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: 93 (2002)

Heft: 1

Artikel: Die Kurzschlussstromberechnung nach IEC 60909

Autor: Balzer, Gerd / Busarello, Luigi

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855366

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

Die Kurzschlussstromberechnung nach IEC 60909

Unterschiede zwischen alter und neuer überarbeiteter Auflage

Die Kurzschlussstromberechnung nach IEC 60909:1988 wird heute als Vorschrift für die Dimensionierung elektrischer Anlagen verwendet. Die neue überarbeitete Auflage dieser Norm ändert die Berechnung der Kurzschlussströme auf allen Spannungsebenen. Die heute im Einsatz stehenden EDV-Programme zur Kurzschlussberechnung müssen an diese neue Norm angepasst werden.

Zur Dimensionierung und Auslegung von elektrischen Anlagen sowie zur Einstellung des Netzschutzes wird heute die Kurzschlussstromberechnung nach IEC 60909:1988 bzw. der Vorschrift DIN/VDE 0102:1990-01 angewendet.

Gerd Balzer, Luigi Busarello

Diese Norm wurde im März 1988 als IEC-Publikation «Short Circuit Current Calculation on Three-Phase A.C. Systems» veröffentlicht. In [1] wird eine Übersicht der Verfahren zur Kurzschlussstromberechnung und im Speziellen der IEC-Norm 909 gegeben. Eine ausführliche Darstellung der Kurzschlussstromberechnung kann [2] entnommen werden.

Mit der IEC-Norm 60909–0:2001–07 erschien die überarbeitete Ausgabe von IEC 909. Gegenüber dieser Norm ergeben sich in der Neuausgabe wesentliche Änderungen zu den folgenden Themenkreisen, die anschliessend zum Teil kommentiert werden:

- Korrektur der Impedanz von Netztransformatoren und Blocktransformatoren ohne Stufenschalter bei der Kurzschlussstromberechnung;
- Gesamtkorrektur als einziges Verfahren zur Berechnung der Kurzschlussströme von Kraftwerken;
- Beitrag von Motoren bei unsymmetrischen Fehlern;
- Berechnung des thermisch wirksamen Kurzschlussstroms;
- Berücksichtigung eines Mehrfachfehlers im MS/NS-Netz[1];
- Spannungsfaktoren c in NS-Netzen nach der maximalen Toleranz;
- Bestimmung des kleinsten Kurzschlussstroms in NS-Netzen bei maximaler Kabelendtemperatur[2].

Die neue Vorschrift beeinflusst demnach die Berechnung der Kurzschlussströme sowohl im Verteil- als auch im Übertragungsnetz.

Wesentliche Änderungen

Die alte und die neue IEC-Norm für die Kurzschlussstromberechnung basieren auf dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle an der Fehlerstelle [1], das für die erste VDE-Bestimmung für die Kurzschlussstromberechnung (1962/64) ausgearbeitet wurde. Dabei wurden die damaligen Netzstrukturen und Betriebsweisen mit berücksichtigt. Die Grösse der Ersatzspannungsquelle U_0, die den Lastzustand des Netzes vor Fehlereintritt berücksichtigt, wird mit Hilfe des Spannungsfaktors c bestimmt. Der dreipolige Kurzschlussstrom an der Fehlerstelle k wird durch den folgenden Ausdruck bestimmt

$$I_k'' = \frac{U_0}{Z_{kk}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{kk}} \qquad (1)$$

wobei U_n die Netznennspannung und Z_{kk} die Netzimpedanz an der Fehlerstelle k darstellt. Der Spannungsfaktor c ist innerhalb einer Spannungsebene konstant und liegt für die Berechnung des grösstmöglichen Kurzschlussstroms bei Spannungsebenen über 1 kV bei $c = 1{,}1$. Um den Spannungsfaktor für alle Fehlerstellen innerhalb einer Spannungsebene konstant halten zu können, müssen die Impedanzen der Betriebsmittel, wie Transformatoren und Generatoren korrigiert werden (siehe Kasten).

Impedanzkorrekturen

Die Änderungen in der Korrektur der Transformator- und Generatorimpedanzen stellen einen wesentlichen Unterschied zwischen der alten und neuen Norm dar. Die Tabelle I zeigt die vollständige Auflistung der Faktoren in der neuen IEC 60909–0:2001–07.

$\underline{Z}_T = R_T + j \cdot X_T$: Transformatorkurzschlussimpedanz

$\underline{Z}_{TOS}$: $\underline{Z}_T$ bezogen auf OS-Seite[3]

$\underline{Z}_G = R_G + j \cdot X_G$: Generatorimpedanz, es gilt $X_G = X''_d$ (subtransiente Reaktanz)

t_r: Bemessungsübersetzungsverhältnis des Transformators

$U_{n(Q),(G)}$: Netznennspannung an der Transformator-OS-Seite oder an der Generatoranschlussklemme

U_b: Betriebsspannung an den Transformatorklemmen vor Eintritt des Fehlers

$U_{r(TUS),(TOS),(G)}$: Bemessungsspannung des Transformators (an der US[4]- bzw. OS-Seite) bzw. des Generators

I_{bt}: Betriebsstrom des Transformators vor Eintritt des Fehlers

I_{rt}: Bemessungsstrom des Transformators

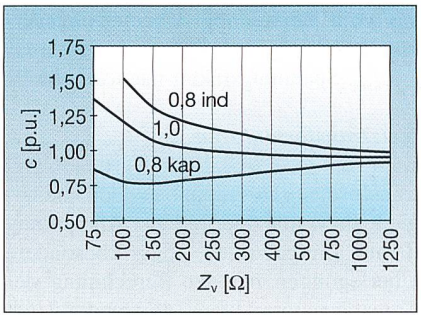

Bild 1 Spannungsfaktor c in Abhängigkeit der Belastung einer Freileitung

Länge der Freileitung = 300 km, Z_V = 1000 Ω entspricht einer Belastung von 144,4 MVA

Beispiel zur Erläuterung der Korrektur

Wird eine Freileitung mit einer Länge von $\ell > 300$ km betrachtet, so verändert sich die Spannung U_E am Ende der Leitung in Abhängigkeit der Belastung. Im Gegensatz hierzu muss die Spannung U_A am Anfang angepasst werden, wenn der Wert U_E konstant gehalten werden soll. Das Verhältnis $c = U_A/U_E$ ist in Bild 1 für verschiedene Impedanzen Z_V und verschiedene Leistungsfaktoren dargestellt. Bild 1 zeigt, dass der Anstieg der Spannung U_A von der Belastung am Ende der Leitung abhängt. Noch eindeutiger ist das Ergebnis, wenn die Belastung S_V einen Spannungsfall an Transformatoren hervorruft. Der Spannungsfaktor $c = 1{,}1$ ist dann nicht mehr ausreichend, wenn eine grosse induktive Belastung vorliegt. Um bei der Ermittlung des grössten Kurzschlussstroms trotzdem Werte zu erreichen, die auf der sicheren Seite liegen, sind Korrekturen notwendig. Statt eine Erhöhung der Spannungsfaktoren bei unterschiedlichen Quellenspannungen vorzunehmen, wurde bereits in der alten Norm eine Impedanzkorrektur eingeführt. Mit ihr kann das Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle mit einer konstanten Spannung beibehalten werden.

cos φ, cos $\varphi_{(rG)}$: Leistungsfaktor des Transformators vor Eintritt des Fehlers und Bemessungsleistungsfaktor des Generators

p_G: Prozentuale Abweichung der Generatorbetriebsspannung von der Bemessungsspannung

p_T: Prozentuale Abweichung des Transformator-Übersetzungsverhältnisses vom Bemessungs-Übersetzungsverhältnis

c_{max}: Spannungsfaktor nach Tabelle II

Netztransformatoren

In der IEC 909:1988 wurden Netztransformatoren nicht impedanzkorrigiert. Es wurde aber in einer Anmerkung darauf hingewiesen, dass besondere Überlegungen bei der Berechnung der Transformatorreaktanz notwendig sind, wenn folgende Bedingungen eintreten:

- ein einfach gespeister Kurzschluss hat die gleiche Richtung wie der Betriebsstrom;
- es ist möglich, die Übersetzung zu verändern (>5%);
- die Spannung U_{kmin} ist merklich kleiner als die Kurzschlussspannung U_{kr};
- die Spannung während des Betriebs ist merklich höher als U_n ($U \geq 1{,}05 \cdot U_n$).

Da im Allgemeinen mehrere der oben genannten Bedingungen in der Praxis zutreffen, war es unumgänglich, auch für alle Netztransformatoren eine Impedanzkorrektur einzuführen.

Synchrongeneratoren ohne Blocktransformatoren

Falls die Spannung an der Generatorklemme im Betrieb stets um p_G von der Bemessungsspannung U_{rG} abweicht, kann für U_{rG} der folgende Ausdruck (Programmierungsanweisung) eingesetzt werden: $U_{rG} = (1{,}0 + p_G) \cdot U_{rG}$.

Kraftwerksblöcke

Nach der alten Norm konnten Kraftwerksblöcke, bestehend aus Transformator und Synchrongenerator, nach zwei verschiedenen Verfahren korrigiert werden

- Einzelkorrekturverfahren: der Transformator und der Generator werden separat mit verschiedenen Faktoren korrigiert;
- Gesamtkorrekturverfahren: der gesamte Kraftwerksblock (Transformator und Generator) wird gemeinsam korrigiert.

In der neuen Norm wurde auf die Änderung des Einzelkorrekturverfahrens bei der Berechnung vollständig verzichtet – das Verfahren wurde eliminiert. Das Gesamtkorrekturverfahren wurde übernommen, wobei dieses Verfahren noch für den Fall erweitert wurde, dass der Maschinentransformator keinen automatischen Stufenschalter besitzt. In der alten Norm war der Korrekturfaktor hierfür nur im Antrag erwähnt und hatte somit keinen normativen Charakter.

Thermisch wirksamer Kurzschlussstrom

Da sich IEC 60909 ausschliesslich mit der Berechnung der Kurzschlussströme beschäftigt, lag es nahe, das Verfahren zur Ermittlung des thermisch wirksamen Kurzschlussstroms aus der Norm IEC 865–1 aus- und in IEC 60909 einzugliedern. Der thermisch wirksame Kurzschlussstrom berechnet sich nach

$$I_{th} = \frac{1}{\sqrt{T_k}} \cdot \sqrt{\int i^2 dt} = I_k'' \sqrt{m + n} \qquad (2)$$

Der Faktor m berücksichtigt die Wärmewirkung des Gleichstromgliedes und der Faktor n die Wärmewirkung des Wechselstromgliedes. T_k stellt die Kurzschlussdauer dar.

Berücksichtigung eines Mehrfachfehlers im MS/NS-Netz

Bild 2 zeigt das Beispiel eines Mehrfachfehlers. Im vorliegenden Fall entsteht ein Kurzschluss auf der Niederspannungsseite eines Transformators, so dass eine Sicherung auf der MS-Seite auslöst. Die in der Norm angegebenen Formeln ermöglichen die Berechnung der Stromverteilung in den beiden übrigen Leitungen, um zu einer vollständigen Ausschaltung zu gelangen.

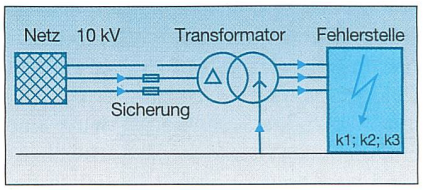

Bild 2 Berücksichtigung eines Mehrfachfehlers

Betriebsmittel	Impedanz	Korrektur
Netztransformator	$\underline{Z}_{TK} = \underline{Z}_T \cdot \underline{K}_T$	$K_T = \frac{U_n}{U_b} \cdot \frac{c_{max}}{1 + \frac{x_T \cdot I_T^b}{I_{rT}} \cdot \sin\varphi}$ $K_T = 0{,}95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0{,}6 \cdot x_T}$
Synchrongenerator	$\underline{Z}_{GK} = \underline{Z}_G \cdot \underline{K}_G$ $\underline{Z}_S = \underline{K}_S \cdot \left(t_r^2 \cdot \underline{Z}_G + \underline{Z}_{TOS}\right)$	$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin\varphi_{rG}}$ $K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{nG}^2} \cdot \frac{U_{rTUS}^2}{U_{rTOS}^2} \cdot \frac{c_{max}}{1 + \lvert x_d'' - x_T \rvert \cdot \sin\varphi_{rG}}$
Kraftwerksblock ohne automatische Stufenschalter	$\underline{Z}_{SO} = \underline{K}_{SO} \cdot \left(t_r^2 \cdot \underline{Z}_G + \underline{Z}_{TOS}\right)$	$K_{So} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG} \cdot (1 + p_G)} \cdot \frac{U_{rTUS}}{U_{rTOS}} \cdot \frac{(1 \pm p_T) \cdot c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin\varphi_{rG}}$

Tabelle I Zusammenstellung der Impedanzkorrekturen

Nennspannung	Spannungsfaktor c	
	c_{max}	c_{min}
Niederspannung $U_n < 1$ kV		0,95
• Toleranz +6%	1,05	
• Toleranz +10%	1,10	
Mittelspannung 1 kV ≤ U_n < 35 kV	1,10	1,00
Hochspannung $U_n \geq 35$ kV	1,10	1,00

Tabelle II Die Spannungsfaktoren c

c_{max} wird eingesetzt für den grössten, c_{min} für den kleinsten Kurzschlussstrom

In vielen Fällen sind Sicherungslasttrennschalter installiert, die allpolig ausschalten. Eine Berechnung ist dann nicht notwendig.

Spannungsfaktoren c in NS-Netzen nach der maximalen Toleranz

In der alten Norm beträgt der Wert des Spannungsfaktors für 230/400-V-Netze $c = 1{,}0$. Da in der IEC-Norm 38 von 1983 die Nennspannungen in Niederspannungsnetzen in Abhängigkeit von Spannungstoleranzen neu definiert wurden, erfolgte in IEC 60909–0:2001–07 die Anpassung der Spannungsfaktoren im Niederspannungsbereich mit

$c_{max} = 1{,}05$ bei einer Toleranz von +6%

$c_{max} = 1{,}10$ bei einer Toleranz von +10%.

Tabelle II gibt eine Übersicht über die Spannungsfaktoren in Abhängigkeit der Spannungsebene (durch den Hinweis «min» und «max» wird auf die Berechnung der maximalen und minimalen Kurzschlussströme hingewiesen).

Kabeltemperatur in NS-Netzen

In der alten Norm war die maximale Temperatur eines Kabels auf +80 °C zum Zeitpunkt des Kurzschlussabschaltens begrenzt. Diese Einschränkung wurde aufgehoben und stattdessen ist die Kabeltemperatur am Ort des Kurzschlusses oder die maximal mögliche Kabeltemperatur einzusetzen.

Beitrag von Motoren

Bereits in IEC 60909:1988/Tabelle 2 war der Kurzschlussstrombeitrag von Asynchronmotoren bei drei- und zweipoligen Fehlern aufgeführt. Bezüglich des einpoligen Kurzschlussstroms stand der Hinweis, dass der Beitrag der Motoren in niederohmig geerdeten Netzen nicht vernachlässigt werden kann. Eine Berechnungsvorschrift gab es nicht, so dass bei der Neuauflage diese Lücke geschlossen wurde. Bild 3 verdeutlicht, dass auch bei einem Motor mit isolierten Sternpunkt ein Kurzschlussbeitrag zu einem einpoligen Fehler erfolgt, wenn das Netz niederohmig geerdet ist. Dies soll nachfolgend am Beispiel eines Asynchronmotors dargestellt werden.

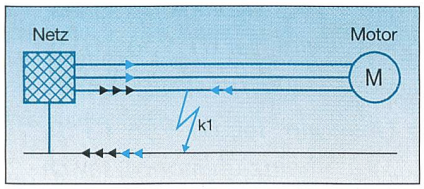

Bild 3 Beitrag von Motoren zum einpoligen Kurzschluss

Beispiel für die Berechnung des Beitrags eines Asynchronmotors zum Kurzschlussstrom

Entsprechend Bild 3 wird eine 400-V-Motorengruppe über einen 10-kV-Transformator eingespeist. Für die Berechnung der Ströme werden die Betriebsmitteldaten nach Tabelle III angenommen.

Die Bilder 4 und 5 zeigen die Ersatzschaltungen zur Bestimmung der Komponenten- und Fehlerströme für den ein- und dreipoligen Kurzschlussstrom. Anhand der Ersatzschaltung nach Bild 5 ist zu erkennen, dass bei einem einpoligen Fehler in einem niederohmig geerdetem Netz ein Motor auf Grund des Mit- und Gegensystems einen Beitrag liefern wird. Im Folgenden wird dieser Kurzschlussstrombeitrag berechnet und auf den dreipoligen Fehler bezogen.

Unter Berücksichtigung der in Tabelle III angegebenen Betriebsmitteldaten

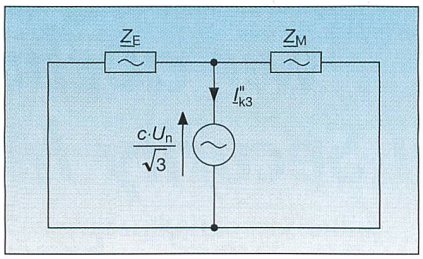

Bild 4 Komponentenersatzschaltung bei einem dreipoligen Fehler nach Bild 3

$\underline{Z}_E$: Ersatzimpedanz des Transformators und Netzes im Mitsystem; $\underline{Z}_M$: Motorimpedanz im Mitsystem; I_{K3}: dreiphasiger Kurzschlussstrom; U_n: Netznennspannung; c: Spannungsfaktor

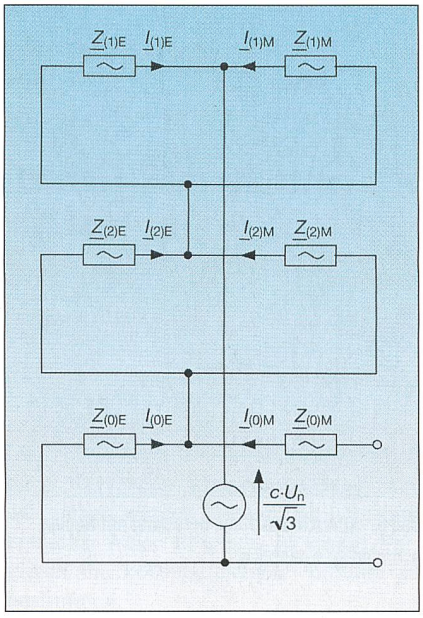

Bild 5 Komponentenersatzschaltung bei einem einpoligen Fehler nach Bild 3

$\underline{Z}_{(x)E}$: Ersatzimpedanz des Transformators und des Netzes im Nullsystem (0), Mitsystem (1) und Gegensystem (2); $\underline{Z}_{(x)M}$: Motorimpedanz im Nullsystem (0), Mitsystem (1) und Gegensystem (2); $\underline{I}_{(x)E}$: Kurzschlussstrom des Netz/Transformators im Nullsystem (0), Mitsystem (1) und Gegensystem (2); $\underline{I}_{(x)M}$: Kurzschlussstrom des Motors im Nullsystem (0), Mitsystem (1) und Gegensystem (2); U_n: Netznennspannung; c: Spannungsfaktor

zeigt Bild 6 die mit dem Kurzschlussstromprogramm Neplan von BCP ermittelten Ergebnisse bei einem Fehler an den Motorklemmen.

Das Beispiel zeigt, dass der Beitrag der Motorengruppe auch bei einem einpoligen Fehler nicht zu vernachlässigen ist, obwohl die Sternpunkte der Motorengruppe selbst nicht geerdet sind. Unter diesen Voraussetzungen beträgt der Leiterstrom in der fehlerbehafteten Phase, bezogen auf den dreipoligen Kurzschlussstrom

$$I''_{k1M} / I''_{k3M} = \frac{9{,}24\ \text{kA}}{15{,}16\ \text{kA}} = 0{,}609 \qquad (3)$$

Darüber hinaus führen auch die nicht fehlerbehafteten Leiter einen Kurzschlussstrom.

Einspeisung			
Netz	U_{nQ} = 10 kV	$I_{kQ} = \infty$	
Transformator	S_{rT} = 2 MVA	u_k = 6%	u_{Rr} = 1%
	t_r = 10 kV/0,4 kV	$\underline{Z}_{0T}/\underline{Z}_{1T}$ = 1	
Motorengruppe	S_{rM} = 2 MVA	I_{LR}/I_r = 5	U_{rM} = 400 V
	R_M = 0,42 X_M		

Tabelle III Einspeisung einer Motorengruppe

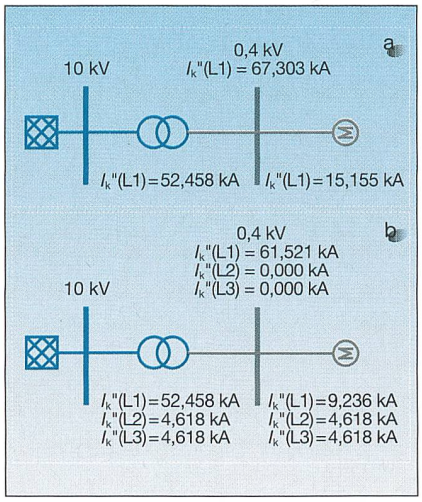

Bild 6 Kurzschlussströme berechnet mit Neplan
a: dreipolig; b: einpolig

Zusammenfassung

Mit der IEC 60909–0:2001–07 ist eine überarbeitete Ausgabe von IEC 60909: 1988 zur Berechnung von Kurzschlussströmen erschienen. In diesem Aufsatz wurden die wesentlichen Unterschiede aufgezeigt und ein Beispiel zur Berechnung der Beiträge von Motoren bei drei- und einpoligen Fehlern gegeben. Es zeigte sich, dass die neue Norm die Kurzschlussstromberechnung gegenüber der alten Norm für sämtliche Spannungsebenen ändert. Die heute eingesetzten Kurzschlussberechnungsprogramme müssen an die neue Norm angepasst werden, um den sicherheitstechnischen Aspekten bzw. den Vorschriften zu genügen.

Referenzen

[1] *L. Busarello; Balzer, G.; K. Reichert:* Die Kurzschlussstromberechnung nach IEC909. Bulletin SEV/VSE 80(1989)9

[2] *G. Balzer, D. Nelles, C. Tuttas:* Kurzschlussstromberechnung nach VDE 0102. VDE-Schriftenreihe Bd. 77, ISBN 3-8007-2101-5.

Adressen der Autoren

Gerd Balzer, Prof. Dr., TU Darmstadt, D-64283 Darmstadt, gbalzer@eev.tu-darmstadt.de
Luigi Busarello, Dr. El.-Ing. ETH, BCP Busarello+ Cott+Partner AG, 8703 Erlenbach, bc@neplan.ch

[1] MS: Mittelspannung; NS: Niederspannnung
[2] Kabelendtemperatur: Temperatur am Ort des Kurzschlusses
[3] OS: Oberspannungsseite
[4] US: Unterspannungsseite

Calcul du courant de court-circuit selon CEI 60909 – différences par rapport à l'ancienne édition

Dans le dimensionnement et la conception des installations électriques, de même que dans le réglage de la protection de réseau, on applique actuellement le calcul de courant de court-circuit selon CEI 60909:1988 et la prescription DIN/VDE 0102:1990-01. La nouvelle édition révisée de cette norme modifie le calcul du courant de court-circuit à tous les niveaux de tension. Les programmes informatiques actuellement en service pour le calcul du courant de court-circuit doivent être adaptés à la nouvelle norme. Le présent article expose les principaux changements.

Wenn es um Sicherheit geht, bin ich sehr wählerisch ...

... wir auch:

TSM® – Total Security Management.

wie – wo – was? – Fragen Sie einfach uns ...

Zum Beispiel:

Risikoanalysen, EMV-Prüfungen, Bedienungsanleitungen, Entwicklungsberatung, Vorbeurteilungen

SEV ASE

Details unter www.sev.ch

... Kontaktpersonen:
Markus Aellig, Tel 01 956 13 30
markus.aellig@sev.ch
Heinz Uhlmann, Tel. 01 956 13 34
heinz.uhlmann@sev.ch

TOTAL SECURITY MANAGEMENT