

Stromkreisnachrüstung an bestehenden Hauptverteilungen

Unterlassene Kurzschlussstromberechnung kann zu Schäden führen

Dragan Sofic

Bei der Nachrüstung von Stromkreisen in industriellen elektrischen Anlagen oder elektrischen Anlagen in Verwaltungsgebäuden, welche an die Hauptverteilungen angeschlossen werden, unterlassen Planer oder Errichter in der Praxis nicht selten eine Netz- bzw. Kurzschlussstromberechnung. Dabei wäre die Kenntnis der Kurzschlussströme nicht nur sinnvoll, sondern auch wichtig für die Sicherheit der Anlage im Betrieb.

Das trifft zum Beispiel für Schaltstromkreise zu, bei denen der Bemessungsstrom der einzusetzenden Überstromschutzeinrichtung bezüglich der Größe der zu erwartenden Einschalt- bzw. Anlaufströme höher ausgewählt werden muss. Ebenso auch bei langen Zuleitungen zu Unterverteilungen für größere Leistungen, die mit NH-Schmelzsicherungen abgesichert werden.

Abschaltbedingung beachten

In solchen Fällen kann die Einhaltung der erforderlichen Abschaltbedingungen kritisch werden, wenn man die kleinsten Kurzschlussströme nicht kennt. Hier helfen die sogenannten Erfahrungswerte aus der Vergangenheit nicht wirklich weiter. Auch eine messtechnische Herangehensweise bei der Auslegung dieser Stromkreise ist nicht sinnvoll, weil sie in der Regel in solchen Fällen keine verwertbaren Messergebnisse liefert.

Das Problem besteht darin, dass bei Kurzschlüssen am Ende von langen Zuleitungen Fehlerströme entstehen können, die nicht in der gemäß DIN VDE 0100 Teil 410 geforderten Zeit abge-

schaltet werden. Die Ursache hierfür liegt in der falschen Abstimmung zwischen der Schmelzsicherung und dem Leiterquerschnitt: Schmelzsicherungen weisen bei kleineren Kurzschlussströmen lange Ausschaltzeiten auf. Bei hohen Kurzschlussströmen (z. B. $I_k = 15 \cdot I_{TSI}$) hingegen zeigen die Schmelzsicherungen ihre bekannte strombegrenzende Wirkung.

Analyse einer falschen Planung

Zur Veranschaulichung dieser Problematik hier das Praxisbeispiel einer falschen Planung der Zuleitung für eine Unterverteilung einer industriellen Anlage mit einer höheren Betriebsfrequenz. Hier spielt der Spannungsabfall auf der Zuleitung eine untergeordnete Rolle. Ausgehend von der bestehenden NSHV-AV wurde eine Zuleitung für eine 400-Hz-Anlage geplant (Bild).

Als Stromkreisabsicherung wählte der Planer eine NH3-Schmelzsicherung mit dem Bemessungsstrom von 500 A/gG und als Zuleitung zwei Kabel NYCWY 4x150/70. Die Stromkreislänge beträgt 285 m. Die nachträglich durchgeführte Netz- bzw. Kurzschlussstromberechnung führte zu folgendem Ergebnis: Der kleinste einpolige Kurzschlussstrom am Ende der Zuleitung beträgt 2,905 kA. Aus der Ausschaltzeitstromkennlinie (der oberen Grenzkurve) des Zeit-Strom-Bereichs der NH-500A/gG-Sicherung lässt sich nach DIN VDE 0636 Teil 201 entnehmen, dass die Ausschaltzeit bzw. die Kurzschlussdauer bis zu 14 s betragen kann. Somit ist die Abschaltbedingung von 5 s gemäß DIN VDE 0100 Teil 410 für diesen Verteilungsstromkreis definitiv nicht gewährleistet.

Hinzu kommt, dass Kurzschlüsse generell maximal 5 s andauern dürfen. Die Materialbeiwerte bzw. Bemessungskurzzeitstromdichten der Leitungen und Kabel bzw. deren Isolierstoffe sind nicht für Abschaltzeiten über 5 s ausgelegt. Es gibt hier jetzt zwei mögliche Lösungen des Problems:

- **Lösung 1:** Die Herabsetzung des Bemessungsstromes der Sicherung auf 400 A/gG. Dies funktioniert aber nur, wenn die 400-A/gG-Sicherung bei der

Übertragung der benötigten Leistung und bei Einschaltströmen nicht anspricht. Ist dies nicht gewährleistet, muss eine neue Kabelanlage mit größerem Leiterquerschnitt 2x (NYC-WY 4x185/95) ausgewählt werden.

- **Lösung 2:** Man setze anstelle der NH-Schmelzsicherung einen Leistungsschalter mit dem Bemessungsstrom von 500 A ein, welcher durch die geeignete Einstellung seines Kurzschlussstromauslösers die geforderte Abschaltung ohne Probleme sicherstellen kann.

Fehlerquellen bei der Schleifenwiderstandsmessung

Bei der Ausführung bzw. Nachrüstung der genannten Stromkreise lässt sich in den meisten Fällen nicht die Impedanz des vorgelagerten Netzes messtechnisch genau erfassen. Das ist in der Regel dann der Fall, wenn man die Messung am Ende von Zuleitungen durchführt, welche einen Leiterquerschnitt $>10 \text{ mm}^2$ Kupfer aufweisen.

Den Blindwiderstandanteil der Schleifenimpedanz kann man in diesen Fällen nicht vernachlässigen. Eine Schleifenimpedanzmessung würde somit in diesen Fällen falsche Messergebnisse liefern. Diese Fehler führen dazu, dass die gemessene bzw. angezeigte Schleifenimpedanz (Kurzschlussimpedanz) kleiner als die tatsächliche Schleifenimpedanz ist. Dadurch ist auch der gemessene bzw. angezeigte Kurzschlussstrom größer als der tatsächliche Kurzschlussstrom. Dies kann beim messtechnischen Nachweis des Schutzes gegen gefährliche Körperströme durch automatische Abschaltung der Stromversorgungen nach DIN VDE 0100 Teil 410 zu falschen Schlussfolgerungen führen.

Hintergrundwissen

In der Praxis ermitteln Fachleute innerhalb bestehender Niederspannungsnetzen die Kurzschlussströme am häufigsten durch entsprechende Messungen. Die Schleifenwiderstandsmessung hat sich als das Messverfahren mit den wenigsten

Dragan Sofic, EAB GmbH Rhein Main, Neu-Isenburg

Nachteilen für die Praxis durchgesetzt. Man verwendet hierfür Schleifenwiderstands-Messgeräte nach DIN VDE 0413 Teil 3. Der nach der Norm gültige maximal zulässige Gebrauchsfehler beträgt $\pm 30\%$. Die Hersteller bieten mittlerweile Messgeräte mit einem Gebrauchsfehler im einstelligen Prozentbereich an.

Ungeachtet dessen bleiben aber leider weitere Fehlerquellen bzw. Schwächen der Messgeräte bei der Messung bestehen. Diese Tatsache trägt maßgebend dazu bei, dass Messungen immer noch die ungenaueste Methode zur Ermittlung der Kurzschlussströme darstellen.

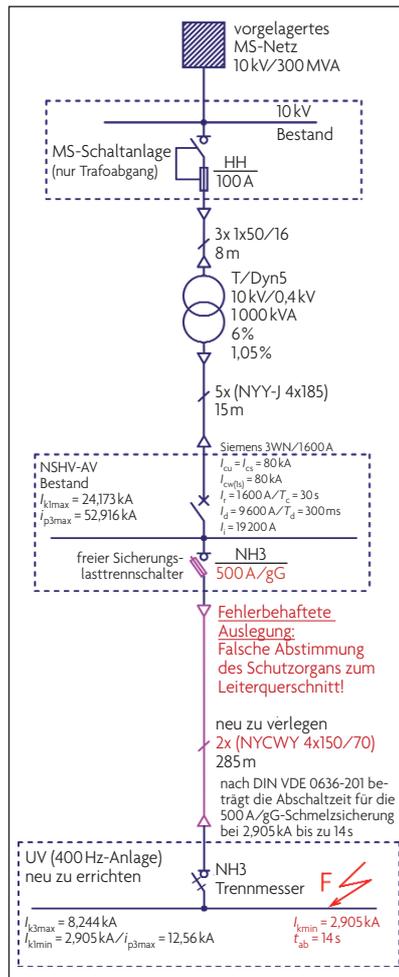
Betriebsarten lassen sich nicht herstellen

Für die Dauer der Messung sollen die für die Messung in der elektrischen Nähe der NSHV erforderlichen Netzbetriebsarten (Einzelbetrieb des Transformators, Parallelbetrieb mehrerer Transformatoren, Ringversorgungsart etc.) hergestellt werden – je nachdem, ob die größten oder die kleinsten Kurzschlussströme gemessen werden. Dies lässt sich in der Praxis häufig nicht realisieren.

Spannungsfall des Prüfstroms ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung

Bei der Messung wird ein zeitlich begrenzter Prüfstrom aufgeschaltet. Dieser Prüfstrom ruft an der Impedanz der Schleife einen entsprechenden Spannungsfall hervor, welcher gemessen wird. Das Messgerät berechnet dann aus dem Quotienten Spannungsfall zu Prüfstrom die Schleifenimpedanz und somit auch den Kurzschlussstrom. Die meisten Schleifenwiderstandsmessgeräte messen aber nur den Spannungsfall und erfassen nicht die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom – der Impedanzwinkel der Schleife findet hier dann keine Berücksichtigung. Somit wird der Blindwiderstand (die Reaktanz) der Kurzschluss Schleife nicht ermittelt. Man sollte aber den Blindwiderstand für Leitungen und Kabel ab Leiterquerschnitten von 16 mm^2 Kupfer ermitteln.

Da die Verteilungen elektrischer Anlagen von industriellen Anlagen und von z.B. Verwaltungsgebäuden in der Regel über Kabel mit größeren Leiterquerschnitten eingespeist werden, liefern Schleifenwiderstandsmessungen an den Sammelschienensystemen dieser Verteilungen Messergebnisse, welche der Planer nicht verwenden sollte. Geräte für Messungen in der Nähe der NSHV gibt es zwar, sie sind aber



Falsche Planung eines NSHV-AV-Abgangstromkreises (einpolige Darstellung)

sowohl sehr teuer als auch wegen ihrer Größe unhandlich.

Temperaturabhängigkeit der Schleifenimpedanz

Die Schleifenimpedanz bzw. der Kurzschlussstrom hängen von der zum Zeitpunkt der Messung anstehenden Spannung sowie der Leitertemperatur ab. Das Messergebnis stellt also einen Augenblickswert dar. Zur Bestimmung der größten und der kleinsten Kurzschlussströme ist eine Umrechnung auf maximale und minimale Spannung und maximale und minimale Leitertemperatur erforderlich.

Nach DIN VDE 0102 ergeben sich in Niederspannungsnetzen die größten Kurzschlussströme bei $1,05 \cdot U_n$ ($U_n = 400\text{ V}/230\text{ V}$) und bei einer Leitertemperatur von 20°C und die kleinsten Kurzschlussströme bei $0,95 \cdot U_n$ und bei einer Leitertemperatur von 80°C oder bei länger eingestellten bzw. länger zulässigen Abschaltzeiten sogar bei einer Leitertemperatur von 160°C . Dadurch werden unter anderem die Leitertemperatur

und die Spannungsschwankungen im Netz berücksichtigt.

Messungen nicht für generatornahe Kurzschlüsse

Für generatornahe Kurzschlüsse lassen sich leider keine Schleifenwiderstände messen. Mit generatornahen Kurzschlüssen ist z.B. in Niederspannungs-Notstromnetzen im Generatorinselbetrieb bzw. in Blockheizkraftwerken (BHKW) zu rechnen. Ein anderer Fall wäre das Vorhandensein größerer motorischer Lasten im Niederspannungsnetz.

Sämtliche Schleifenwiderstandsmessgeräte sind nicht in der Lage, die Höhe und die Einwirkdauer des Prüfstroms bei der Messung so zu generieren, dass im Generator entsprechende Ausgleichsvorgänge – wie sie bei einem Kurzschluss in der Realität auftreten – ablaufen. Im Falle motorischer Lasten müssten sie einen so großen Spannungseinbruch hervorrufen, dass die Motoren aus dem motorischen in den generatorischen Betrieb übergehen.

Kurzschlussströme elektronischer Quellen

Schleifenwiderstandsmessgeräte können leider auch nicht Kurzschlussströme erfassen, welche aus elektronischen Quellen gespeist werden. Gemeint sind Kurzschlüsse, welche in USV- bzw. ZSV-Netzen während des Wechselrichterbetriebs mit Speisung aus der Batterie auftreten.

Daraus folgt eindeutig, dass Schleifenwiderstandsmessungen nur für generatorferne Kurzschlüsse in Endstromkreisen korrekte bzw. verwertbare Messergebnisse erbringen können. Bei Kurzschlüssen in diesen Stromkreisen herrschen innerhalb der Kurzschlussbahn die Wirkwiderstände vor. Damit ist der durch die Vernachlässigung des Blindwiderstandes entstandene Messfehler vertretbar.

Schlussfolgerungen für die Praxis

In der Praxis empfiehlt es sich, auch für Fälle mit kleinen Leiterquerschnitten, eine Korrektur der Messergebnisse vorzunehmen, wenn die Messergebnisse zum messtechnischen Nachweis der Einhaltung der Abschaltbedingungen dienen sollen. Der Korrekturfaktor, mit welchem der Messende die angezeigte Schleifenimpedanz multipliziert bzw. den angezeigten Kurzschlussstrom dividiert, sollte dabei aus Sicherheitsgründen $1,5$ betragen.

BUCHTIPP ZUM THEMA

Herbert Schmolke
Auswahl und Bemessung von Kabeln und Leitungen



2., neu bearb. und erw. Auflage 2007
ca. 120 Seiten, mit zahlr. Abb.

Taschenbuchformat; ca. 18,- EUR
ISBN 978-3-8101-0263-8; Hüthig & Pflaum Verlag; Erscheint im September 2007.

Mit diesem Buch in nunmehr 2. Auflage liegt ein Leitfaden vor, der eine fach- und normengerechte Anleitung zur Auswahl von Kabeln und Leitungen und zu deren Berechnung gibt. Das Buch ermöglicht dem Lernenden ein tiefes Verständnis der Zusammenhänge und gibt ihm eine konzentrierte Zusammenfassung aller zu beachtenden Fakten. Der gestandene Elektrofachmann dagegen kann anhand dieses Leitfadens überprüfen, ob seine Entscheidungen auch immer gerichtsfest sind und er konsequent alle Vorgaben berücksichtigt. Dem Buch beigelegt sind vier interaktive Tabellen, mit denen die meisten der behandelten Berechnungen sehr zeitsparend ausgeführt werden können. Die seit Erscheinen der 1. Auflage entstandenen Änderungen in Gesetzen und Normen wurden sorgfältig eingearbeitet. Mehr zum Inhalt erfahren Sie unter www.online-de.de

Zu bestellen beim Hüthig & Pflaum Verlag, Tel. (0 62 21) 48 95 55, Fax (0 62 21) 48 94 10, Mail: de-buchservice@de-online.info

Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass die Vernachlässigung des Blindwiderstandes von Kabeln und Leitungen ab einem Leiterquerschnitt von 35 mm² Cu bei der Ermittlung des Spannungsabfalls zu groben Fehlern führt. Manche Kabelhersteller bieten zur Berechnung des Spannungsabfalls und zur Bestimmung des Leiterquerschnitts kostenlose Berechnungsprogramme an, welche diesen Sachverhalt leider nicht berücksichtigen. Besonders kritisch wäre dies bei Freileitungen, welche wesentlich größere Blindwiderstände aufweisen.

Aus den genannten Gründen ist bei der Auslegung der beschriebenen nachzurüstenden Stromkreise unbedingt eine nach DIN VDE 0102 Kurzschlussstromberechnung zu erstellen. Die Berechnungsergebnisse (Werte der minimalen und maximalen Kurzschlussströme) sind sehr genau. Sie werden im Wesentlichen

von der Genauigkeit der ermittelten Kabellängen beeinflusst. Nur dann ist der Planer in der Lage, anhand der berechneten Kurzschlussimpedanz des vorgelagerten Netzes an dem Sammelschienensystem der Hauptverteilung eine Abstimmung der einzusetzenden Überstromschutzvorrichtung und des Leiterquerschnitts sicher vorzunehmen.

Dabei muss natürlich generell für den auszuführenden Stromkreis Folgendes berücksichtigt werden:

- die über den Stromkreis zu übertragende Wirkleistung,
- der Leistungsfaktor,
- der zu erwartende Einschalt- bzw. Anlaufstrom,
- die Stromkreis-Kabellänge,
- die zulässige Strombelastbarkeit des Kabels nach DIN VDE 0298 bzw. DIN VDE 0276,
- der Kabelschutz bei Überlast nach DIN VDE 0100 Teil 430,
- der Kabelschutz bei Kurzschluss nach DIN VDE 0100 Teil 430 bzw. DIN VDE 0103,
- der Spannungsabfall auf dem Kabel nach DIN VDE 0100 Teil 520, wobei der kumulierte Spannungsabfall zwischen dem Anfang der Verbraucheranlage und dem Betriebsmittel die geforderten 4 % nicht überschreiten soll,
- der Schutz bei indirektem Berühren durch automatische Abschaltung der Stromversorgung nach DIN VDE 0100 Teil 410,
- die Selektivität, falls in den VDE-Bestimmungen gefordert oder vom Betreiber gewünscht ist.

Die Überprüfung der Erfüllung des Schutzes des Kabels bei Überlast nach DIN VDE 0100 Teil 430 erfolgt nach den Beziehungen:

$$I_b \leq I_r \leq I_z$$

(Erfüllung der Bemessungsstromregel)

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_z$$

(Erfüllung der Auslöseregel).

Hierbei bedeuten:

- I_b – der zu erwartende Betriebsstrom des Stromkreises,
- I_r – der Bemessungsstrom bzw. der Einstellstrom der Überstromschutzvorrichtung,
- I_z – die nach der Berücksichtigung aller Umrechnungsfaktoren (Verlegeart, Leitungshäufung, Umgebungstemperatur etc.) ermittelte zulässige Strombelastbarkeit des Kabels (nach DIN VDE 0498 bzw. DIN VDE 0276),
- I_2 – großer Prüfstrom (Auslösestrom) der Überstromschutzvorrichtung.

Ist der Schutz bei Überlast gegeben und befindet sich die Überstromschutz-

einrichtung am Anfang des Stromkreises, so lässt sich auch der Kurzschlusschutz des Kabels gewährleisten. Als Voraussetzung hierfür gilt, dass die Überstromschutzvorrichtung über ein Bemessungskurzschlussausschaltvermögen verfügt, welches eine sichere Abschaltung des an ihrem Einbauort größten unbeeinflussten Kurzschlussstromes garantiert. Die folgende Ungleichung muss erfüllt sein:

$$I^2 \cdot T_{\max} < (S_{\text{thr}} \cdot A)^2 \cdot 1s,$$

mit:

- $\int_0^{T_{\max}} I_{\text{km}}^2 dt = I^2 \cdot T_{\max}$

- maximaler Wert der spezifischen Durchlassenergie der Überstromschutzvorrichtung im Kurzschlussfall (Joulesches Integral),
- $(S_{\text{thr}} \cdot A)^2 \cdot 1s$ – spezifische Grenzbelastungsenergie des Kabels im Kurzschlussfall,
- S_{thr} – die Bemessungs-Kurzzeitstromdichte des Kabels,
- A – der Leiterquerschnitt des Kabels.

Zur Überprüfung der Einhaltung der erforderlichen Abschaltbedingungen zieht man den kleinsten zu erwartenden Kurzschlussstrom am Kabelende heran.

Stellt die Überstromschutzvorrichtung eine Schmelzsicherung dar, so ermittelt der Planer die Abschaltzeit anhand des berechneten kleinsten Kurzschlussstroms sowie des nach DIN VDE 0636 festgelegten Zeit-Strom-Bereiches des Bemessungsstroms vom Sicherungseinsatz. Diese Abschaltzeit vergleicht er dann mit der nach DIN VDE 0100 Teil 410 geforderten. Dabei verwendet man aus Sicherheitsgründen die obere Hüllkurve (sogenannte Ausschalt-Zeitstromkennlinie). Bei der Absicherung des Stromkreises durch einen Leistungsschalter nach DIN VDE 0660 Teil 101 muss man die zulässigen Toleranzen des Überstromauslösers (Auslöse-diagramme) des Leistungsschalters von +/- 20 % unbedingt beachten.

Fazit

Die geschilderte Herangehensweise garantiert, dass bei Kurzschlüssen, der Abschaltstrom der Überstromschutzvorrichtung deutlich überschritten wird, und somit die Überstromschutzvorrichtung sicher zum Ansprechen bzw. zur Abschaltung in der nach der Norm erforderlichen Abschaltzeit gebracht wird. ■