

AUF EINEN BLICK

Die Ermittlung des Schleifenwiderstands ist von erheblicher Bedeutung für die Berechnung des einpoligen minimalen Kurzschlussstroms und des Spannungsfalls. Hier gilt es unterschiedliche Ansätze in den Normen zu berücksichtigen. Eine Anfrage im Rahmen der Rubrik Praxisprobleme veranlasste den Autor, dieses Thema näher zu betrachten.

Rechnerische Ermittlung des Schleifenwiderstands

Berücksichtigung der Leitertemperatur

Unser Leser R. V. aus Baden-Württemberg wendete sich mit einer Fragestellung zum Thema »Einfluss der Leitertemperatur bei der Berechnung des einpoligen minimalen Kurzschlussstromes und des Spannungsfalls« an die Redaktion »de«.

Die Fragestellung von R.V. aus Baden-Württemberg lautet zusammengefasst: »Besonders bei kleineren Querschnitten bis ca. 35mm² ist der ohmsche Widerstand nahezu alleine für diese Berechnungen verantwortlich. Und dieser Widerstand ist temperaturabhängig. Bei Berechnungen des Schleifenwiderstands wird dies unterschiedlich gehandhabt und verschiedene Leitertemperaturen zugrunde gelegt. Autoren von Fachberichten und Fachbüchern rechnen mit einer Bandbreite der Temperaturen von 20°C ... 160°C. Die Ergebnisse fallen daher sehr unterschiedlich aus.

Bei der Umrechnung von Messwerten – also der Berücksichtigung des Messfehlers und dem Einfluss der Temperatur – fallen die Ergebnisse ebenso unterschiedlich aus. Es kommt somit zu Abweichungen bei den errechneten Ergebnissen, die nach meiner Überprüfung bis zu mehr als 50% voneinander differieren.

Wegen dieser unterschiedlichen Betrachtungsweisen habe ich die VDE-Vorschriften studiert. Ich las unter anderem folgende Normen: DIN VDE 0250-204, DIN VDE 0413-3:77-07, DIN VDE 0102 Teil 2, DIN VDE 0100 Teil 600:2008-06, DIN VDE 0100-520:2003-06, DIN VDE 0100-520 Beiblatt 2:2002-11 und DIN VDE 0100-410:2007-06. Die Vorgaben widersprechen sich m.E. und tragen nicht zur Klärung meiner Fragen bei. Daher an Sie nun folgende Fragen:

Bei welcher Leitertemperatur sind sowohl der Spannungsfall als auch der minimale einpolige Kurzschlussstrom zu berechnen?

Mit welchem Faktor ist der gemessene einpolige Kurzschlussstrom zu korrigieren bzw. umzurechnen?«

Differenzierte Antwort

Zur Beantwortung sollen zwei Überlegungen angestellt werden, die zei-

gen sollen, warum es derartig unterschiedliche Meinungen zu einer an sich überschaubaren Fragestellung geben kann.

Spielraum bei nicht eindeutigen Regelungen

Verschiedene Meinungen zu einer Fragestellung entstehen u.a. dann, wenn die Einstellung derjenigen, die diese Frage aufgreifen, unterschiedlich ist. Sofern nämlich keine eindeutigen Regelungen zu einer Sachlage existieren, bleibt unweigerlich ein gewisser Spielraum für die konkrete Festlegung des Umfangs der vorzusehenden Maßnahmen.

Einige neigen dazu, eine ökonomisch sinnvolle Lösung zu suchen, bei der das Risiko noch in einem vertretbaren Rahmen bleibt. So kommt es vor, dass man Berechnungen vereinfacht und einzusetzende Faktoren oder Parameter so wählt, dass die Mehrzahl der erwarteten Fälle dadurch noch genügend sicher abgedeckt werden.

Andere legen sich gerne auf die »sichere Seite« und favorisieren eher Maximalforderungen. Bei dieser Betrachtungsweise wird stets der schlimmste Fall vorausgesetzt, der eintreten könnte. Diese Überlegung kann unter Umständen durchaus hilfreich sein, weil sie klare und eindeutige Regelungen schafft und dabei ebenso eindeutige Grenzen setzt. Vielfach werden jedoch durch eine solche Vorgehensweise unzumutbare Einschränkungen oder unverhältnismäßig hohe Kosten verursacht.

Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Wenn man ein Auto so sicher machen würde, dass die Insassen bei jedem denkbaren Unfall unbeschadet davorkommen, könnte das fatale Folgen haben. Möglicherweise wäre dieses Auto so teuer, dass es niemand kaufen kann. Davon hätte weder der Hersteller

noch der potenzielle Käufer etwas. Vielleicht wäre das Fahrzeug auch so extrem schwer und unbeweglich, dass dadurch ein unerträglich hoher Energieverbrauch verursacht wird. Oder die Leistung dieses Fahrzeugs wäre derart ungenügend, dass sich niemand dafür interessierte.

Jeder weiß, dass es keine hundertprozentige Sicherheit gibt, deshalb muss man sinnvolle Kompromisse finden, bei denen sowohl die Sicherheit als auch das ökonomische Vertretbare berücksichtigt wird. Die Frage ist aber: Wo setzt man zwischen den Extremen die Grenze? Dies ist eine spannende Frage, die immer wieder neu beantwortet werden muss.

Grund für nicht eindeutige Regelungen

Es kann viele Gründe für eine nicht eindeutige Regelung geben. Beispielsweise kann es sein, dass man den Spielraum des Herstellers von Geräten oder des Planers einer elektrischen Anlage nicht beschneiden will. Der Grund kann in der Tatsache begründet sein, dass die konkrete Gefährdung sehr unterschiedlich ausfällt. Eine starre Regelung kann somit entweder für viele Anwendungsfälle viel zu überzogen oder für andere Anwendungsfälle viel zu lasch ausgelegt sein. In solchen Fällen muss der Hersteller bzw. der Planer die genauen Anforderungen für den konkreten Fall selbst festlegen. Im Schadenfall muss er selbstverständlich nachweisen, dass er mit dieser Freiheit verantwortungsvoll umgegangen ist.

Ein weiterer Grund für eine nicht eindeutige Regelung soll noch erwähnt werden: Es geht dabei um die Tatsache, dass unter Umständen im konkreten Fall gar keine eindeutige Regelung möglich ist. Bei unserer Fragestellung besteht das Problem z.B.

darin, dass man gar nicht genau sagen kann, welche Temperatur im Kurzschlussfall realistischerweise anzusetzen ist.

Es könnten noch weitere Gründe genannt werden. Aber um sich besser auf die Fragestellung konzentrieren zu können, wollen wir es an dieser Stelle bei den genannten Gründe belassen.

Kurzschlussberechnung nach Norm

Die Vorgaben zu einer geeigneten, normgerechten Kurzschlussberechnung sind in DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07 zu finden. Dort wird z. B. im Abschnitt 2.4 festgelegt, dass bei der Berechnung des größten Kurzschlussstroms eine Leitertemperatur von 20°C anzusetzen ist. Hier ist die Regelung also klar und unzweideutig. Bei der Berechnung des kleinsten Kurzschlussstroms wird in Abschnitt 2.5 jedoch Folgendes gesagt: »Die Widerstände von Leitungen (Freileitungen und Kabel, Leiter und Neutralleiter) sind bei einer höheren Temperatur einzuführen«. Mit Widerstand ist der ohmsche Widerstand gemeint. Wie hoch die Temperatur anzusetzen ist, wird durch folgenden mathematischen Zusammenhang erläutert, der gleich unter dem zuvor angegebenen Text zu finden ist:

$$R_L = [1 + \alpha(\vartheta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20}$$

Mit R_L ist der warme und mit R_{L20} der kalte Widerstand der beteiligten Leiter gemeint. Nach dieser Formel beeinflusst die Temperatur ϑ_e die Höhe des anzusetzenden Leiterwiderstands R_L und somit die Höhe des kleinsten Kurzschlussstroms. Diese Temperatur ϑ_e wird in der Norm als Leitertemperatur in °C am Ende der Kurzschlussdauer beschrieben.

Temperatur nach Kurzschluss

Die Frage ist also: Wie hoch ist die Temperatur am Ende der Kurzschlussdauer? Hier tauchen mehrere Fragen gleichzeitig auf:

- a) Der kleinste Kurzschluss ist in Niederspannungsanlagen der einpolige Kurzschluss. Gibt es eine festgelegte Abschaltzeit für den einpoligen Kurzschluss?
- b) Welche Leitungsabschnitte innerhalb des fehlerhaften Stromkreises müssen eigentlich auf die erhöhte Temperatur umgerechnet werden?
- c) Stimmt es eigentlich, dass die Abschaltung nur bei Berücksichtigung der Kurzschluss-Endtemperatur sicher berechnet werden kann?
- d) Gilt diese Überlegung auch dann, wenn zwangsläufig aus anderen Gründen in einer kürzeren Zeit (z. B. in 0,4s) abgeschaltet werden muss.

Bei der Frage a) muss beim TN-System unterschieden werden, ob der Kurzschluss

- zwischen einem Außenleiter und dem Schutzleiter (oder einem mit dem Schutzleiter verbundenen Körper eines Betriebsmittels) oder
- zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter stattfindet. Im ersten Fall handelt es sich um einen Schluss, der nach VDE 0100-410 in einer Zeit abgeschaltet werden muss, die in Tabelle 41.1 dieser

Norm festgelegt wurde. In üblichen Niederspannungsanlagen sind dies 0,4s, bzw. bei Betriebsströmen über 32A sind es 5s.

Für den zweiten Fall findet man in den Normen jedoch keine Angaben. Ein einpoliger Kurzschluss mit Beteiligung des Neutralleiters wird nicht näher beschrieben, weil er keine direkten Sicherheitsaspekte berührt. In der zukünftigen Ausgabe von VDE 0100-430 wird es hierzu eine Aussage geben. Danach wird verlangt, dass die Kabel und Leitungen auch nach einem Kurzschluss weiter betriebsbereit sein müssen. Demnach darf die höchstzulässige Temperatur am Außenleiter im Kurzschlussfall nicht überschritten werden. Diese Temperatur wird von Hersteller der Kabel und Leitungen vorgegeben und ist zudem in Hersteller normen festgelegt. Für übliche Kabel- und Leitungstypen (NYY und NYM) sind dies z. B. 160°C.

Wahl der Abschaltzeit

Die Abschaltung bzw. die Abschaltzeit muss also so gewählt werden, dass diese maximal mögliche Temperatur nicht überschritten wird. Eine obere Grenze gibt es allerdings: In der Regel gelten die üblichen mathematischen Formeln in diesem Zusammenhang nur für Kurzschlusszeiten bis 5s, weil danach ein zu starker Wärmeaustausch zwischen dem erwärmten Leiter und seiner Umgebung stattfindet. Deshalb darf die Kurzschlusszeit allein aus diesen Gründen 5s nicht überschreiten.

Legt man diese maximale Temperatur zugrunde, kann die Berechnung des kleinsten Kurzschlussstroms eindeutig durchgeführt werden. Allerdings steht noch die Beantwortung der Fragen b) und c) aus.

Besonders Frage b) ist in diesem Zusammenhang wichtig. Legt man die

160°C für die Berechnung des kleinsten Kurzschlussstroms zugrunde, so wird dabei eins übersehen: Diese hohe Temperatur nimmt lediglich das letzte Leitungsstück des gesamten Kurzschluss-Fehlerstromkreises an. Die größeren Leitungsquerschnitte vor der Verteilung, in der sich die Überstrom-Schutzeinrichtung, die den Kurzschluss abschalten soll, befindet, werden von dieser Erwärmung kaum oder so gut wie gar nicht beeinflusst.

Das bedeutet: Den Wert von 160°C für die Erwärmung der gesamten Schleifenimpedanz Z_s anzusetzen, ist faktisch nicht korrekt. Will man es genau berechnen, müsste man für jeden Kurzschlussfall den Anteil an der Schleifenimpedanz bis zur Verteilung und den restlichen Anteil von der Verteilung bis zum Kurzschlussort gesondert ermitteln. Dann könnte man diesen letztgenannten Teil mit der Erwärmung berechnen und den Rest so belassen. Das würde jedoch zu einem völlig überzogenen Aufwand führen. Nur in Berechnungsprogrammen ist dies ohne Weiteres möglich.

Was ist also zu tun – hier entsteht die Unsicherheit? Sollen wir nun einen Mittelwert annehmen, der in etwa der Situation entspricht? Dies wurde in der Vergangenheit immer wieder versucht. Manche haben mit einer Temperatur von 80°C gerechnet und andere mit 55°C.

Auch die Frage c) hat es in sich. Wenn man die Kurzschluss-Endtemperatur ansetzt, übertreibt man ein wenig; denn die Abschaltung beginnt ja nicht erst am Ende der Kurzschlussdauer. Die Erhöhung der Temperatur während des Kurzschlusses verläuft mit hoher Wahrscheinlichkeit sehr steil. Dabei beginnt die Abschaltung natürlich schon bei einer sehr viel niedrigeren Temperatur. Genau genommen müsste man also eine Mischtemperatur

ansetzen. Aber die zu berechnen, würde zu einem nicht vertretbaren Aufwand führen.

Kommen wir zur Frage d): Noch verwirrender wird diese Überlegung nämlich, wenn man die kurze Abschaltzeit von 0,4s ansetzt, weil ein einpoliger Kurzschluss im TN-System ja auch ein Körperschluss darstellen kann. Wenn bei einem Kurzschluss zwischen Außenleiter und Neutralleiter die Maximalzeit von 5s angesetzt würde, so kann man sich leicht vorstellen, dass bei der sehr viel kürzeren Zeit von 0,4s kaum von der gleichen Kurzschluss-Endtemperatur ausgegangen werden kann.

Wahl der Temperatur

Es ist deutlich geworden, dass es für die Beantwortung, welche Temperaturerhöhung man bei der Schleifenimpedanz für die Berechnung des einpoligen Kurzschlusses ansetzen muss, keine einfache und erst recht keine eindeutige Antwort geben kann. In der Praxis bewährt – und deshalb nach Ansicht des Autors dieser Leserfragenbeantwortung völlig ausreichend – hat sich die Berücksichtigung der Temperaturerhöhung auf 80°C für längere Kurzschlussereignisse (bis 5s). Handelt es sich um einen Körperschluss im TN-System, der in 0,4s abgeschaltet werden muss, so sollte man eine niedrigere Temperatur ansetzen. Möglich wären hier z.B. 55°C.

Beispiel: kurze Ausschaltzeit und geringe Temperaturerhöhung

Das folgende Beispiel bezieht sich auf den Faktor 2/3, der in VDE 0100-600, Anhang C, Abschnitt C.61.3.6.2 zu finden ist. Wörtlich heißt es in der Norm an dieser Stelle: »Die Anforderungen von DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06, 411.4 werden als erfüllt angesehen, wenn der gemessene Wert der Fehlerschleifenimpedanz die folgende Bedingung erfüllt«:

$$Z_{S(m)} \leq \frac{2}{3} \cdot \frac{U_0}{I_a}$$

Das »m« im Ausdruck $Z_{S(m)}$ betont, dass es um den am Messgerät abgelesenen Wert geht. Für die kurzen Ausschaltzeiten ($t_a < 0,4s$) bereitet dies kein Problem.

Der Zusammenhang ist die Anforderung aus DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06, Abschnitt 441.4. Dort geht es um den Schutz durch

MEHR INFOS

Bücher zum Thema

- Schmolke, H., Auswahl und Bemessung von Kabeln und Leitungen, 3. überarbeitete Auflage 2009, 128 Seiten, Taschenbuchformat, mit CD-ROM plus kostenloser CD »Simaris« von Siemens, 18,00€, ISBN 978-3-8101-0285-0
- Fröse, H.-D.: Brandschutz für Kabel und Leitungen, 3. neu bearb. und erw. Auflage 2010, 176 Seiten, 26,80€, ISBN 978-3-8101-0289-8

Fachbeiträge zum Thema

- Braun, M.: Leitungen ohne heißen Draht – Kabel- und Leitungsanlagen richtig projektieren, »de« 1-2/2009, S. 33 ff.
- Kasikci, I.: Elektroanlagen planen und projektieren (4) – Projekt Lagerhalle, »de« 7/2009, S. 28 ff.

Link zum Thema

Normen kaufen: www.vde-verlag.de

automatische Abschaltung im Fehlerfall. Welche Bedeutung hat hier der Faktor 2/3 und wie kommt dieser Wert zustande?

Zunächst ist klar, dass der Faktor 2/3 auch mit 0,67 angegeben werden kann. Dieser Wert ergibt sich, wenn man zwei Korrekturfaktoren in die Messung einbezieht.

Korrekturfaktor für die Messunsicherheit

Nach VDE 0413-3, Abschnitt 4.1 soll bei der Messung des Schleifenwiderstands eine Betriebsmessunsicherheit von $\pm 30\%$ berücksichtigt werden. Da der abgelesene Messwert für den Prüfer immer 100% entspricht und im ungünstigsten Fall der tatsächliche Widerstand um 30% höher liegt, wird der Maximalwert mit 130% angesetzt.

Der auf dem Messgerät angezeigte Wert für die Schleifenimpedanz, der eventuell um diese 30% falsch angezeigt wird, muss sicherheitshalber um diese 30% reduziert werden, damit auch dann, wenn der tatsächliche Wert 130% beträgt, die tatsächliche Schleifenimpedanz nicht zu hoch liegt. Da man also vom maximal möglichen Wert ausgeht, wäre das eine Reduzierung von 130% auf 100%:

$$\frac{\text{Messwert}}{1,3} = 0,769 \cdot \text{Messwert}$$

Höhere Temperatur ansetzen

Weiterhin ist eine Temperaturerhöhung anzusetzen, die den Widerstand im Kurzschlussfall vergrößert. Ein häufig angegebener Wert ist bei der kurzen Abschaltzeit von 0,4s wie gesagt 55°C. Das wäre eine Temperaturerhöhung von 35K, wenn man bei der üblichen Rechnung von 20°C ausgeht. Der Leitungswiderstand R_L muss also aus dem Widerstand R_{L20} (der mit dem Messgerät ermittelt wurde) mit der üblichen Formel aufgrund dieser Temperaturerhöhung berechnet werden:

$$R_L = [1 + \alpha(\vartheta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \Rightarrow$$

$$R_{L20} = \frac{R_L}{1 + 0,004 \cdot 35} = \frac{R_L}{1,14}$$

$$R_{L20} = 0,877 \cdot R_L$$

Zusammen mit dem soeben ermittelten Wert für die Betriebsmessunsicherheit ergibt sich ein Gesamtkorrekturfaktor von: $0,769 \cdot 0,877 \approx 0,67$.

Schlussbemerkung

Wenn man z.B. bei längeren Ausschaltzeiten unsicher ist oder wenn

der gemessene und dann errechnete Wert mit dieser Rechnung zu knapp ausfällt, muss genauer gerechnet werden. In VDE 0100-600, Abschnitt 61.3.6.3 wird hierzu eine Vorgehensweise beschrieben. Dabei darf die in VDE 0413-3 vorgegebene Betriebsmessunsicherheit von 30% nicht unberücksichtigt bleiben.

Herbert Schmolke, VdS Köln,
Autor der Rubrik Praxisprobleme