufbau eines MS-Verteilungsnetzes soll eine sichere Versorgung gewährleisten. Die einzelnen Verteiltransfor-

# LiveLink

Lichtmanagement  
revolutionär einfach.

Produkt-Tester  
gesucht. Jetzt  
bewerben.



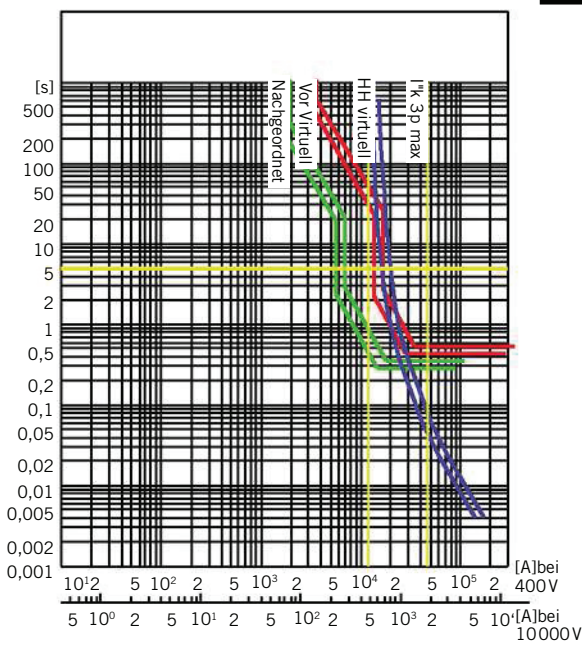
## Mission: Besprechungsraum

Sie möchten einen Besprechungsraum mit sensorgesteuerter und damit besonders energieeffizienter Lichttechnik ausstatten? Bewerben Sie sich jetzt für unsere „Mission Besprechungsraum“ und gewinnen Sie ein LiveLink Starter Kit inklusive DALI LED-Leuchten und Installations-Support. Überzeugen Sie sich unter Realbedingungen von der revolutionär einfachen Einrichtung und Bedienung intelligenter Beleuchtungstechnik mit LiveLink. Die komfortable „Plug-&-Play“-Installation und die vielen voreingestellten Beleuchtungsszenarien werden Sie garantiert begeistern.

**Beschreiben Sie kurz Ihr Projekt  
und bewerben Sie sich unter:  
[produkttest@steinel-professional.de](mailto:produkttest@steinel-professional.de)**

Weitere Informationen zu LiveLink:  
[www.stinel-professional.de/livelink](http://www.stinel-professional.de/livelink)

**STEINEL**<sup>®</sup>  
PROFESSIONAL



**Bild 12:** Staffeldiagramm mit der Software »elcoPower« erstellt

matorenstationen werden in der Regel über Ringkabel versorgt. Im Fehlerfall darf nicht der gesamte Ring mit allen Transformatorstationen ausfallen. Deshalb wird der Ring so betrieben, dass die Selektivität zwischen dem vorgeordneten Schutzrelais und den zum Kurzschlusschutz der Verteiltransformatoren eingesetzten Teilbereichs-HH-Sicherungen gegeben ist.

linie und der Sicherungskennlinie von 100ms besteht. Bei diesem Abstand sind die untere Grenze der Toleranz der Relais- und die obere Grenze der Toleranz der Sicherungskennlinie gemeint. Für Selektivitätsbetrachtungen im MS-Netz eignet sich z.B. die Software Sigrade.

In der DIN VDE 0670-402 sind die Zeit-Strom-Bereiche und in der VDE 0670-4 die

Als vorgeordnete Relais werden Relais mit unabhängigem Maximalstromzeit-schutz (UMZ-Schutz) oder mit abhängigem Maximalstromzeitschutz (AMZ-Schutz) verwendet. Den AMZ-Schutz gibt es in den Ausführungen normal invers, stark invers, extrem invers und Langzeit invers. Je nach der Ausdehnung des Netzes kann auch der Distanzschutz eingesetzt werden.

Um die Selektivität zwischen dem vorgeordneten Relais und den Sicherungen zu erreichen, sollte man das UMZ- bzw. AMZ-Relais so einstellen, dass bei der größten Kurzschlussbelastung im MS-Netz, ein Abstand zwischen der Relaiskennlinie und der Sicherungskennlinie von 100ms besteht. Bei diesem Abstand sind die untere Grenze der Toleranz der Relais- und die obere Grenze der Toleranz der Sicherungskennlinie gemeint. Für Selektivitätsbetrachtungen im MS-Netz eignet sich z.B. die Software Sigrade.

zulässigen Toleranzen von +/- 20% der Zeit-Strom-Kennlinien in die Richtung der Stromachse der HH-Sicherungen festgelegt. Die DIN VDE 0670-402 legt die sogenannten Stromtore fest. Das sind die unteren und oberen Grenzwerte der Schmelzströme für die Schmelzzeiten: 10s, 0,1s und 0,01s. Die Zeit-Strom-Kennlinien der Sicherungen sollen innerhalb dieser Grenzen liegen.

Dabei ist die Selektivität der HH-Sicherungen zu den NH-Sicherungen der Betriebsklasse gTr berücksichtigt, die zum Transformatorschutz auf der Unterspannungsseite der Verteiltransformatoren eingesetzt werden.

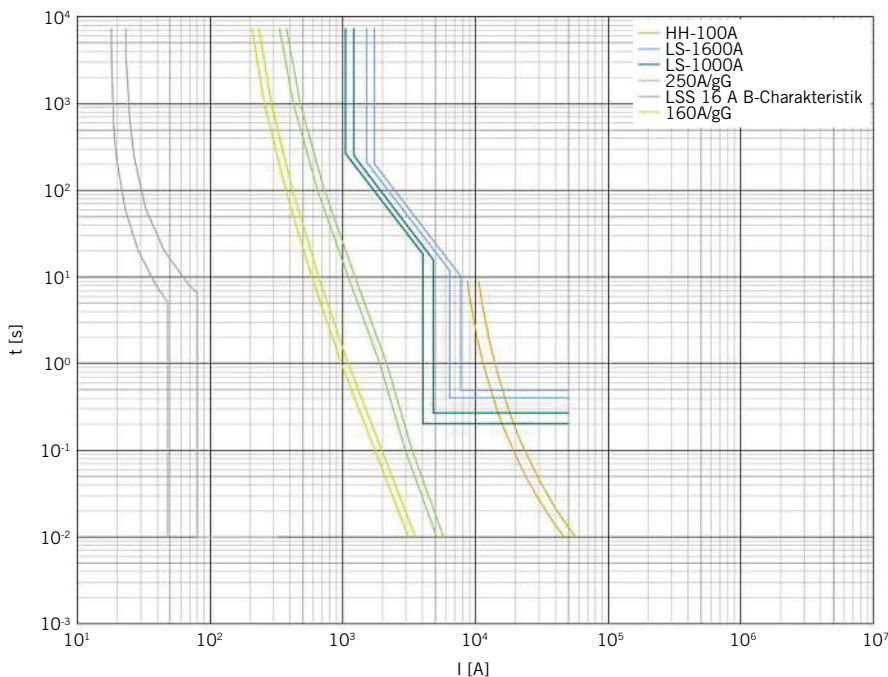
An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass die NH-Sicherungen der Betriebsklasse gTr aufgrund ihres kleinen Bemessungsausschaltstromes von 25kA (Effektivwert der netzfrequenten Komponente des unbeeinflussten Kurzschlussstromes) kaum für Mehrfacheinspeisungen geeignet sind, weil dort wesentlich höhere Kurzschlussbelastungen auftreten können.

Die HH-Sicherungen sind zu den NH-Sicherungen der Betriebsklasse gG in der Regel problemlos selektiv. Die spezifische Schmelzenergie (sprich: das Schmelzintegral) der HH-Sicherung muss dabei hinsichtlich des Bemessungsübertragungsverhältnisses des Verteiltransformators größer als die spezifische Ausschaltenergie (Ausschaltintegral) der NH-Sicherung der Betriebsklasse gG sein.

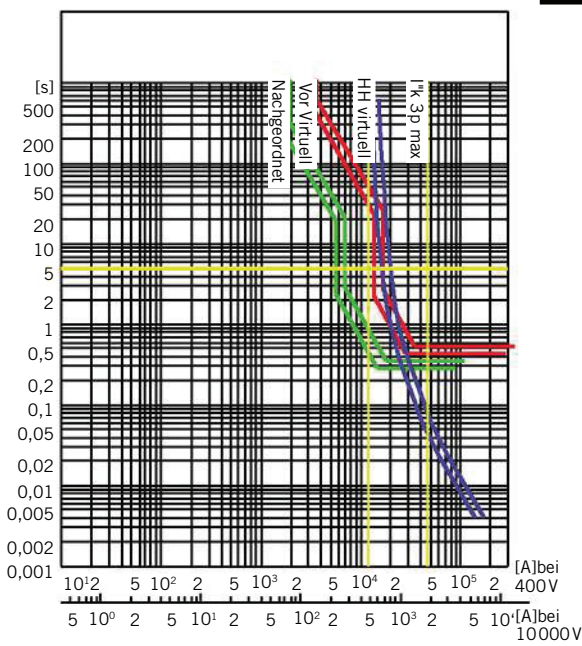
Die HH-Sicherungen sind zu den nachgeordneten nullpunktlöschenden NS-Leistungsschaltern nicht bzw. nur teilesektiv. Dies gilt es zu berücksichtigen, wenn man einen Abgangsleistungsschalter (Q4 NS-LS im Bild 4) der NSHV plant bzw. errichtet.

Soll vermieden werden, dass bei einem Kurzschluss in der NSHV hinter diesem Abgangsschalter (Fehlerstelle F5 im Bild 4), zusammen mit diesem Schalter auch die HH-Sicherung des Verteiltransformators mit-auslöst, muss man dann statt HH-Sicherungen zum Schutz des Verteiltransformators einen MS-Leistungsschalter mit Wandler und Schutzrelais einsetzen.

Zwei Staffeldiagramme sollen dieses Thema veranschaulichen. Das erste Diagramm wurde mit der Software elcoPower und das zweite mit Simaris curves erstellt (**Bild 12 und 13**). HH-Sicherungen verhalten sich zu kompakten bzw. kurzschlussstrombegrenzenden Leistungsschaltern immer dann selektiv, wenn das Schmelzintegral der HH-Sicherungen hinsichtlich des Bemessungsübertragungsverhältnisses des Verteiltrans-



**Bild 13:** Staffeldiagramm mit der Software »Simaris curves« erstellt



**Bild 12:** Staffeldiagramm mit der Software »elcoPower« erstellt

matorenstationen werden in der Regel über Ringkabel versorgt. Im Fehlerfall darf nicht der gesamte Ring mit allen Transformatorstationen ausfallen. Deshalb wird der Ring so betrieben, dass die Selektivität zwischen dem vorgeordneten Schutzrelais und den zum Kurzschlusschutz der Verteiltransformatoren eingesetzten Teilbereichs-HH-Sicherungen gegeben ist.

linie und der Sicherungskennlinie von 100ms besteht. Bei diesem Abstand sind die untere Grenze der Toleranz der Relais- und die obere Grenze der Toleranz der Sicherungskennlinie gemeint. Für Selektivitätsbetrachtungen im MS-Netz eignet sich z.B. die Software Sigrade.

In der DIN VDE 0670-402 sind die Zeit-Strom-Bereiche und in der VDE 0670-4 die

Als vorgeordnete Relais werden Relais mit unabhängigem Maximalstromzeit (UMZ-Schutz) oder mit abhängigem Maximalstromzeitschutz (AMZ-Schutz) verwendet. Den AMZ-Schutz gibt es in den Ausführungen normal invers, stark invers, extrem invers und Langzeit invers. Je nach der Ausdehnung des Netzes kann auch der Distanzschutz eingesetzt werden.

Um die Selektivität zwischen dem vorgeordneten Relais und den Sicherungen zu erreichen, sollte man das UMZ- bzw. AMZ-Relais so einstellen, dass bei der größten Kurzschlussbelastung im MS-Netz, ein Abstand zwischen der Relaiskennlinie und der Sicherungskennlinie von 100ms besteht.

zulässigen Toleranzen von +/- 20% der Zeit-Strom-Kennlinien in die Richtung der Stromachse der HH-Sicherungen festgelegt. Die DIN VDE 0670-402 legt die sogenannten Stromtore fest. Das sind die unteren und oberen Grenzwerte der Schmelzströme für die Schmelzzeiten: 10s, 0,1s und 0,01s. Die Zeit-Strom-Kennlinien der Sicherungen sollen innerhalb dieser Grenzen liegen.

Dabei ist die Selektivität der HH-Sicherungen zu den NH-Sicherungen der Betriebsklasse gTr berücksichtigt, die zum Transformatorschutz auf der Unterspannungsseite der Verteiltransformatoren eingesetzt werden.

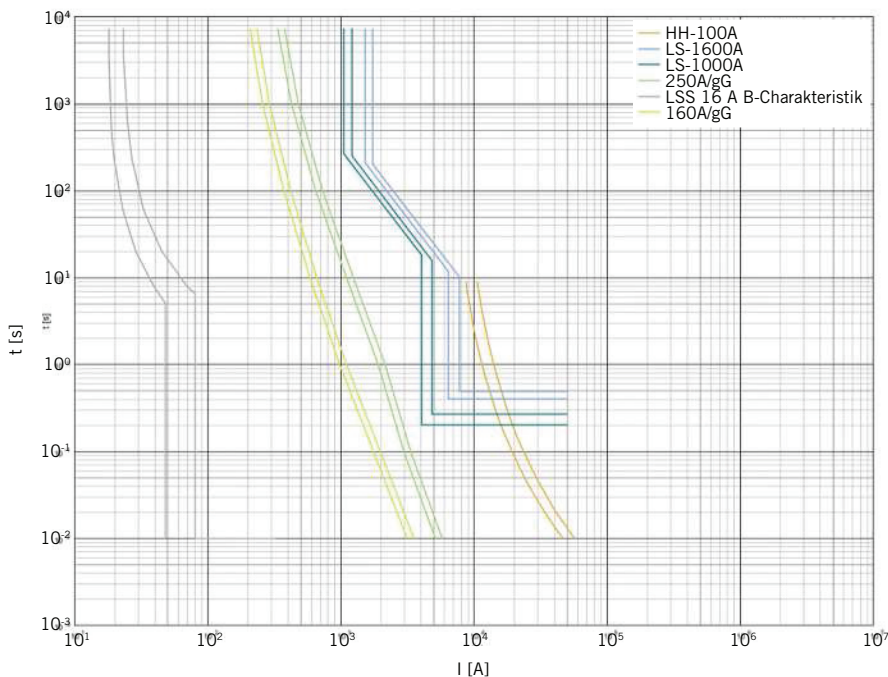
An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass die NH-Sicherungen der Betriebsklasse gTr aufgrund ihres kleinen Bemessungsausschaltstromes von 25kA (Effektivwert der netzfrequenten Komponente des unbeeinflussten Kurzschlussstromes) kaum für Mehrfacheinspeisungen geeignet sind, weil dort wesentlich höhere Kurzschlussbelastungen auftreten können.

Die HH-Sicherungen sind zu den NH-Sicherungen der Betriebsklasse gG in der Regel problemlos selektiv. Die spezifische Schmelzenergie (sprich: das Schmelzintegral) der HH-Sicherung muss dabei hinsichtlich des Bemessungsübertragungsverhältnisses des Verteiltransformators größer als die spezifische Ausschaltenergie (Ausschaltintegral) der NH-Sicherung der Betriebsklasse gG sein.

Die HH-Sicherungen sind zu den nachgeordneten nullpunktlöschenden NS-Leistungsschaltern nicht bzw. nur teilelektiv. Dies gilt es zu berücksichtigen, wenn man einen Abgangsleistungsschalter (Q4 NS-LS im Bild 4) der NSHV plant bzw. errichtet.

Soll vermieden werden, dass bei einem Kurzschluss in der NSHV hinter diesem Abgangsschalter (Fehlerstelle F5 im Bild 4), zusammen mit diesem Schalter auch die HH-Sicherung des Verteiltransformators mit-auslöst, muss man dann statt HH-Sicherungen zum Schutz des Verteiltransformators einen MS-Leistungsschalter mit Wandler und Schutzrelais einsetzen.

Zwei Staffeldiagramme sollen dieses Thema veranschaulichen. Das erste Diagramm wurde mit der Software elcoPower und das zweite mit Simaris curves erstellt (**Bild 12 und 13**). HH-Sicherungen verhalten sich zu kompakten bzw. kurzschlussstrombegrenzenden Leistungsschaltern immer dann selektiv, wenn das Schmelzintegral der HH-Sicherungen hinsichtlich des Bemessungsübertragungsverhältnisses des Verteiltrans-



**Bild 13:** Staffeldiagramm mit der Software »Simaris curves« erstellt

formators größer als das Durchlassintegral dieser Schalter ist. Es muss darauf geachtet werden, dass die Zeit-Strom-Kennlinien der HH- bzw. NH-Sicherungen (Schmelzsicherungen allgemein) nur bis zu der Schmelz- bzw. Ausschaltzeit von 0,1 s den realen Schaltzeiten entsprechen und somit für die Beurteilung der Selektivitätsverhältnisse relevant sind. Die Ausschaltzeit der Schmelzsicherungen besteht aus der Summe von der Schmelzzeit und der Löschzeit (Lichtbogenlöscheszeit).

Bei hinsichtlich des Bemessungsstroms des Schmelzsicherungseinsatzes kleinen Überströmen ist die Lichtbogenlöscheszeit so klein, dass sie vernachlässigt werden kann. Die Schmelzzeit in der Zeit-Strom-Kennlinie entspricht dann de facto der wahren Schmelz- bzw. Ausschaltzeit. Die Lichtbogenlöscheszeit steigt in Abhängigkeit vom größer werdenden Überstrom an.

Bei sehr hohen Überströmen (d. h. verhältnismäßig hohen Kurzschlussströmen) bzw. sehr kurzen Schaltzeiten von wenigen ms muss die Lichtbogenlöscheszeit unbedingt berücksichtigt werden.

Bei Schaltzeiten < 0,1 s spricht man von sogenannten virtuellen Schmelz- bzw. Ausschaltzeiten der Zeitstromkennlinien. Die virtuellen Schmelz- bzw. Ausschaltzeiten weichen erheblich von den realen Schmelz- bzw. Ausschaltzeiten ab und werden aus den oszillografierten Kurzschlussstromverläufen ermittelt. Man integriert die Fläche, welche die quadrierte Stromkurve mit der Zeitachse über die tatsächliche Schmelzzeit bzw. Ausschaltzeit bildet. Aus dieser Fläche (Schmelzintegral bzw. Ausschaltintegral) bildet man dann ein Rechteck, bei dem eine Seite dem Quadrat des Effektivwertes des unbeeinflussten Dauerkurzschlusswechselstromes entspricht. Die andere Seite entspricht dann dem Wert der virtuellen Schmelz- bzw. Ausschaltzeit. Das Schmelzintegral der Sicherung wird mathematisch wie folgt ausgedrückt:

$$\int_0^{t_s} i_k(t)^2 dt$$

wobei  $t_s$  die Schmelzzeit der Sicherung und  $i_k(t)^2$  das Quadrat des Momentanwertes des Kurzschlussstromes ist. Die virtuelle Schmelzzeit der Sicherung  $t_{vs}$  errechnet sich zu:

$$t_{vs} = \frac{\int_0^{t_s} i_k(t)^2 dt}{I_k^2}$$

wobei  $I_k^2$  der quadratische Effektivwert der netzfrequenten Komponente des unbeeinflussten Kurzschlussstromes ist. Das Ausschaltintegral der Sicherung lautet:

$$\int_0^{t_a} i_k(t)^2 dt$$

wobei  $t_a$  die Ausschaltzeit der Sicherung und  $i_k(t)^2$  das Quadrat des Momentanwertes des Kurzschlussstromes ist. Die virtuelle Ausschaltzeit der Sicherung  $t_{va}$  errechnet sich wie folgt:

$$t_{va} = \frac{\int_0^{t_a} i_k(t)^2 dt}{I_k^2}$$

# ELMAR

DER MARKENPREIS DER ELEKTROBRANCHE

## ELMAR 2016

### Jetzt bewerben unter [www.elektromarken.de](http://www.elektromarken.de)

Ist Ihr Elektrohandwerksbetrieb eine starke Marke? Dann bewerben Sie sich für den ELMAR – den Markenpreis der Elektrobranche. Anmeldeschluss ist der 31. Juli 2016



**ABB**

**B.**  
Berker

**BRUMBERG®**  
Licht seit Generationen

 **BUSCH-JAEGER**



**GIRA**

**:hager**

**JUNG**

 **KAISER**

**Klauke®**

 **MAICO**

 **MENNEKES®**

**merten**  
Schneider Electric

**RITTO**  
by Schneider Electric

**STIEBEL ELTRON**

**STRIEBEL & JOHN**  
EIN UNTERNEHMEN DER ABB-GRUPPE

**theben**  
energy saving comfort

wobei  $I_k^2$  der quadratische Effektivwert der netzfrequenten Komponente des unbeeinflussten Kurzschlussstromes ist.

Die Struktur der Kurzschlusschleife bzw. der Kurzschlussimpedanz mit dem dazugehörigen Kurzschlusswinkel (Winkel zwischen dem Zeiger der treibenden Netzspannung und dem Zeiger des Kurzschlusswechselstromes) und der Zeitpunkt des Kurzschlussentstehens (Einschaltwinkel als Winkel zwischen dem unmittelbar passiertierten Nulldurchgang der treibenden Netzspannung und dem Zeitpunkt des Kurzschlusseintrittes) bestimmen neben dem Kurzschlussstrom und der treibenden Spannung den wahren Verlauf der Zeit-Strom-Kennlinie für die Schaltzeiten  $< 0,1s$ .

Diese zwei Merkmale prägen das Löschingtegral der Sicherung.

Das Schmelzintegral wird als Sicherungskonstante bezeichnet.

## Teilbereichs-HH-Sicherungen und Lastschalter

Wir diskutierten bereits oben die normative Forderung, dass die Sicherung den Transformatoreinschaltstromstößen widerstehen muss, auch wenn sie an der unteren Grenze des erlaubten Toleranzbandes liegt. Eine zweite Forderung an die Sicherung besteht darin, dass zum thermischen Transformatorschutz der primärseitig fließende Kurzschlussstrom beim sekundärseitigen dreipoligen Transformatorklemmenkurzschluss für die zulässige Kurzschlussdauer von 2s festgelegt wird. Die Sicherung muss diesen Fehlerstrom sicher abschalten, auch wenn sie an der oberen Grenze des erlaubten Toleranzbandes liegt. Zum Kurzschlussstrombegrenzenden Schutz der Verteiltransformatoren der Verteilungsnetzbetreiber sowie der Industrie werden Hochspannungslastschalter und strom-

begrenzende Teilbereichs-HH-Sicherungen eingesetzt, die über ein Schlagstiftsystem verknüpft sind.

Das Zusammenwirken des Lastschalters und der Sicherungen regelt die VDE 0671-105. Für die Auswahl des Lastschalters und der Sicherungen ist der Übergangstrom (transfer current) der Lastschalter-Sicherungs-Kombination maßgebend.

Fehlerströme, die größer als der Übergangstrom sind, müssen dreipolig durch die Sicherungen abgeschaltet werden. Bei Fehlerströmen, die kleiner als der Übergangstrom sind, erfolgt die Abschaltung einpolig durch die Sicherung sowie zweipolig durch den Lastschalter. Es geht darum, dass hohe Kurzschlussströme – die in der Regel wegen ihres hohen induktiven Anteils einen niedrigen Verschiebungsfaktor der Grundschwingung aufweisen – bei ihrer Ausschaltung hohe Einschwingspannungen hervorrufen.

Der Lastschalter ist aufgrund der langsamen Verfestigung seiner Isolationsstrecke, nicht für die Abschaltung der Fehlerströme mit schnellen Spannungsanstiegen geeignet. Das bedeutet, der Lastschalter kann hohe Kurzschlussströme nicht beherrschen und muss von denen befreit sein. Die Sicherungen müssen de facto hohe Kurzschlussströme allein ausschalten.

Der Lastschalter und die Sicherungen müssen deswegen aufeinander genau abgestimmt sein. Bei einem dreipoligen Kurzschluss haben die Fehlerströme in einem symmetrischen Drehstromsystem die gleichen Amplituden und die jeweils zueinander verschobenen Phasenlagen.

Aufgrund der Fertigungstoleranzen sind die drei Sicherungen, für die drei Phasen, kennlinienmäßig nicht identisch. Die flinkste der drei Sicherungen schmilzt, löscht und setzt den Schlagstift frei. Der Schlagstift löst den Lastschalter aus.

Abhängig davon, ob die zweitschnellste Sicherung schneller schmilzt, oder der Lastschalter schneller öffnet, wird der auf das mittlerweile  $\sqrt{3}/2$ -fache des ursprünglichen dreipoligen Kurzschlussstromes verminderte Kurzschlussstrom (zweipoliger) entweder durch die zweitschnellste Sicherung, oder durch den Lastschalter allpolig abgeschaltet.

Das im Anhang B der VDE 0671-105 beschriebene Verfahren zur exakten Bestimmung des Übergangstromes der Lastschalter-Sicherungs-Kombination (mathematische Bestimmung von  $\Delta T$ ) ist iterativ und relativ kompliziert.

Der Lastschalterhersteller muss den für die Ermittlung des Übergangstromes erfor-

## WEITERFÜHRENDE LITERATUR

- VDE 0670-4 2010-08 Hochspannungssicherungen – Strombegrenzende Sicherungen
- DIN VDE 0670-402 2014-11 Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Auswahl von strombegrenzenden Sicherungseinsätzen für Transformatorstromkreise
- DIN VDE 0670-301 1999-05 Hochspannungslastschalter – Teil 1 Hochspannungslastschalter für Bemessungsspannungen über 1kV und unter 52kV
- VDE 0671-105 2013-08 Hochspannungsschaltgeräte und –Schaltanlagen – Wechselstrom-Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen für Bemessungsspannungen über 1kV einschließlich 52 kV
- VDE 0102 2002-07 Kurzschlussströme in Drehstromnetzen Berechnung der Ströme
- VDE 0103 1994-11 Kurzschlussströme – Berechnung der Wirkung
- Balzer, G.; Nelles, D.; Tuttas, C.: Kurzschlussstromberechnung nach IEC und DIN EN 60909-0 (VDE 0102) VDE Schriftenreihe Band 77, VDE-Verlag Berlin und Offenbach 2009
- Bessei, H.: Sicherungshandbuch. Starkstromsicherungen – Das Handbuch für Anwender von Niederspannungs- und Hochspannungssicherungen NH/HH-Recycling 2015
- Doemeland, W.: Handbuch Schutztechnik HUSS-Medien 2003
- Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. Technischer Bericht Auswahl und Zusammenwirken von Mittelspannungslastschaltern und HH-Sicherungen in Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen gemäß IEC 60420
- Fricke, H; Vaske, P.: Grundlagen der Elektrotechnik Teil 1 Elektrische Netzwerke B.G. Teubner Stuttgart 1982
- Haas, U.; Wilhelm D.: Sicherer Schutz von Verteiltransformatoren mit Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen, netzpraxis 2005 Heft 3
- Heuck, K.; Dettmann, K.-D.; Schutz, D.: Elektrische Energieversorgung Springer Vieweg Verlag 2013
- Johann, H.: Elektrische Schmelzsicherungen Vorgänge, Eigenschaften, technischer Einsatz Springer-Verlag 1982
- Kasikci, I.: Projektierung von Niederspannungsanlagen Hüthig & Pflaum Verlag 2010
- Kiank, H.; Fruth, W.: Planungsleitfaden für Energieverteilungsanlagen Siemens 2011
- Kny, Karl-Heinz: Schutz bei Kurzschluss in elektrischen Anlagen Planen, Errichten und Prüfen Huss-Medien GmbH 2010
- Müller, A.: Mittelspannungstechnik Schaltgeräte und Schaltanlagen Siemens 2004;
- Müller, A.: Die Koordination von Lastschaltern und HH-Sicherungen bei kurzen Schmelzzeiten netzpraxis 2006 Heft 4
- Pistora, G.: Berechnung von Kurzschlussströmen und Spannungsfällen 2009 VDE-Schriftenreihe 118
- Schlabbach, J.: Kurzschlussstromberechnung VWEW Energieverlag Frankfurt am Main 2003
- Schlabbach, J.: Sternpunktbehandlung VWEW Energieverlag Frankfurt am Main 2002
- Seysen, R.: Verlauf der Stromzeitkennlinie einer Sicherung im Bereich kurzer Schmelzzeiten Conti Elektro Berichte 1960
- Kasikci, I.; Pantenburg, N.: VDE-Seminar »Planung und Projektierung von Elektroanlagen«

derlichen Wert des Bemessungs-Übergangstromes des Lastschalters sowie die Schalteröffnungszeit  $T_0$  dem Planer bzw. dem Errichter zur Verfügung stellen.

Der Sicherungshersteller muss hierfür die Sicherungsschmelzeit-Strom-Kennlinie zur Verfügung stellen.

Zur praktischen Vorgehensweise bei der Abschätzung des tatsächlichen Übergangstromes der Lastschalter-Sicherungs-Kombination, wird in dem Schmelzeit-Strom-Kennliniendiagramm eine horizontale der Abszisse parallel verlaufende Gerade mit dem Wert von  $0,9 \cdot T_0$  eingetragen.

Ihr Schnittpunkt mit der unteren dem Toleranzband entsprechenden Schmelzeit-Strom-Kennlinie ergibt den abgeschätzten Wert des tatsächlichen Übergangstromes.

Da die Sicherungshersteller nur die mittlere Schmelzeit-Strom-Kennlinie zur Verfügung stellen, muss der Planer bzw. der Errichter, entsprechend der doppellogarithmischen Aufteilung, die untere Schmelzeit-Strom-Kennlinie der Sicherung mathematisch selber nachbilden.

Der so abgeschätzte tatsächliche Übergangstrom der Lastschalter-Sicherungs-Kombination muss gemäß der VDE 0671-105 die folgenden zwei Bedingungen erfüllen.

Er muss kleiner als der Bemessungs-Übergangstrom des Lastschalters sein und er muss ebenso kleiner als der primärseitig fließende Kurzschlussstrom bei dem sekundärseitigen dreipoligen Transformatorklemmenkurzschluss sein.

Gemeint sind dabei galvanische Kurzschlüsse ohne Zündung von Lichtbögen.

Da sich die Ermittlung des Übergangstromes der Lastschalter-Sicherungs-Kombination in der Regel im schon erklärten virtuellen Bereich ( $< 0,1s$ ) der Schmelzeit-Strom-Kennlinie abspielt, der nicht dem realen Verlauf der Schmelzeit-Strom-Kennlinie entspricht, wird der so ermittelte Wert des Übergangstromes in diesem Beitrag absichtlich als abgeschätzt genannt.

## Fehlerszenario am Transformator 1

Betrachten wir nun noch einmal den möglichen Fehler am Transformator 1 des Praxisprojektes (Bild 3). Für die Erfüllung der dynamischen bzw. mechanischen Kurzschlussfestigkeit der diesbezüglich kritischen Verbindung zwischen der Erdungsschiene und der PE-Schiene des Sammelschienensystems der NSHV ist hinsichtlich der Lage der fehlerstromdurchflossenen Leiter eine adäquate Befestigung dieser Kabel nötig. Die Verbindung zwischen dem Transformatorgehäuse und der Erdungsschiene stellt sich hinsichtlich der thermischen Belastung am kritischsten dar. Für die Überprüfung bzw. Bemessung der thermischen Kurzschlussfestigkeit ist neben dem

- Effektivwert des Anfangskurzschlusswechselstromes,
- dem thermisch gleichwertigen Kurzzeitstrom,
- dem Leiterquerschnitt,
- der thermisch gleichwertigen Kurzzeitstromdichte,
- der Bemessungskurzzeitstromdichte sowie
- der Bemessungskurzzeit

auch noch die Kurzschlussdauer von entscheidender Bedeutung.

## Nicht quadratisch, aber praktisch und gut



Jörg Veit

### WissensFächer – Informations- und Kommunikationstechnik

2013. 64 Seiten (32 Doppelkarten mit Buchschraube). € 16,95 UVP. ISBN 978-3-8101-0358-1

#### Der WissensFächer zum Thema „Informations- und Kommunikationstechnik“

Aus stabilem, aber flexiblem Material. Geeignet, um schnell etwas nachzuschauen, das man gerade nicht griffbereit hat. Passt wunderbar in Hosen- oder Werkzeugtaschen und kann so immer mitgenommen und überall benutzt werden.

#### Der WissensFächer enthält wichtige Tabellen und Abbildungen zu den Themen:

- TAE-Anschluss,
- ISDN-Installationstechnik,
- Strukturierte Verkabelung,
- Messen in Datennetzen,
- WLAN-Netze,
- u.v.m.



erfolgsmedien für experten

Hüthig GmbH  
Im Weiher 10  
D-69121 Heidelberg  
Tel.: +49 (0) 800 2183-333

#### Ihre Bestellmöglichkeiten

- Fax: +49 (0) 89 2183-7620
- E-Mail: buchservice@huehig.de
- www.elektro.net/shop



Hier  
Ihr Fachbuch  
direkt online  
bestellen!

Die Kurzschlussdauer für den vom Transformator 2 stammenden Anteil des Fehlerstromes kann entsprechend der Einstellung und der Gesamtausschaltzeit der beiden Niederspannungstransformatoreinspeisungsschalter (siehe NS-LS aus den Bildern 2 und 3) ermittelt werden. Die Gesamtausschaltzeit dieser beiden Leistungsschalter ist die Summe aus der jeweiligen Schalteransprechzeit, der jeweiligen Schaltereigenzeit, der jeweiligen Verzögerungszeit bzw. der jeweiligen Staffelzeit und der jeweiligen Lichtbogendauer. Durch eine geeignete fachgerechte Einstellung ihrer Überstromauslösungssysteme können die beiden Leistungsschalter den vom Transformator 2 stammenden Anteil des Fehlerstromes problemlos bzw. ordnungsgemäß ausschalten.

Um bei so einem Fehler-Selektivität zu erreichen – d. h., dass dabei nicht die beiden Transformatoren abgeschaltet werden –, müssen die Überstromauslösesysteme der beiden Leistungsschalter neben den üblichen Schutzfunktionen zusätzlich noch die Richtungsentscheidung übernehmen. In der Praxis ist diese Funktionalität i. d. R. in der NS-Ebene eher selten gegeben.

Die Kurzschlussdauer für den vom Transformator 1 stammenden Anteil des Fehlerstromes wird vom Ansprech- bzw. Auslöseverhalten der Teilbereichs-HH-Sicherung bestimmt. Die Teilbereichs-HH-Sicherungen verfügen über ein definiertes Ansprech- bzw. Auslöseverhalten, bei dem sie schmelzen und löschen bzw. den Schlagstift aktivieren. Dieses passiert erst ab einem Vielfachen ihres Bemessungsstromes – d. h. dem Bemessungsmindestausschaltstrom. Alle Überströme, die kleiner als der Bemessungsmindestausschaltstrom und größer als der Bemessungsstrom sind, gehören dem sogenannten verbotenen Bereich an.

## Der Weg zur richtigen Sicherung

Der primärseitig fließende Kurzschlussstrom bei einem sekundärseitigen zweipoligen Kurzschluss (bei Transformatoren der Schaltungsgruppe Dyn5) weist in einem Außenleiter die gleiche Amplitude auf, wie bei einem sekundärseitigen dreipoligen Kurzschluss. Hierbei betragen die Amplituden in den anderen zwei Außenleitern nur die Hälfte davon, so dass solche Fehler unproblematisch und leicht durch die Auslösung der Sicherung in dem Außenleiter mit der höheren Amplitude geklärt werden können.

Kommt es in dem hier diskutierten Praxisprojekt zu drei- und zweipoligen Fehlern

auf der Sekundärseite des Transformators, so ergeben sich auf der Primärseite des Transformators entsprechende Fehlerströme, die problemlos von den vorhandenen Teilbereichs-HH-Sicherungen erfasst und abgeschaltet werden können. Es ergeben sich aber hinsichtlich der Transformatorschaltungsgruppe Dyn5 bei einpoligen Fehlern auf der Sekundärseite des Transformators entsprechende kritische Fehlerströme auf der Primärseite des Transformators, die im genannten verbotenen Bereich der vorhandenen Teilbereichs-HH-Sicherungen liegen.

Die vorhandenen Teilbereichs-HH-Sicherungen waren im diskutierten Praxisprojekt mit der temperaturbegrenzenden Funktion ausgestattet, welche ja dazu dient, dass die Sicherung nicht thermisch überlastet wird. Sie soll konkret verhindern, dass sich die Sicherung nicht überhitzt und der Sicherungskörper nicht zerplatzt. Bei einer Übertemperatur im Inneren der Sicherung, die auch durch Fehlerströme aus dem verbotenen Bereich hervorgerufen werden kann, wird der Schlagstift freigesetzt. Er löst dann den Lastschalter in der Lastschalter-Sicherungs-Kombination aus, welcher dann wiederum die dreiphasige Abschaltung vornimmt und den Transformatorabgang vom Netz trennt. Die vorhandene Lastschalter-Teilbereichs-HH-Sicherungs-Kombination wird mit Sicherheit so einen Fehler am Transformator 1 abschalten.

Es ist praktisch jedoch schwierig, die Dauer dieser Abschaltung zu ermitteln, die das Resultat der Wirkung der temperaturbegrenzenden Funktion der Sicherung darstellt. Manche Sicherungshersteller geben hierzu auf Anfrage Auskunft. Andere stellen erweiterte Zeit-Strom-Kennlinien zur Verfügung, welche die Wirkung dieser temperaturbegrenzenden Funktion enthalten. In der Praxis sind Abweichungen davon möglich und es gibt einen kleinen Bereich, der in diesen Kennlinien nicht erfasst werden kann.

Die Abschaltung durch die Wirkung der temperaturbegrenzenden Funktion hängt neben der Höhe des Stromflusses, der Umgebungstemperatur der Sicherung, auch noch von der Lage der Sicherung ab. Eine exakte Aussage über die Fehlerdauer ist schwierig zu treffen. Somit ist auch eine Überprüfung oder Festlegung der thermischen Kurzschlussfestigkeit der am Anfang des Beitrages genannten Verbindung aus dem Praxisprojekt schwierig.

Ein eventueller Austausch der Sicherung ist nicht ganz einfach. Denn eine andere Sicherung, welche die vorhandene Sicherung

ersetzen soll, muss z. B. auch die Prüfungen nach VDE 0671-105 absolviert haben, damit sie sich mit dem vorhandenen Lastschalter kombinieren lassen darf. So eine unangenehme Situation wie diese muss aber nicht eintreten. Sie kann im Vorfeld durch fachmännische Planung und Errichtung vermieden werden.

## Fazit

Es empfiehlt sich also in der Planungsphase die kleinsten Kurzschlussbelastungen aller einpoligen Fehler auf der Transformatorsekundärseite zu ermitteln. Auch die, die sich aufgrund der Netzkonfiguration nur »von Hand« berechnen lassen. Anhand dieser kritischen Kurzschlussbelastungen kann dann ein adäquater Teilbereichs-HH-Sicherungseinsatz ausgewählt werden. Dieser soll alle aufgeführten Merkmale erfüllen und zugleich einen Bemessungsmindestausschaltstrom aufweisen, der kleiner als die genannten kritischen Kurzschlussbelastungen ist.

Eine mit Fachkenntnis ausgewählte Transformatorinnenimpedanz bzw. günstig ausgewähltes NS-Leitungsnetz können die Fehlerströme bei einpoligen Kurzschlüssen auf der Transformatorsekundärseite günstig beeinflussen. So lässt sich erreichen, dass die Stromstärken dieser Fehlerströme oberhalb des verbotenen Bereiches der Teilbereichs-HH-Sicherungen liegen.

Es gibt eine weitere Alternative: Sie kann angewendet werden, wenn im Netz aufgrund kleiner Anfangskurzschlusswechselstromleistung der MS-Einspeisung, der großen Nullimpedanzen der NS-Kabel und vor allem der großen Transformatormit- und Transformatornullimpedanz extrem niedrige Fehlerströme zu erwarten sind. In diesen Fällen können immer noch Vielbereichs- bzw. Ganzbereichs-HH-Sicherungen verwendet werden.

(Ende des Beitrags)



[www.efen.com](http://www.efen.com)

[www.siba.de](http://www.siba.de)

[www.jeanmueller.de](http://www.jeanmueller.de)

[www.siemens.de](http://www.siemens.de)

## AUTOR

**Dragan Sofic**

EAB GmbH Rhein Main, Dietzenbach