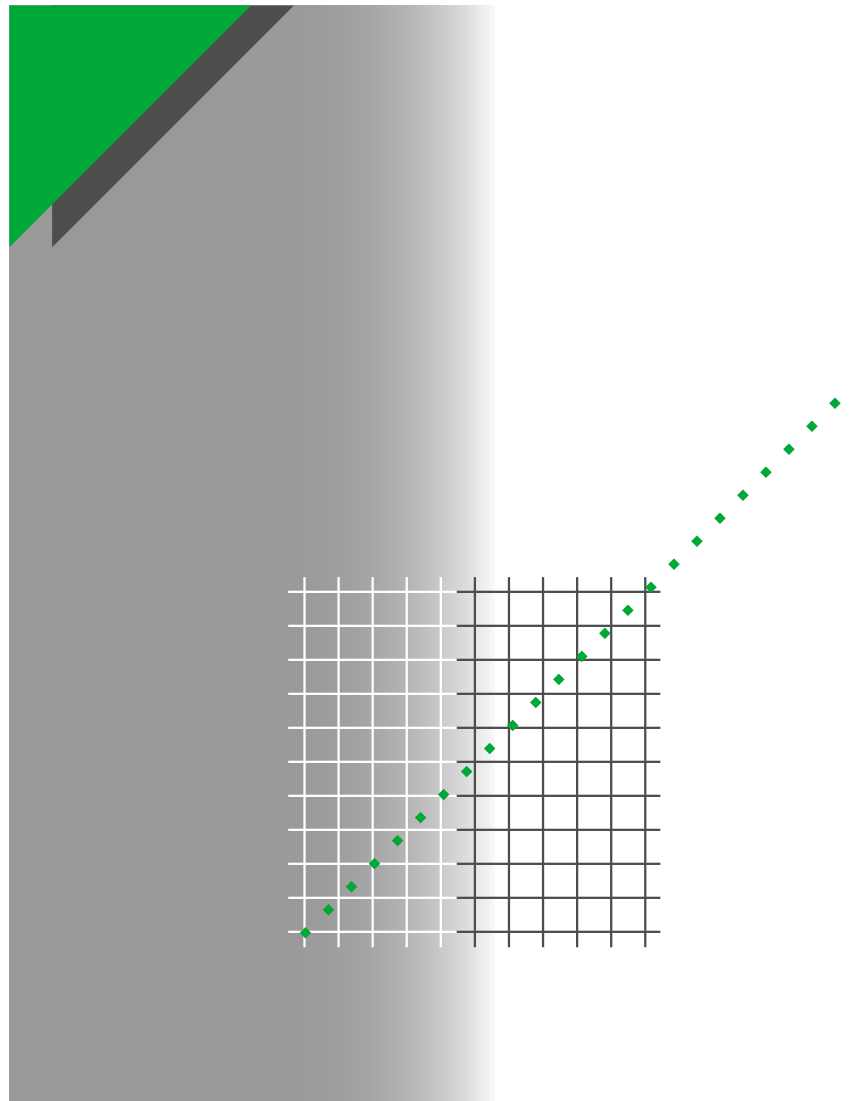


Technisches Heft Nr. 162

ZXTH162

Elektrodynamische Kräfte an Sammelschienen in Niederspannungssystemen



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Die Technischen Hefte stellen eine Sammlung von Unterlagen dar, die sich vor allem an Ingenieure, Techniker und Fachleute aus der Industrie richten, die sich über die Produktkataloge hinaus weitreichendere Informationen zu einem Produkt verschaffen möchten.

Auch bei Schulungen haben sich diese technischen Hefte bereits als sehr nützlich erwiesen.

Sie liefern nicht nur Informationen zu den neuesten technischen und technologischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektrotechnik und der Elektronik, sondern verhelfen dem Leser auch zu einem besseren Verständnis der verschiedenen Phänomene, die an elektrischen Anlagen, Systemen und Geräten beobachtet wurden.

Inhalt jedes technischen Hefts ist die grundlegende Untersuchung eines konkreten Themas aus den Gebieten elektrische Netzwerke, Schutzvorrichtungen, Überwachungs-, Steuerungs- und Industrieautomatisierungssysteme.

Bitte setzen Sie sich mit Ihrem Kundenberater von Schneider Electric in Verbindung, wenn Sie ein Technisches Heft oder die Liste der erhältlichen Titel benötigen.

Die Sammlung, die die Technischen Hefte umfaßt, ist wiederum Teil der „Technischen Sammlung“ von Schneider Electric.

Vorwort

Der Autor ist nicht verantwortlich für die Folgen einer unsachgemäßen Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen und Diagramme und kann nicht für etwaige Fehler oder Irrtümer oder für die aus der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen und Diagramme resultierenden Konsequenzen haftbar gemacht werden.

Die Vervielfältigung eines Technischen Hefts oder eines Teil desselben ist nur mit vorherig erteilter Genehmigung seitens der Wissenschaftlichen und Technischen Abteilung erlaubt. Der Zusatz „Auszug aus dem Technischen Heft Nr. (unbedingt anzugeben!) von Schneider Electric“ ist unerlässlich.



Jean-Pierre Thierry

Nach seinem Ingenieursstudium im CESI (Centre d'Etudes Supérieures Industrielles) und im CMAM (Conservatoire National des Arts et Métiers) war er zunächst in der Eisen- und Stahlindustrie beschäftigt (Walzwerkautomatization und Überwachung von Strömungselementen). Nachdem er einige Jahre im Bereich der Vorbereitung und Entwicklung von Mitteln zur mechanischen Schwingungsprüfung tätig war, begann er 1969 seine Tätigkeit bei Telemecanique. Dort übernahm er zunächst die Leitung der technischen Abteilung und war dann als Projektmanager zuständig für die Entwicklung neuer Produkte (Schienenverteiler).



Christophe Kilindjian

Nach Abschluß seines Ingenieursstudiums an der Ecole Supérieure d'Energie et des Matériaux in Orléans im Jahre 1986 wurde er noch im selben Jahr Mitarbeiter bei Merlin Gerin in der Technischen Abteilung für Niederspannungs-Schaltanlagen. Verantwortlich für die Durchführung von Basisstudien, richtet Kilindjian sein Hauptaugenmerk auf die Problematik des Wärmeaustauschs und der elektrodynamischen Festigkeit von Niederspannungsanlagen.

Nr. 162

Elektrodynamische Kräfte an Sammelschienen in Niederspannungssystemen

Elektrodynamische Kräfte an Sammelschienen in Niederspannungssystemen

Inhalt

1. Einführung		S. 4
2. Elektrodynamische Kräfte zwischen 2 Leitern: Entstehung u. Berechnungen	Einleitende Bemerkungen	S. 4
	Entstehung und Berechnungen	S. 4
	Rechenbeispiel für 2 parallel verlaufende drahtförmige Endlosleiter	S. 6
	Einfluß der Leiterform	S. 6
	Leiter geringer Länge	S. 7
	Nichtgeradlinige Leiter	S. 7
	Berechnung bei komplexen Leiterausführungen	S. 7
3. Elektrodynamische Kräfte an einer Dreiphasen-Sammelschiene bei einem Zwei- oder Dreiphasen-Kurzschluß	Entstehung eines Kurzschlusses	S. 9
	Maximale Kraft an einer Dreiphasen-Sammelschiene	S. 10
	Resonanzphänomen	S. 11
4. Anwendung auf Niederspannungs-Dreiphasen-Sammelschienen	Sammelschienen in Niederspannungs-Schaltanlagen	
	Schienenverteiler des Typs Canalis	S. 16
5. Schlußfolgerung		S. 20
6. Quellenverweise		S. 20

Die große Bedeutung, die der Zuverlässigkeit im industriellen Bereich (Personen- und Gerätesicherheit, Verfügbarkeit elektrischer Energie, Zuverlässigkeit und hohe Lebensdauer von Produkten) beigemessen wird, beeinflusst immer stärker die Bauart der in Industrie und Medizin eingesetzten elektrischen Geräte. Von ihrer Betriebszuverlässigkeit hängt somit, nicht selten in großem Umfang, die Zuverlässigkeit der gesamten Anlage ab. Dieses ist der Fall bei Niederspannungsschaltanlagen und vorgefertigten Transformatorverbindungen. Aufgrund dieser an die Zuverlässigkeit gestellten Anforderungen sind Untersuchungen notwendig, die darauf abzielen, die Bauteile schon in ihrer Entwicklungsphase auf ihre Funktionstüchtigkeit innerhalb ihrer Umgebung und bei Betrieb unter Beanspruchung zu testen. Über eine dieser Untersuchungen (Temperaturverhalten von elektrischen Niederspannungsschaltanlagen) wurde bereits in einem technischen Heft berichtet. Inhalt einer zweiten Untersuchung ist nun die elektrodynamische Festigkeit. Dieses Technische Heft bietet Entwicklern die relevanten Berechnungen, bei denen diese Kräfte berücksichtigt werden, und die dabei helfen sollen, die an die NS-Sammelschienen gestellten Anforderungen zu bestimmen (als fabrikfertige Schienenverteiler sowie in Schaltanlagen). Da Berechnungen allein in diesem Zusammenhang natürlich nicht ausreichen, müssen die auf diese Weise erlangten Ergebnisse durch Feldversuche bestätigt werden. Eine kurze Beschreibung der standardisierten Tests ist somit ebenfalls Inhalt dieses Hefts.

1. Einführung

Das Problem der elektrodynamischen Festigkeit tritt an den NS-Hauptstromkreisen der Anlage auf. Obwohl diese Größe hauptsächlich von der Stärke des Kurzschlusses abhängt, spielen auch die Form der Leiter, ihre Anordnung zueinander sowie die Befestigungsart eine wichtige Rolle. Dieses Problem kann zwar durch Berechnungen gelöst werden, doch nur die Überprüfung der so erlangten Ergebnisse durch Prüffeldversuche liefert geeignetes Dokumentationsmaterial, das die Übereinstimmung mit den Anforderungen der Normen und/oder der Kunden bestätigt.

Die sehr hohen Stromstärken, die während eines Kurzschlusses zwischen den verschiedenen Leitern einer Niederspannungsanlage auftreten können (starre Leiter der Schiene, Kabeltyp), erzeugen beträchtliche Kräfte von mehreren hundert Newtonmetern.

Diese Kräfte müssen folglich berechnet werden, um die Leiter sowie die sie tragenden Vorrichtungen mechanisch so zu dimensionieren, daß sie diesen Kräften standhalten können, unabhängig von den Schutzvorrichtungen, die vor oder hinter ihnen im Stromkreis installiert sind (die Normen schreiben bei Tests auf elektrodynamische

Festigkeit eine Testdauer von 1s vor).

Die genaue Berechnung der elektrodynamischen Kräfte ist angesichts der Formkomplexität der Leiter sowie der mit ihnen verbundenen Strukturen oft sehr kompliziert.

Jedoch können mit Hilfe von einigen Näherungswerten in den meisten Fällen gültige Ergebnisse auf Basis einfacher Formeln erzielt werden.

Nach einem Rückblick auf die Berechnung elektrodynamischer Kräfte mit Hilfe einfacher Geometrie befaßt sich dieses technische Heft mit Sammelschienen in Schaltanlagen und Schienenverteilern auf der Grundlage dieser Formeln.

2. Elektrodynamische Kräfte zwischen 2 Leitern: Entstehung u. Berechnungen

Die Problematik der Festigkeit von Leitern bei elektrodynamischer Beanspruchung ist sicherlich nicht neu, wie es die große Anzahl von Veröffentlichungen, die sich dieses Thema bereits zum Inhalt gemacht haben, beweist. Für die Entwickler ist dieses Problem jedoch nach wie vor von großer Wichtigkeit, und zwar aufgrund der Anwendung moderner numerischer Methoden, die Lösungen für komplexe Leiterkonfigurationen liefern. Dieses erklärt die Zusammenfassung in diesem Kapitel.

Einleitende Bemerkungen

Bei der Anwendung der Formeln müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Alle Formeln verwenden das Produkt der in jedem Leiter auftretenden und einander beeinflussenden Stromstärken $I_1 \cdot I_2$. Sind diese Werte identisch, wird das Produkt durch I^2 ersetzt.

- Die in den Formeln verwendeten Stromstärken entsprechen den Höchstwerten der durch jeden Leiter laufenden Ströme. In den meisten Fällen

jedoch werden die Effektivwerte I_{eff} verwendet. Hierbei muß I_{eff} mit einem Koeffizient multipliziert werden, der in Kapitel 3 festgelegt wird.

- Für die Kräfte werden die Absolutwerte ohne Angabe ihrer Richtung in Abhängigkeit von Feld- und Stromrichtung angegeben.

In den meisten Fällen handelt es sich um Kräfte pro Längeneinheit.

- Die Leiter bestehen aus nicht-magnetischem Material und befinden sich in ausreichendem Abstand zu allen magnetischen Bauteilen, die die Anordnung des Magnetfelds, das die Leiter erzeugen, verändern könnten.

- Auf den Skin- und Proximity-Effekt, der die Stromverteilung im Querschnitt von starren Leitern beträchtlich verändern kann, wird hier nicht eingegangen.

Entstehung und Berechnungen

Vor einem Jahrhundert machten Forscher wie Oersted, Ampère usw. auf das Phänomen der gegenseitigen Beeinflussung, das zwischen zwei stromführenden

Bauteilen oder zwischen einem Magnetfeld und einem elektrischen Strom auftritt, aufmerksam. Ihre Bemühungen und die Erforschung dieser Erscheinung trugen zur Schaffung eines theoretischen Rahmenwerks bei, das diese zwischen stromführenden Leitern auftretenden dynamischen Phänomene zusammenfaßt und miteinander verknüpfte.

Die Richtung der elektrodynamischen Kräfte ist bekannt (Abstoßung, wenn die Ströme in den Leitern einander entgegengesetzt fließen, anderenfalls Anziehung) und ihre Größen lassen sich mit Hilfe der Gesetze des Magnetismus berechnen.

Zur Berechnung elektrodynamischer Kräfte existieren zwei wichtige Methoden. Bei der einen Methode wird das von einem elektrischen Strom in einem Punkt im Raum erzeugte Magnetfeld berechnet. An diesem Punkt wird dann ein Leiter plaziert, durch den elektrischer Strom fließt, der sich möglicherweise vom ersten Strom unterscheidet. Von dem vorher berechneten Wert wird dann die auf diesen Leiter wirkende resultierende Kraft abgeleitet.

Zur Berechnung des Feldes wird bei dieser Methode das Gesetz von Biot und Savart angewandt (siehe Kasten, Abb. 1):

$$(1) \vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{u}}{r^2},$$

oder der Satz von Ampère:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I,$$

und zur Berechnung der elektrodynamischen Kraft das Gesetz von Laplace:

$$(3) d\vec{f} = i d\vec{\ell} \wedge \vec{B}.$$

Die zweite Methode basiert auf der Berechnung der potentiellen Energieschwankungen in einem Stromkreis und verwendet den Satz von Maxwell:

$$(4) F_x = i \frac{\delta\Phi}{\delta x}$$

(siehe Kasten, Abb.1).

Das Gesetz von Biot und Savart

Jedes Element eines Stromkreises, mit einer Länge $d\vec{\ell}$, durch das ein Strom i fließt, erzeugt an einem Punkt M ein Feld $d\vec{B}$, so daß:

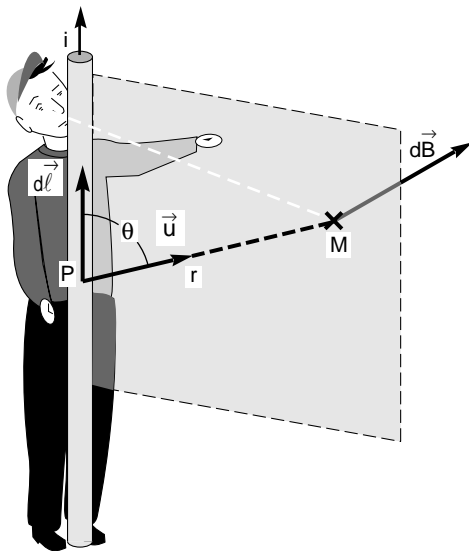
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{u}}{r^2}.$$

Dieses Feld:

- liegt senkrecht zur Ebene, die durch das Element $d\vec{\ell}$ festgelegt wird, und auf der Punkt P und M liegen,

- und ist zur linken Seite einer fiktiven Person ausgerichtet, die sich auf diesem Element befindet, wobei der Strom von ihren Füßen hoch zu ihrem Kopf fließt und ihr Blick auf Punkt M gerichtet ist (Satz von Ampère).

- konstanter Koeffizient $\left| d\vec{B} \right|$, wobei \vec{u} der Richtungsvektor von PM ist.



Der Satz von Ampère

Abgeleitet von der Formel von Biot und Savart, ergibt sich folgendes:

I soll die Stromstärke sein, die durch einen Leiter fließt, der jede beliebige Fläche mit der Kontur C kreuzt. Der Verlauf des magnetischen Feldes entlang C wird durch folgende Gleichung wiedergegeben:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I.$$

Das Gesetz von Laplace

Wenn ein Stromkreis, durch den ein Strom der Stärke i fließt, einem magnetischen Feld \vec{B} ausgesetzt wird, wird jedes Element $d\vec{\ell}$ des Stromkreises einer Kraft ausgesetzt, die sich wie folgt ausdrücken läßt:

$$d\vec{f} = i d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

Wurde \vec{B} durch einen elektrischen Stromkreis hervorgerufen, drückt das auf beide angewandte Gesetz die zwischen den beiden wirkende Kraft aus:

$$d\vec{f} = i_1 d\vec{\ell} \wedge \vec{B}_2 = i_2 d\vec{\ell} \wedge \vec{B}_1.$$

Der Satz von Maxwell

Die Arbeit der elektromagnetischen Kräfte während der Verschiebung eines nicht verformbaren Leiters, der einem magnetischen Feld ausgesetzt wird und durch den ein unveränderlicher Strom fließt, läßt sich durch folgende Formel ausdrücken:

$w = i \Phi$ oder Φ ist der Fluß des magnetischen Feldes während der Verschiebung des Leiters.

In einfacher Form angewendet, lassen sich die Komponenten F_x , F_y und F_z der Resultierenden \vec{F} der elektromagnetischen Kräfte problemlos ableiten:

$$\begin{aligned} dw &= i d\phi \\ &= \int d\vec{f} \cdot d\vec{\ell} \\ &= \vec{F} \cdot d\vec{\ell} \text{ daher} \end{aligned}$$

$$F_x = i \frac{\delta\Phi}{\delta x};$$

dasselbe gilt für F_y und F_z .

Abb. 1: Grundlegende physikalische Gesetze

Aufgrund der zu berücksichtigenden Formkomplexität des Leitersystems und der Berechnungsschwierigkeiten kann eine der drei Annäherungsmethoden (1)+(3), (2)+(3) o. (4) verwendet werden.

Es ist jedoch möglich, daß sich zwischen den erzielten Ergebnissen der einzelnen Annäherungsmethoden leichte Unterschiede ergeben, da die Annahmen, auf denen diese Gesetze basieren, nicht identisch sind.

Berechnung für zwei parallel verlaufende mehrdrähtige Endlosleiter

Bei unkompliziert geformten Ausführungen, wie z. B. drahtförmigen, geradlinigen Leitern ergibt die Anwendung für elektrodynamische Kräfte zwischen zwei idealisierten Stromlinien die Formel:

$$F/\ell = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2/d,$$

wobei

F/ℓ in **N/m**,

I_1 und I_2 in **A** und

d in **m** angegeben werden

(Der Koeffizient 2×10^{-7} ergibt sich aus dem Verhältnis $\mu_0/4 \pi$).

Da diese Formel in der gesamten Untersuchung als Grundlage dient, müssen die Annahmen, auf die sie zutrifft, festgelegt werden.

■ Die Leiter werden auf eine idealisierte Stromlinie reduziert. Somit wird auch ihr Querschnitt auf einen Punkt verkleinert. In der Praxis ist dieses Vorgehen auf alle Querschnitte von Leitern anwendbar, vorausgesetzt, der Abstand zwischen den zwei Leitern ist beträchtlich größer als der größte Querschnitt der Leiter (z. B. zehnfach so groß).

■ Es wird von geradlinigen Endlosleitern ausgegangen. In der Praxis ist diese Voraussetzung annehmbar, wenn die Länge der Leiter mindestens das 15- bis 20fache des Abstands zwischen ihnen beträgt.

Wann immer einer dieser Annahmen nicht zutrifft, muß auf einen Korrekturfaktor zurückgegriffen werden.

Einfluß der Leiterform

Die Formel F/ℓ läßt sich nur auf Stromlinien anwenden. Bei starren Leitern ist diese Formel nicht immer gültig. In diesem Fall läßt sich der Einfluß der Leiterform bestimmen, in dem der Querschnitt des Leiters als eine Überlagerung von sich gegenseitig beeinflussenden Stromlinien angesehen wird. Diese Annäherung machte sich Dwight im Falle eines Leiters mit rechteckigem Querschnitt zunutze. Der daraus resultierende Korrekturfaktor, der als k bezeichnet wird, läßt sich berechnen. Da jedoch die Formel zur Berechnung von k relativ komplex ist, wird diese Größe in den meisten Fällen mit Hilfe der S-Kurven, wie in Abb. 2 dargestellt, ermittelt.

Die Gleichung lautet dann:

$$F/\ell = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2 (k/d),$$

wobei

F/ℓ in **N/m**, I_1 und I_2 in **A** und d in **m** angegeben werden.

Beispielwerte von bei einem Kurzschluß aufgetretenen Kräften, denen zwei parallele Schienen standhalten konnten, befinden sich in der Tabelle (Abb. 3).

Obwohl dieselbe Annäherung auf alle Leiterformen angewandt werden kann, können die Berechnungen leicht eintönig werden. In der obigen Gleichung wird die Größe (k/d) oft durch $1/D$ ersetzt, wobei D für den Abstand zwischen den Leitern steht, der verändert wurde, um den Einfluß ihrer Form zu berücksichtigen.

Diese Koeffizienten sind auch auf ein Set von Dreiphasenleitern mit mehreren Leitern pro Phase anwendbar. Auf diesen Fall wird in Kapitel 3 eingegangen.

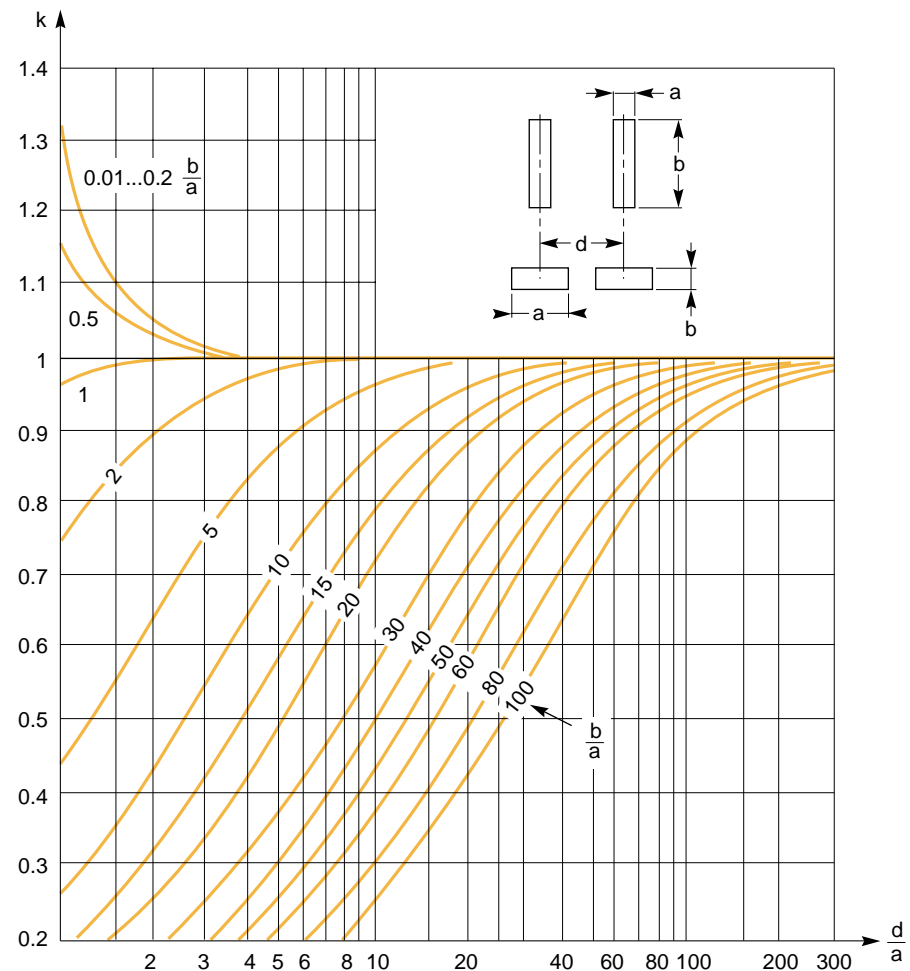


Abb. 2: Änderung der Größe k in Abhängigkeit von b/a und d/a (Dwight-Diagramm).

Leiter geringer Länge

Leiter identischer Länge

Wenn Leiter dieselbe Länge ℓ haben, die um ein 15- bis 20faches kleiner ist als ihr Achsabstand d , ergibt sich für die resultierende Kraft folgendes:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \frac{\ell}{D} \left[\sqrt{1 + \frac{d^2}{\ell^2}} - \frac{d}{\ell} \right]$$

Leiter ungleicher Länge (s. Abb. 4)

Hierbei ist die resultierende Kraft:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \frac{\ell}{D} [C_1 + C_2],$$

wobei

$$C_1 = \sqrt{\left(1 + \frac{c_1}{\ell}\right)^2 + \frac{d^2}{\ell^2}} - \sqrt{\frac{c_1^2}{\ell^2} + \frac{d^2}{\ell^2}}$$

und

$$C_2 = \sqrt{\left(1 + \frac{c_2}{\ell}\right)^2 + \frac{d^2}{\ell^2}} - \sqrt{\frac{c_2^2}{\ell^2} + \frac{d^2}{\ell^2}}$$

Die Größen von C_1 und C_2 stehen im Diagramm in Abb. 5.

Liegen sich die Leiter nicht über die gesamte Länge gegenüber, wobei einer in seinem Verlauf über den anderen hinausgeht, müssen c_1 oder c_2 in der Formel negativ sein.

Hinweis

Wenn $c / \ell = 0$, ergibt die Gleichung im obigen Abschnitt F . Der Wert der Formel in eckigen Klammern ergibt sich direkt aus der relevanten Kurve im Diagramm in Abb. 5.

Nichtgeradlinige Leiter

Hierbei handelt es sich beispielsweise um abknickend verlaufende Leiter (s. Abb. 6). Es ist möglich, daß die Verzweigungen mit einander reagieren, wenn ein starker Strom durch sie hindurch fließt.

Der Leiter b könnte sich dann um den Punkt O des festen Leiters a drehen. Für die Kraft F ergibt sich folgender Wert:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \frac{a}{b} \cdot \ell \left[\frac{a}{b} + \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} \right] \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha}$$

Diese Formel kann nur für die Werte von a und b angewandt werden,

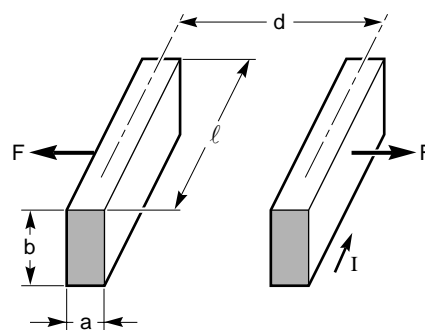
so daß: $1 < \frac{a}{b} < 10$.

Berechnung bei komplexen Leiterkonfigurationen

Bei den Sammelschienen-Konfigurationen, die bislang Gegenstand dieser Untersuchung waren, handelte es sich überwiegend um eindimensionale oder auch zweidimensionale Strukturen wie z. B. die abknickend verlaufenden Leiter. Hierbei konnten für die Berechnung der elektrodynamischen Kräfte relativ einfache Formeln verwendet werden.

Leiter können jedoch auch sehr unterschiedlich angeordnet oder einer „störenden“ Umgebung ausgesetzt sein, so daß die obigen Formeln nicht mehr zutreffen.

Derartige Anordnungen werden als „komplexe Konfigurationen“ bezeichnet.



Kennwerte			Kräfte			
a	b	d	ℓ	k	I	F
mm	mm	mm	m		kA	daN/m
5	80	100	1	0.91	35	224
5	80	100	1	0.91	80	1170

Abb. 3: Die zur Berechnung der Kräfte F zwischen zwei Leitern derselben Länge erforderlichen Kennwerte.

Beispielwerte von bei einem Kurzschluß aufgetretenen Kräften, denen zwei parallele Schienen standhalten konnten.

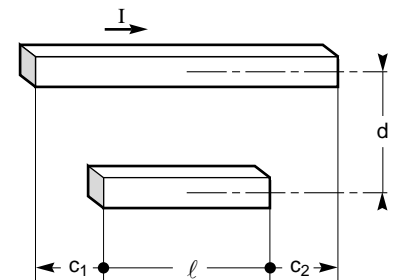


Abb. 4: Zwei Leiter ungleicher Länge

$$C = \sqrt{\left(1 + \frac{c}{\ell}\right)^2 + \frac{d^2}{\ell^2}} - \sqrt{\frac{c^2}{\ell^2} + \frac{d^2}{\ell^2}}$$

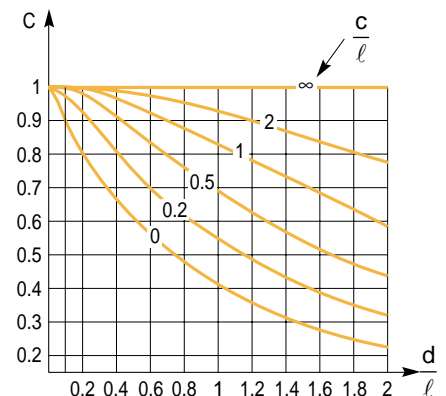


Abb. 5: Berechnung und Änderung von C in Abhängigkeit von c/ℓ und d/ℓ .

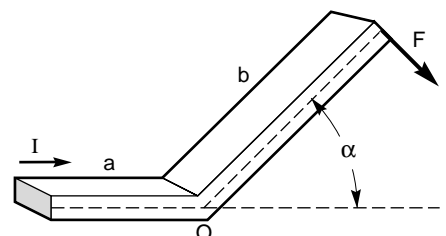


Abb. 6: Abknickend verlaufender Leiter mit den Verzweigungen a und b .

Es können dann drei Arten von Problemen auftreten, entweder allein oder zusammen:

- Die einander gegenüberliegenden Leiter befinden sich nicht in derselben Ebene: das Problem ist dreidimensional;

- Die Leiter befinden sich in der Nähe von Metallrahmen, die die Verteilung des sie umgebenden magnetischen Feldes verändern können.

- Die Leiter sind so angeordnet, daß der Skin- und Proximity-Effekt, der die Stromverteilung im Querschnitt von starren Leitern beträchtlich beeinflußt, berücksichtigt werden muß.

Bei der Berechnung der elektrodynamischen Kräfte in diesen drei Problemfällen wird auf die im Abschnitt „Entstehung und Berechnungen“ beschriebene allgemeine Annäherung zurückgegriffen. Hierbei wird zuerst der Wert und die Anordnung des magnetischen Feldes an jedem Punkt im System berechnet, und anschließend die Beanspruchung der Leiter. Wir haben es also mit einem magnetischen und einem mechanischem Problem zu tun.

Zur Anwendung kommen auch hier dieselben grundlegenden physikalischen Gesetze. Verglichen mit den einfachen Fällen, liegt hier die Schwierigkeit jedoch in der Durchführung der Berechnungen, da der dreidimensionale Aspekt eine numerische Annäherung erforderlich macht.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Methoden entwickelt, um die durch Differentialgleichungen beschriebenen Probleme numerisch zu lösen.

Insbesondere das Finite-Elemente-Verfahren, das ursprünglich zur Lösung mechanischer Probleme entwickelt wurde, fand breite Anwendung in einer ganzen Reihe von Sektoren, vor allem auf dem Gebiet des Elektromagnetismus.

Um den Berechnungsbereich festzulegen, besteht diese Methode darin, das untersuchte System in eine bestimmte Anzahl von Elementen, die durch Knoten miteinander verbunden sind, aufzuteilen. Die für uns wichtigen Größen (Magnetfeld, Beanspruchung) werden an jedem Knoten durch Anwendung der entsprechenden Gleichungen numerisch ermittelt (Maxwell und Elastizität).

Der Wert jeder untersuchten Größe ist somit nicht mehr an allen Punkten im System genau bekannt, sondern wird an den Knoten ermittelt. Aus diesem Grund muß die Verbindung zwischen diesen Knoten und dem realen System sowie eine ausreichende Vernetzung sichergestellt sein. In der Praxis setzt sich die Berechnung, die sich diese Methode zunutze macht, aus folgenden Schritten zusammen:

- Wahl der Analyseart (z. B. Magnetismus ...);

- Wahl der Elementarten, um das System zu beschreiben;

- Festlegung der Systemgestaltung und des Berechnungsbereichs unter Verwendung von Schlüsselpunkten;

- Wahl der Vernetzungsparameter und Verknüpfung des Berechnungsbereichs mit der gewählten Elementart; an diesem Punkt besteht das System

lediglich aus einer Gruppe von Knoten;

- Festlegung der Grenzbedingungen, um die Gleichungen zu lösen;
- Ausführen der Berechnungen;
- Verwendung der Ergebnisse.

Eine große Anzahl von Rechensoftware steht hierfür zur Verfügung. Die einzelnen Programme unterscheiden sich nicht nur durch ihre jeweiligen Problemgebiete, für die sie Lösungen bieten, sondern auch durch die Zuverlässigkeit ihrer Ergebnisse.

Merlin Gerin hat sich beispielsweise für die ANSYS-Software und Telemecanique Flux 2D entschieden, da diese Programme:

- es ermöglichen, sich mit sehr unterschiedlichen Problemen zu befassen (thermischen, mechanischen, elektromagnetischen Ursprungs usw.),
- und keine isolierten Lösungen bieten, sondern auch auf parallel auftretende Probleme eingehen (magnetischer und mechanischer oder mechanischer und thermischer Natur usw.).

Es ist sicherlich wahr, daß diese Methoden ein wenig mühsam erscheinen und beträchtlichen Aufwand erfordern. Doch da sie die Problematik im Zusammenhang mit Konstruktions-techniken meisterhaft beherrschen, ermöglichen sie im Gegensatz zu Tests eine rasche Bewertung des Verhaltens des Systems oder eines ihrer Teile. Dies ist besonders während der Konstruktions- und Entwicklungsphase von Bedeutung, wenn die Kosten einer Testreihe betrachtet werden.

3. Elektrodynamische Kräfte an einer Dreiphasen-Sammelschiene bei einem Zwei- oder Dreiphasen-Kurzschluß

Durch Einbeziehung bestimmter Faktoren in die in Kapitel 2 beschriebene Formel werden die Besonderheiten im Zusammenhang mit der Entstehung und der Art eines Kurzschlusses sowie die speziellen Eigenschaften von Dreiphasen-Sammelschienen bei der Entwicklung von Sammelschienen für NS-Schaltanlagen und Schienenverteiler berücksichtigt.

Diese Besonderheiten sind wie folgt:

- die relative Anordnung der Phasen (Flachleiter, gegeneinander versetzt usw.),
 - die Phasenverschiebung von Strömen in jeder Phase zueinander,
 - die Art des Kurzschlusses (zwei- oder dreiphasig),
 - die Eigenschaften, die einen Kurzschluß hervorrufen (symmetrischer oder asymmetrischer Zustand),
 - der Spitzenstromwert und
 - die wechselnden Zustände der Ströme, also der Schwingungszustand des Phänomens, das sie hervorrufen.
- In dem Teil dieses Abschnitts, in dem noch einmal speziell auf Kurzschlüsse eingegangen wird, werden nur Flachsammelschienen berücksichtigt, wobei die Phasen 1, 2 und 3 in derselben Ebene angeordnet sind und der Abstand zwischen den Phasen gleich ist.

Das Ziel ist es, durch Analyse der Änderung der elektrodynamischen Kräfte in Abhängigkeit von der Zeit und den verschiedenen oben erwähnten Parametern, den Maximalwert dieser Kräfte sowie den Leiter mit der höchsten mechanischen Beanspruchung zu bestimmen.

Da die elektrodynamischen Kräfte des Stroms proportional zum Quadrat ihrer Maximalamplitude sind, müssen die Kurzschlußströme untersucht werden.

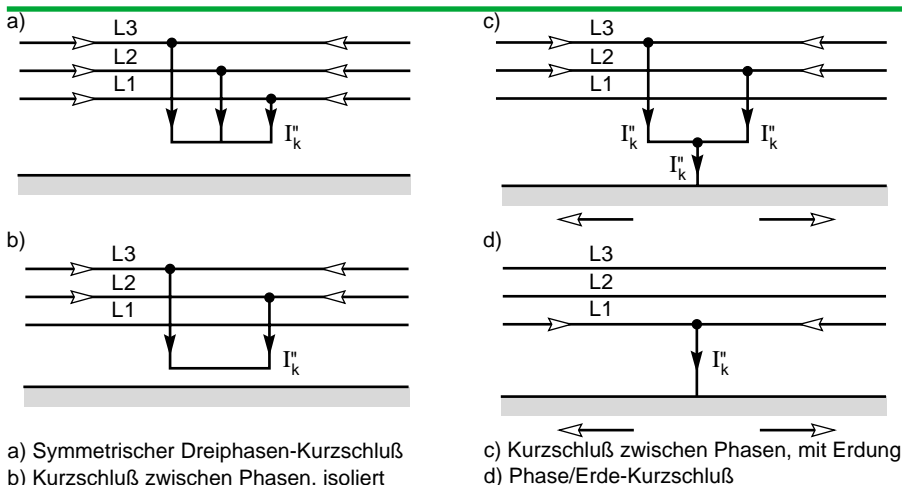
Entstehung eines Kurzschlusses

Dieser Abschnitt soll Aufschluß geben über:

- die verschiedenen Kurzschlußarten, die in einem Dreiphasen-System auftreten können,
- die Begriffe symmetrischer und asymmetrischer Zustand,
- das Verfahren zur Bestimmung der Formel für Kurzschlußströme und der Parameter, von denen sie abhängen.

Die verschiedenen Kurzschlußarten

In einem Dreiphasenleitungsnetz können vier Kurzschlußarten auftreten (s. Abb. 7).



a) Symmetrischer Dreiphasen-Kurzschluß
b) Kurzschluß zwischen Phasen, isoliert oder zweiphasig

Abb. 7: Die verschiedenen Kurzschlußarten und ihre Ströme. Die Richtung der Pfeile, die die Ströme anzeigen, sind frei gewählt (s. IEC 909).

Formel für Kurzschlußströme bei Dreiphasen-Kurzschlüssen

Wir werden uns nun nur auf symmetrische Dreiphasen-Kurzschlüsse und isolierte Zweiphasen-Kurzschlüsse konzentrieren, die den Vorteil haben, sich im stabilen Zustand wie ein oder zwei unabhängige Einphasen-Leitungsnetze zu verhalten.

Betrachten wir den auf dem Einphasendiagramm in Abb. 8 auftretenden Kurzschluß, wobei R und L ω die Impedanzen des Leitungsnetzes darstellen. Wenn wir als Ausgangspunkt den Moment nehmen, in dem der Kurzschluß auftritt, ergibt sich für die elektromagnetische Kraft (e) des Generators folgender Wert:

$$e = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \alpha)$$

wobei α der Phasenwinkel ist (s. Abb. 9), entsprechend dem zeitlichen Versatz zwischen dem Moment, in dem die elektromagnetische Kraft 0 beträgt, und dem Auftreten des Kurzschlusses.

Die Anwendung des Ohmschen Gesetzes auf den Stromkreis ergibt:

$$e = R i + L \frac{di}{dt}$$

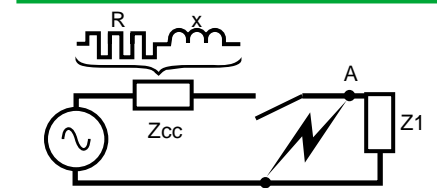


Abb. 8: Äquivalentes Einphasendiagramm bei einem Dreiphasen-Kurzschluß (s. IEC 909).

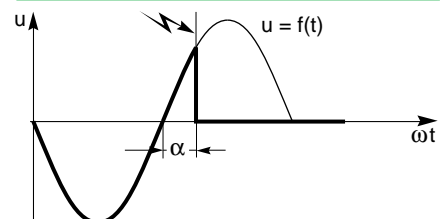


Abb. 9: Darstellung von α , auch Phasenwinkel genannt

Beträgt der Strom vor Auftreten des Kurzschlusses 0, ergibt sich für diese Gleichung folgende Lösung:

$$i(t) = \sqrt{2} I \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) e^{-t/\tau} \right]$$

wobei

$$\varphi = \arctan \frac{L \omega}{R} \text{ (Impedanzwinkel)}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

Alle Faktoren, die die Änderung des Stroms in Abhängigkeit von der Zeit darstellen, werden dann in der folgenden Gleichung zusammengefaßt:

$$\kappa = \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) e^{-t/\tau} \right]$$

Die Größe κ kann ebenfalls mit Hilfe der in der Norm IEC 909 festgelegten Näherungsformel berechnet werden:

$$\kappa = 1.02 + 0.98 e^{-\frac{3R}{L\omega}}$$

Der Unterschied zum genauen Wert ist kleiner als 0,6 %.

Die Analyse dieser Funktion ermöglicht die Festlegung des symmetrischen und asymmetrischen Zustands eines Kurzschlusses (s. techn. Heft Nr. 158). Bei einem Dreiphasensystem ergibt sich für den Strom in jeder Phase folgende Formel:

$$i_1(t) = \sqrt{2} I_{\text{rms},3\text{ph}} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) e^{-t/\tau} \right]$$

Anders ausgedrückt:

$$i_1(t) = \sqrt{2} I_{\text{rms},3\text{ph}} \kappa,$$

wobei $I_{\text{eff},3\text{ph}}$ für den symmetrischen Effektivwert des Stroms in den drei Phasen im stabilen Zustand steht.

Im Hinblick auf ihre relative Phasenverschiebung:

■ ist i_2 gleich i_1 , indem α durch $\alpha + 2\pi/3$ ersetzt wird, und

■ i_3 ist gleich i_1 , indem α durch $\alpha - 2\pi/3$ ersetzt wird.

Die elektrodynamischen Kräfte hängen schließlich ab von:

■ dem Anfangsmoment des Kurzschlusses (über den Wert von α);

■ den Eigenschaften des Stromkreises (über den Wert von φ);

■ von der Phasenverschiebung zwischen den Phasen ($2\pi/3$).

Maximale Kraft an einer Dreiphasen-Sammelschiene

Eine Dreiphasen-Sammelschiene besteht normalerweise aus drei Leitern, die nebeneinander angeordnet sind. Somit erfährt jeder Leiter über eine bestimmte Zeit t eine Kraft, die sich aus der algebraischen Addition seiner Wechselwirkung mit den zwei anderen Leitern ergibt. Diese können in dieser Anordnung nur in der Mitte oder außen liegen:

■ Außen, z. B. Phase 1:

$$F_1(t) = F_{2 \rightarrow 1}(t) + F_{3 \rightarrow 1}(t)$$

$$F_1(t) = cF [i_1(t) i_2(t) + i_1(t) i_3(t)/2]$$

cF ist abhängig vom Abstand zwischen den Sammelschienen und ihrer Form.

■ In der Mitte liegen, z. B. Phase 2:

$$F_2(t) = F_{1 \rightarrow 2}(t) - F_{3 \rightarrow 2}(t)$$

$$F_2 = cF [i_1(t) i_2(t) - i_2(t) i_3(t)]$$

Der obige Abschnitt zeigt jedoch, daß bei der Formel für den Strom viele Fälle berücksichtigt werden müssen, je nach Größe von α und φ und Art des Kurzschlusses.

Tatsächlich ist nur die Größe der max. Kräfte erforderlich, um die Sammelschienen entsprechend auslegen zu können: Dieser Wert gibt den größten Strom an, der bei $\alpha = 0$ auftritt.

Hinweis

$F_{a \rightarrow b}$ = Einwirkung (Kraft) der (des) Leiter(s) der Phase a auf den (die) Leiter der Phase b.

Dreiphasen-Kurzschluß

Die Kräfte, die auf die Leiter wirken, lassen sich wie folgt ausdrücken:

$$F_1 = 0.87 [i_1(t) i_2(t) + i_1(t) i_3(t)/2]$$

$$F_2 = 0.87 [i_1(t) i_2(t) - i_2(t) i_3(t)]$$

Die max. Kraft, die über eine bestimmte Zeit auf einen Leiter wirkt, wird durch die Zeitwerte bestimmt, die die Ableitung dieser Formeln hinsichtlich der Zeit aufheben: $dF_1/dt = 0$ und $dF_2/dt = 0$.

Es ergeben sich folglich nach wenigen Berechnungen, wobei

$$I_{\text{max},3\text{ph}} = \sqrt{2} I_{\text{eff},3\text{ph}} \kappa,$$

die zwei Gleichungen:

$$\blacksquare F_{1\text{max},3\text{ph}} =$$

$$2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,808 (\sqrt{2} I_{\text{eff},3\text{ph}} \kappa)^2 1/d$$

(bei einem außen liegenden Leiter)

$$\blacksquare F_{2\text{max},3\text{ph}} =$$

$$2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,866 (\sqrt{2} I_{\text{eff},3\text{ph}} \kappa)^2 1/d$$

(bei einem außen liegenden Leiter)

Hinweis

■ Verglichen mit der Referenzformel in Kapitel 2

$$F/l = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2/d$$

beträgt der zusätzliche Korrekturfaktor gemäß der Position des betreffenden Leiters 0,808 oder 0,866. Die max. Kraft wird somit am in der Mitte liegenden Leiter erzeugt.

■ In der Praxis berücksichtigt der Koeffizient k die Kennwerte des Stromkreises (R und L): Sein Wert bewegt sich zwischen 1 und 2 (s. Abb. 10).

Zweiphasen-Kurzschluß

In diesem Fall ist $i_1 = -i_2$, und mit Hilfe obiger Formel können wir zeigen, daß die elektrodynamischen Kräfte am größten sind, wenn $\alpha = 0$ (asymmetrischer Zustand).

$$F_{2\text{max},2\text{ph}}$$

$$= 2 \cdot 10^{-7} I (\sqrt{2} I_{\text{eff},2\text{ph}} \kappa)^2 1/d$$

Bemerkungen

Die max. Kraft tritt nicht, wie oft angenommen, bei einem Zweiphasen-, sondern bei einem Dreiphasen-Kurzschluß auf.

Tatsächlich gilt:

$$\frac{F_{2\text{max},3\text{ph}}}{F_{2\text{max},2\text{ph}}} = \frac{0.866 I_{\text{rms},3\text{ph}}^2}{I_{\text{rms},2\text{ph}}^2}$$

Bei Dreiphasenverteilung jedoch ist

$$I_{\text{rms},2\text{ph}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{rms},3\text{ph}}$$

Daraus ergibt sich folgendes Verhältnis:

$$\frac{F_{2\text{max},3\text{ph}}}{F_{2\text{max},2\text{ph}}} \approx 1.15$$

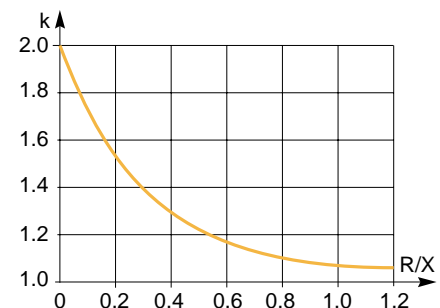


Abb. 10: Änderung des Faktors k in Abhängigkeit vom Koeffizienten R/X .

Prüfstellen verlangen häufig Zwei- und Dreiphasentests mit identischen Stromwerten. Diese Testbedingungen entsprechen jedoch nicht den realen Verteilungskennwerten und bringen oft Zweiphasenkräfte hervor, die größer als die Dreiphasenkräfte sind.

Resonanzphänomen

Kräfte, die bei einem Kurzschluß auftreten, stellen kein statisches Phänomen dar, sondern schwingende Größen einer Frequenz, die doppelt so groß wie die des Leitungsnetzes ist, oder diese sogar um ein Vielfaches übersteigt. Leiter, die eine bestimmte Elastizität aufweisen, können dann anfangen zu schwingen. Entspricht die Schwingungsfrequenz der natürlichen Frequenz aller Leiter, tritt das Resonanzphänomen auf. Die in diesem Fall auftretende Beanspruchung des Leiters kann sehr viel größer sein als die, die durch die Kräfte, die vom Wert des Spitzenstroms abhängen, hervorgerufen wird. Es ist folglich notwendig, das Verhältnis zwischen den realen und statischen Kräften, denen der Leiter ausgesetzt wird, zu bestimmen. Die herkömmliche Bezeichnung für dieses Verhältnis ist V_{σ} und stellt den Beanspruchungsfaktor dar. Zusätzlich zu den mechanischen Eigenschaften der Leiter müssen wir auch die Art und Weise, wie sie in der Vorrichtung, in der sie sich befinden, befestigt sind (NS-Schaltanlage, Schienenverteiler usw.) berücksichtigen. Wir müssen uns daher mit der „**Struktur**“ der **Sammelschiene** befassen.

Es gibt standardmäßig zwei Befestigungsmethoden für Sammelschienen: Einbau oder einfacher Träger. Da jedoch in Wirklichkeit die Isolierelemente die Leiter tragen, müssen diese beiden Methoden miteinander kombiniert werden (s. Abb. 11). Die große Anzahl der zu berücksichtigenden Parametern macht eine vollständige Untersuchung dieser Phänomene sehr komplex.

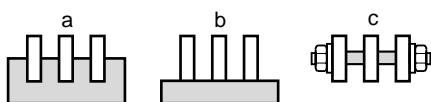


Abb. 11: Die verschiedenen Befestigungsmethoden für Sammelschienen: Einbau (a), einfacher Träger (b) und eine Kombination beider Methoden (c).

Der Ausgangspunkt für eine derartige Untersuchung ist die Anwendung der allgemeinen Gleichung auf einen Leiter, der sich elastisch verhalten soll:

$$F(t) = M \frac{\delta y^2}{\delta t^2} + \lambda \frac{\delta y}{\delta t} + E J \frac{\delta y^4}{\delta x^4},$$

wobei

M = Masse des Leiters pro Längeneinheit,
 J = Trägheitsmoment des Querschnitts senkrecht zur Leiterachse,

E = Elastizitätswert

λ = Dämpfungskoeffizient,

y = Abstand von einem Punkt des Leiters in bezug auf seine Ruhelage oder seine Durchbiegung,

x = Abstand von einem Punkt des Leiters in bezug auf ein Festlager,

t = Zeit,

wobei $F(t) = F_0 \sin(2 \omega t)$ und

F_0 = Amplitude der Kraft,

ω = Kreisfrequenz ($\omega = 2 \pi f$).

Es ergibt sich folgende Lösung:

$y = \text{konstante } F_k(t) G_k(x)$,

wobei die Funktionen $F_k(t)$ und $G_k(x)$ jeweils von den Zeit- und Raumvariablen abhängen, sowie von:

- den Befestigungsmethoden,
- der elektrodynamischen Kraft im Zusammenhang mit dem Kurzschlußstatus (symmetrisch oder asymmetrisch).

Die vollständige Untersuchung wurde von Baltensperger durchgeführt und ergibt folgende Formel für die natürlichen Resonanzfrequenzen eines Leiters:

$$\omega_{ok} = \frac{S_k^2}{p^2} \sqrt{\frac{E J}{M}},$$

wobei

S_k = Koeffizientenfunktion der Befestigungsmethode, zum Beispiel bei einer an ihren Enden eingebauten Schiene:

$$S_k = (4k - 1) \pi / 2;$$

k = Ordnungszahl der Resonanzfrequenz;

p = Abstand zwischen den Trägern.

In der Praxis können wir beobachten, daß die natürlichen Leiterfrequenzen bei einem spezifischen Querschnitt von dem Längsabstand zwischen den Trägern abhängt.

Die Berechnung zielt daher darauf ab, zu untersuchen, ob der Beanspruchungsfaktor, der sich aus dem gewählten Abstand zwischen den Trägern ergibt, für die natürliche Frequenz des Leiters oder aller Leiter annehmbar ist. Es ergibt sich folgender Koeffizient R , der mit einer Länge homogen ist:

$$R = \sqrt[4]{\frac{E J}{M \omega^2}} \cdot 10^3$$

Das Diagramm in Abb. 12 zeigt den voraussichtlichen Beanspruchungsfaktor V_{σ} in Abhängigkeit von p/R , d. h. von dem Abstand p zwischen den Trägern. p muß so gewählt werden, daß sich das Ergebnis von p/R außerhalb des schattierten Bereichs für den angenommenen Faktor V_{σ} liegt.

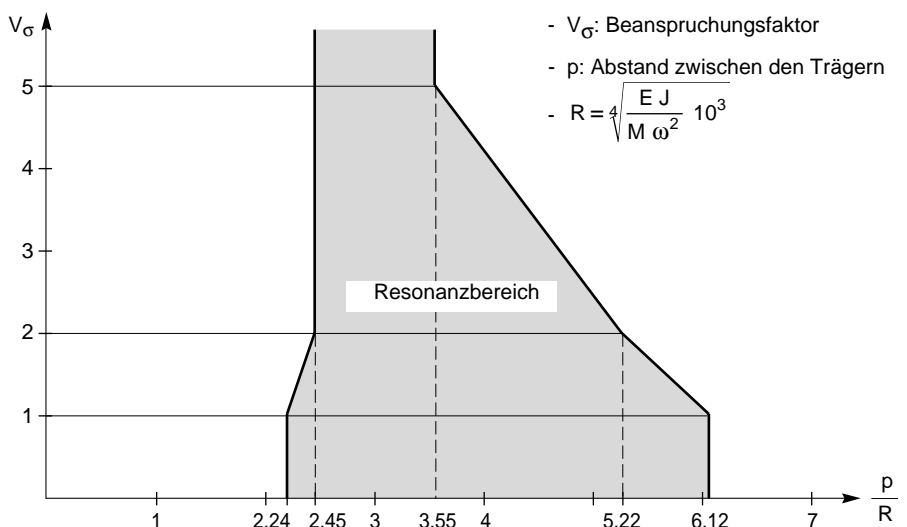


Abb. 12: Voraussichtl. Beanspruchungsfaktor V_{σ} in Abhängigkeit von p/R .

4. Anwendung auf Niederspannungs-Dreiphasen-Sammelschienen

In diesem Kapitel legen die Verfasser fest, wie die zuvor dargelegten theoretischen Erwägungen bei zwei NS-Systemteilen, und zwar den Schaltanlagen vom Typ Masterbloc und Schienenverteilern des Typs Canalis zum Tragen kommen.

Sammelschienen in Niederspannungs-Schaltanlagen

Die Dreiphasen-Sammelschiene einer NS-Schaltanlage besteht aus einer Gruppe von nach Phasen geordneten Leitern, die durch Träger in ihrer Position gehalten werden.

Ihre Eigenschaften hängen ab von:

- der Form der Leiter,
- der relativen Anordnung der Phasen,
- der Anordnung der Leiter in derselben Phase,
- der Trägerart und der Befestigungsmethode für den Leiter (Isolierschienen, Käbme, Isolierstäbe).

Die verschiedenen Teile des Sammelschienensystems müssen so ausgelegt sein, daß sie den elektrodynamischen Kräften, die bei einem Kurzschluß auftreten, standhalten (s. Abb. 13).

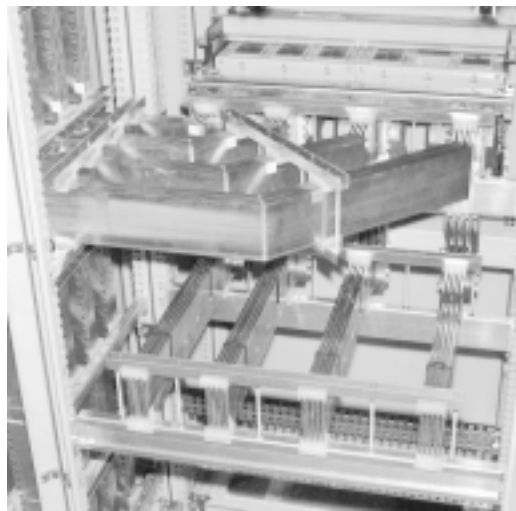
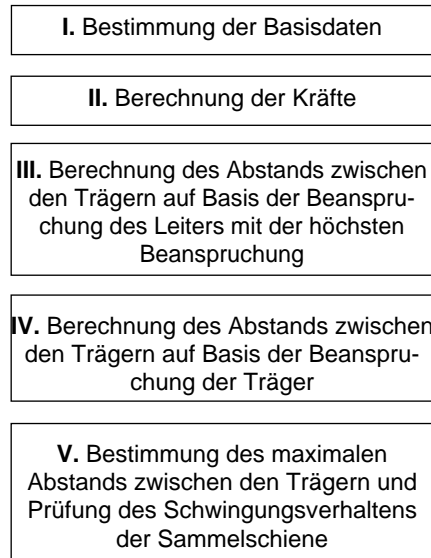


Abb. 13: Sammelschiene einer Masterbloc-NS-Schaltanlage, ausgelegt für Kurzschlußströme der Größenordnung 80 kA (Merlin Gerin).

In der Praxis muß hierfür der Abstand zwischen den Trägern und somit auch ihre für eine spezielle Sammelschiene und Trägertechnik erforderliche Anzahl bestimmt werden.

Praktische Berechnungsschritte

Die zu befolgende Methode wird im folgenden Diagramm zusammengefaßt:



Die Berechnung im Fall einer Sammelschiene, die aus mehreren Schienen pro Phase mit rechteckigem Querschnitt besteht, wird im folgenden Schritt für Schritt beschrieben.

I - Basisdaten zur Durchführung der Berechnung

- Abmessungen und Form eines Leiters (z. B. bei einer Schiene die Stärke a und ihre Breite b in m .)

- Anzahl der Leiter pro Phase: n .

- Effektivwert des Kurzschlußstroms I_{sc} in kA .

- Art des Kurzschlusses: zwei- oder dreiphasig

- Abstand zwischen den Phasenachsen: d_{ph} in m .

- Leiterbefestigungsmethode an den Trägern (Einbau oder einfacher Träger).

Diese Daten werden von einem Koeffizient β berücksichtigt:

$\beta = \beta_1$ für alle Leiter einer Phase,

$\beta = \beta_2$ für einen Leiter, der zu einer Phase gehört,

- Elastizitätsgrenze eines Leiters:

$R_{p0,2}$ in N/m^2

($R_{p0,2} = 125 \times 10^6 N/m^2$ für 1050

Aluminium und $R_{p0,2} = 250 \times 10^6 N/m^2$ für Kupfer).

- Kenndaten der Träger: mechanische Festigkeit R_m (in N/m^2) je nach Art der Beanspruchung und Querschnitt des beanspruchten Trägers S_m (in m^2).

II - Berechnung der Kräfte

Jeder Leiter einer Phase wird infolge der Wechselwirkungen zwischen den Phasen und den Einflüssen der anderen Leitern derselben Phase einer Kraft ausgesetzt. Die größte Kraft wirkt dabei auf die ganz außen liegenden Leiter der mittleren Phase.

Auf den Leiter wirken folgende Kräfte:

- Erstens die Kraft, die aus den beiden anderen Phasen resultiert:

$$F_1 / \ell$$

$$= 0,87 \text{ (o. } 1) \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot k_1 \cdot (2,2 I_{sc})^2 \cdot 1/d_{ph}$$

0,87: bei Dreiphasen-Kurzschluß

1: bei Zweiphasen-Kurzschluß

(Kraft pro Längeneinheit der Sammelschiene in **N/m**).

k_1 = Koeffizient von Dwight, der die Form aller Leiter der Phase berücksichtigt.

Dieser Koeffizient, der von den Verhältniszahlen Höhe (h)/Breite einer Phase (I') und d_{ph} /Breite einer Phase abhängt, kann berechnet oder bestimmten Diagrammen entnommen werden.

I_{sc} = Effektivwert des Kurzschlußstroms in **kA**.

d_{ph} = Abstand zwischen den Phasenachsen in **m**.

Zur Berechnung des Höchstwerts des Kurzschlußstroms wird der Stoßfaktor $n = 2,2$ verwendet.

■ und zweitens die Anziehungskraft (Strom verläuft in dieselbe Richtung), die von den anderen Leitern der betreffenden Phase (s. Abb. 14) herrührt, wenn diese mechanisch miteinander verbunden sind:

$$F2 / \ell = \sum_i F2_{1 \rightarrow i} / \ell \quad (\text{in } \mathbf{N/m})$$

Die Gleichung entspricht der zuvor beschriebenen, berücksichtigt aber die folgenden drei Parameter:

$d_{1 \rightarrow i}$ = Achsenabstand zwischen Leiter 1 und Leiter i in **m**,

n = Anzahl der Leiter pro Phase,

k_2 = Koeffizient von Dwight für den Phasenleiter

III - Berechnung des Abstands zwischen den Trägern auf Basis der Beanspruchung des Leiters mit der höchsten Beanspruchung

Der Leiter mit der höchsten Beanspruchung muß für folgende Belastung ausgelegt sein:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

$$= \frac{\beta_1 (F1 / \ell) d_1^2}{8 Z} + \frac{\beta_2 (F2 / \ell) d_1^2}{8 Z_0}$$

$F1 / \ell$ und $F2 / \ell$ = Kräfte in **N/m**,

d_1 = Abstand zw. zwei Trägern in **m**,

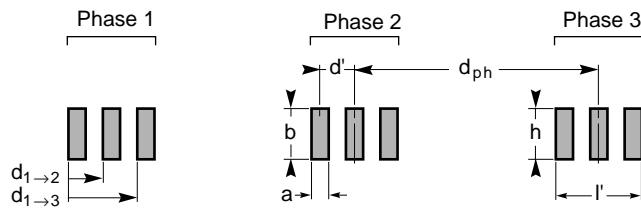
Z_0 = Widerstandswert einer Schiene in **m³**,

Z = Widerstandswert einer Phase in **m³**,

$\beta_1 = 0,73$ (Koeffizient bei einfachem Träger),

$\beta_2 = 0,5$ (Koeffizient bei Einbau).

Bei diesen Größen handelt es sich um Richtwerte für eine spezifische Sammelschienenkonfiguration. Die



Hierbei ist $b = h$

$$k_1 = f(h, I', d_{ph})$$

$$k_2 = f(a, b, d')$$

Abb. 14: Die bei der Aufstellung der Gleichung für die Anziehungskraft zwischen den Sammelschienenleitern berücksichtigten Parameter

Schienen derselben Phase sind eingebaut und die drei Phasen positioniert (s. Abb. 15).

Kriterium der „Sammelschienenverformung“

Auch die Schiene mit der höchsten Beanspruchung darf sich nicht verformen. Eine leichte Restverformung ist jedoch gemäß dem Koeffizient q , der durch die Norm IEC 865 festgelegt wird, zulässig.

Die oben angeführte Formel beinhaltet die Größe d_1 . Sie gibt den Abstand zwischen den Trägern an, und kann mit Hilfe der maximalen Beanspruchungsintensität an den Leitern, die nicht überschritten werden sollte, bestimmt werden, so daß

$$\sigma = q \cdot R_{p0,2} \quad (\text{zum Beispiel } q = 1,5).$$

IV - Berechnung des Abstands zwischen den Trägern auf Basis der Beanspruchung der Träger

Die Träger müssen daher der im Zusammenhang mit der Kraft $F1$ stehenden Beanspruchung standhalten.

Kriterium des „Trägerbruchs“:

$$d_2 = \frac{R_m S_m}{\alpha F1 / \ell},$$

wobei

α = eine Konstante ist, deren Wert von der Befestigungsmethode und der Anzahl der Träger abhängt.

V - Bestimmung des maximalen Abstands zwischen den Trägern und Prüfung des Schwingungsverhaltens der Sammelschiene

Um elektrodynamischen Kräften standhalten zu können, muß der Abstand d zwischen den Trägern gleich dem kleinsten Wert von d_1 und d_2 sein: $d \leq \min(d_1, d_2)$.

Außerdem muß sichergestellt sein, daß bei diesem Abstand nicht das Resonanzphänomen auftritt.

Diese Berechnung entspricht den Empfehlungen der Norm IEC 865 (1986), deren Inhalt die Berechnung der Auswirkungen von Kurzschlußströmen unter Berücksichtigung thermischer und mechanischer Aspekte ist.

Obwohl diese Berechnungen keinen Ersatz für Feldversuche darstellen können, sind sie bei der Entwicklung neuer Produkte und in Sonderfällen trotzdem von großer Wichtigkeit.

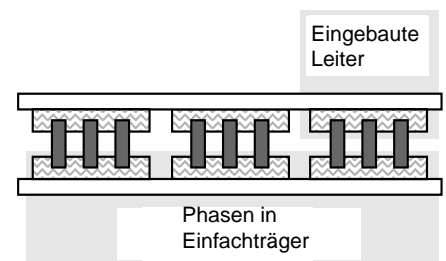


Abb. 15: Konfiguration einer Sammelschiene mit den Koeffizienten $\beta_1 = 0,73$ (bei einfacher Abstützung) und $\beta_2 = 0,5$ (bei Einbau).

Rechenbeispiel

I. Bestimmung der Basisdaten

- Leiter
- Flache Kupferschienen
- Stärke **a = 5 mm**
- Breite **b = 100 mm**
- Befestigungsart: **eingebaute Schienen**
- Jede Phase besteht aus
- n = 3** Schienen, Abstand zueinander: 5 mm ($d' = 10$ mm)
- Abstand zwischen den Phasenachsen
- d_{ph} = 95 mm**
- Dreiphasen-Kurzschluß **I_{sc} = 80 kA eff**
- Elastizitätsgrenze von Kupfer
- R_{p0,2} = 250 x 10⁶ N/m²**
- Mechanische Festigkeit des Trägers
- R_m = 100 x 10⁶ N/m²**
- Querschnitt des Trägers bei Zugbeanspruchung
- S_m = 150 x 10⁻⁶ m²**

II. Berechnung der Kräfte

■ zwischen den Phasen

- $F1/\ell = 0,87 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot k1 \cdot (2,2 \cdot I_{sc})^2 \cdot 1/d_{ph}$
 k1: Koeffizient von Dwight, in Abhängigkeit von den
 Verhältniszahlen $b/(2n - 1) \cdot a$
 und $d_{ph}/(2n - 1) \cdot a$
 $k1(100/5 \cdot 5, 95/5 \cdot 5) = 0,873$

■ zwischen den Schienen derselben Phase

insbesondere an den äußeren Schienen der mittleren Phase

$$F2/\ell = \sum_i F2_{1,i}/\ell$$

1 Kennzahl der ersten Schiene

i = 2 und 3, Kennzahl der zwei anderen Schienen der Phase

$$F2_{1,i}/\ell = 2 \cdot 10^{-7} \cdot k2_{1,i} \cdot (2,2 \cdot I_{sc}/n)^2 \cdot 1/d$$

$d_{1 \rightarrow i}$: Abstand zwischen den Achsen der Schienen 1 und i

$k2_{1,i}$: Koeffizient von Dwight, abhängig von den

Verhältniszahlen b/a und $d_{1 \rightarrow i}/a$

$$k2_{1,2}(100/5, 10/5) = 0,248$$

$$k2_{1,3}(100/5, 20/5) = 0,419$$

III. Berechnung des Abstands zwischen den Trägern auf Basis der Beanspruchung des Leiters mit der höchsten Beanspruchung (Elastizitätsgrenze des Leiters)

$$\sigma = \beta_1 (F1/\ell) \cdot d_1^2/8 \cdot Z + \beta_2 (F2/\ell) \cdot d_1^2/8 \cdot Z_0$$

$$\sigma = 1,5 \cdot R_{p0,2}$$

$$d_1^2 = 1,5 \cdot R_{p0,2} / [\beta_1 (F1/\ell)/8 \cdot Z + \beta_2 (F2/\ell)/8 \cdot Z_0]$$

$$\beta_1 = \beta_2 = 0,5$$

$$Z_0 = b \cdot a^2/6 = 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$Z = n \cdot Z_0 = 3 \cdot Z_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

IV. Berechnung des Abstands zwischen den Trägern auf Basis der Beanspruchung der Träger (Elastizitätsgrenze der Leiter)

$$d_2 = R_m \cdot S_m / (F1/\ell)$$

$$\alpha = 0,5$$

V. Bestimmung des maximalen Abstands zwischen den Trägern

d = kleinster Wert von d₁ und d₂

$$F1/\ell = 0,87 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,873 \cdot (2,2 \cdot 80 \cdot 10^3)^2 \cdot 1/95 \cdot 10^{-3}$$

$$F1/\ell = 49.530 \text{ N/m} = \mathbf{4.953 \text{ daN/m}}$$

$$F2/\ell = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (2,2 \cdot 80 \cdot 10^3/n)^2 \cdot [0,248/10 \cdot 10^{-3} + 0,419/20 \cdot 10^{-3}]$$

$$F2/\ell = 31.490 \text{ N/m} = \mathbf{3.149 \text{ daN/m}}$$

$$d_1^2 = 1,5 \cdot 250 \cdot 10^6 / [0,5 \cdot (49.530)/8 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6} + 0,5 \cdot (31.490)/8 \cdot 4,2 \cdot 10^{-7}]$$

$$d_1 = 0,229 \text{ m} = \mathbf{229 \text{ mm}}$$

$$d_2 = 100 \cdot 10^6 \cdot 150 \cdot 10^{-6} / (0,5 \cdot 49.530)$$

$$d_2 = 0,604 \text{ m} = \mathbf{604 \text{ mm}}$$

$$d < \mathbf{229 \text{ mm}}$$

Normen und Tests

Für Niederspannungsgeräte existieren zwei Testarten, und zwar

- konstruktionsunterstützende Entwicklungstests und
- Zertifizierungstests

Die letzteren sind Teil einer Gruppe sogenannter „Typprüfungen“, deren Testberichte für Produkte mit der Bezeichnung „Typgeprüfte Schaltgerätekombinationen“ (TSK) häufig verlangt werden.

Diese Bezeichnung, die entsprechende Tests erforderlich macht, stellt somit für den Anwender eine zusätzliche Garantie dar. Trotz dieser Auflage gelingt es den Herstellern, Produkte zu entwickeln, die es ihnen erlauben, ihr Know-how aufzuwerten.

Die Anzahl der in den Normen IEC 439-1 (1992) und 2 (1987) oder NF 63-421 (1991) festgelegten Typprüfungen beläuft sich auf jeweils 7 (439-1) und 10 (439-2).

Diese Normen legen hinsichtlich der Kurzschlußstromfestigkeit, die Inhalt dieser Veröffentlichung ist, die Testbedingungen sowie den standardisierten Wert des Koeffizienten fest, bei dem der Höchstwert mit dem Effektivwert des Kurzschlußstroms in Relation gesetzt wird (s. Abb. 16).

Unterscheidet sich das betreffende System nur geringfügig von dem Referenzsystem (TSK), wird es als „Partiell typgeprüfte Schaltgerätekombination“ (PTSK) bezeichnet und kann durch Berechnung aus einer typgeprüften Schaltgerätekombination bewertet werden.

Hinsichtlich der Kurzschlußstromfestigkeit wurde im technischen Bericht IEC 1117 (1992) eine Extrapolationsmethode für die partiell typgeprüften Schaltgerätekombinationen festgelegt. Zur vollständigen Zertifizierung im Hinblick auf Kurzschlußstromfestigkeit sind folgende drei Tests notwendig:

- Festigkeitsprüfung bei Dreiphasen-Kurzschlußstrom;
- Festigkeitsprüfung bei einem Kurzschlußstrom zwischen der neutralen und der am nächsten gelegenen Phase. Dabei muß beachtet werden, daß dieser Test einer Festigkeitsprüfung bei Zweiphasen-Kurzschlußstrom entspricht, wenn die neutrale Phase denselben Querschnitt wie die anderen Phasen hat und wenn der Abstand zwischen der neutralen und der am nächsten gelegenen Phase gleich dem Abstand zwischen den Phasen ist;
- Festigkeitsprüfung bei einem Kurzschlußstrom zwischen einer Phase und dem Schutzleiter.

Für jeden Test muß der Hersteller den Effektivwert des Kurzschlußstroms und seine Dauer angeben, die normalerweise 1 s beträgt (zur Prüfung der thermischen Beanspruchung im Zusammenhang mit dem Kurzschlußstrom).

Was den Wert des Kurzschlußstroms im Dreiphasentest angeht, so müssen hier zwei Größen bestimmt werden: **der voraussichtliche und der reale Wert.**

Der Unterschied zwischen den beiden Werten hängt davon ab, ob bei der Berechnung der Scheinwiderstand der Sammelschiene berücksichtigt wurde oder nicht. In der Praxis:

- Die Berechnung erfolgt bei einer Spannung, die gleich der Betriebsspannung ist, am Eingang zur Schaltanlage ⇒ angenommener Wert I_{sc} ;
- Die Berechnung erfolgt bei besonders niedriger Spannung am Ende der Sammelschiene am Kurzschlußpunkt ⇒ realer Wert.

Es ist offensichtlich, daß für denselben angegebenen Wert der Kurzschlußstromstärke der zweite Fall weit größere Beschränkungen auferlegt. Der Unterschied beträgt 20 bis 30 %, je nach Stromkreis. Beim Kurzschlußtest „Phasenleiter-Neutralleiter“ beträgt der Wert des Kurzschlußstroms 60 % der (voraussichtlichen oder realen) Stromstärke des Dreiphasentests.

Zahlreiche Hersteller (einschl. Schneider Electric) tendieren derzeit dazu, diese Tests unter Zuhilfenahme der realen Stromwerte durchzuführen. Außerdem müssen folgende Punkte beachtet werden, um zu gewährleisten, daß diese Tests auch für die ungünstigsten Bedingungen während eines Kurzschlusses repräsentativ sind:

- Asymmetrischer Zustand an wenigstens einer der drei Phasen;
- Mindestens eine Verbindungsstelle an der getesteten Sammelschiene bzw. des Schienenverteilers;
- Erzeugen eines metallischen Kurzschlusses;
- Berücksichtigung der Schwingungsphänomene, wobei der Kurzschluß über mindestens 10 Perioden (d. h. 200 ms bei 50 Hz) aufrechterhalten wird. Diese Testdauer wird oft auf 1 s erhöht, um gleichzeitig die thermische Festigkeit zu prüfen (IEC 439-1).

Die verschiedenen Testschritte sind:

- Kurzschließen der Anschlußpunkte der Testeinrichtung;
- Verbinden der Sammelschiene bzw. des Schienenverteilers mit den Anschlußpunkten der Testeinrichtung;
- Herstellen des Kurzschlusses am Prüfling;
- Einstellung des Kurzschlußstromes;
- Öffnen des Kurzschlusses an den Anschlußpunkten der Testeinrichtung und Durchführen eines Fertigkeitstests mit einer Testdauer von 1 s am Prüfling.

Effektivwert des Kurzschlußstroms (kA)	$\cos \varphi$	n
$I \leq 5$	0.7	1.5
$5 < I \leq 10$	0.5	1.7
$10 < I \leq 20$	0.3	2
$20 < I \leq 50$	0.25	2.1
$50 < I$	0.2	2.2

Abb. 16 : Standardisierter Wert des Koeffizienten n, der den Höchstwert mit dem Effektivwert des Kurzschlußstroms in Relation setzt; n entspricht dem in Kapitel 3 (d. h. in der Norm IEC 439-1) definierten Koeffizient $\sqrt{2} \kappa$.

Canalis Schienenverteiler

Bei der Konstruktion von Schienenverteiler Canalis zur Übertragung und Verteilung von Strom (s. Abb. 17) werden die Vorgaben besonderer Verfahrensweisen und spezifischer Normen, von denen die wichtigsten die Normen IEC 439-1 und 2 (international) sind, erfüllt.

Ausführung

Die hierbei angewandten Techniken hängen von den zu berücksichtigenden Stromstärken ab, besonders bei hohen Stromstärken von über 100 A.

Die wichtigsten Ausführungen sind derzeit:

- Standardausführung
- Sandwich-Ausführung
- Flachausführung.

■ Standardausführung (100 bis 800 A)

Die Leiter werden in einem Metallgehäuse untergebracht und mit Hilfe kammförmiger Isolatoren in gleichmäßigem Abstand angeordnet (s. Abb. 18).

Die bei Kurzschlüssen auftretenden elektrodynamischen Kräfte verhalten sich gemäß den oben erwähnten Gesetzmäßigkeiten. Sie erzeugen bei

den Leitern Durchbiegung und rufen eine Schwingung des gesamten Systems hervor.

Bei der Wahl der Form und des Querschnitts der Leiter sind folgende Aspekte berücksichtigt und so gut wie möglich in Einklang miteinander gebracht worden:

- Temperaturanstieg in den Leitern;
- annehmbarer Spannungsfall;
- Produktionskosten.

Die wichtigsten Anforderungen an die mechanische Festigkeit sind wie folgt: Die Durchbiegung des Leiters bleibt elastisch (keine permanente Verformung nach einem Kurzschluß) und beeinträchtigt in der Kurzschlußphase, während der die elektrodynamischen Phänomene auftreten, nicht übermäßig die Isolationseigenschaften.

In der Praxis wird dies durch den richtigen Abstand zwischen den Isolatoren erreicht.

■ Sandwichschienen-Ausführung (1000 - 5000 A): Bei Stromstärken über 1000 A wird der Strom derselben Phase über mehrere Leiter verteilt, um noch gute Wärmeaustauschbedingungen und Schienenverteilerabmessungen zu erreichen.

In einigen Schienenverteilern werden bis zu 5 Leiter pro Phase in Sandwichanordnung zusammengefaßt.

Die Entwickler können dann entscheiden, ob sie:

- die Leiter derselben Phase zusammen lassen,
- oder die elementaren Phasenleiter in einer ordentlichen Reihenfolge festlegen, um die (1-2-3) + (1-2-3) + (1-2-3) „Sandwich“-Konfiguration zu erhalten (s. Abb. 18).

Diese Ausführung eignet sich ideal für die Verteilung in horizontaler Verlegeart.

■ Flachausführung (1000-5000 A):

Bei dieser Ausführung sind die von einem Isoliermantel umgebenen Leiter, die über einen rechteckigen Querschnitt verfügen, über die gesamte Länge des Schienenverteilers hinweg miteinander verbunden (s. Abb. 18). Um den notwendigen Wärmeaustausch zu gewährleisten, sind die Leiter in einem Gehäuse eingebettet, das die Kühlung gewährleistet.

Um die Herstellung zu vereinfachen, haben Leiter normalerweise dieselbe Stärke, und nur ihre Breite variiert je nach Nennstromstärke der Sammelschienen (bis ca. 250 mm). Bei hohen Stromstärken sind zwei oder sogar drei Leiter pro Phase erforderlich, die aber nicht im Sandwichsystem angeordnet sein müssen.

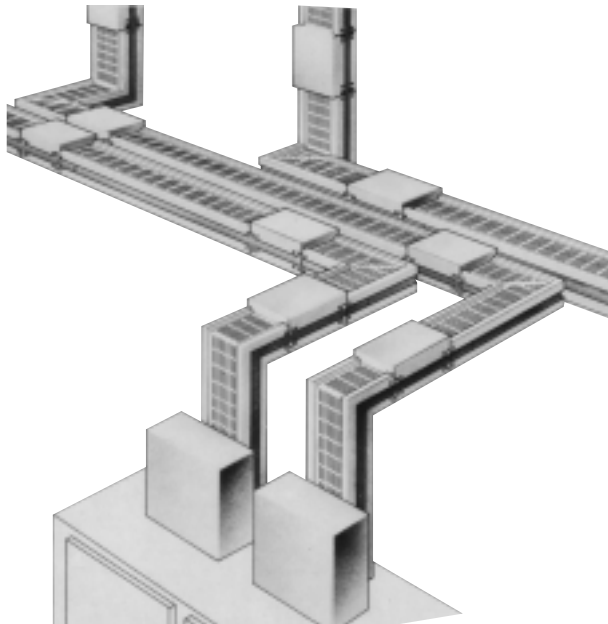


Abb. 17: Canalis Schienenverteiler (Telemecanique) zur Verteilung elektrischer Energie.

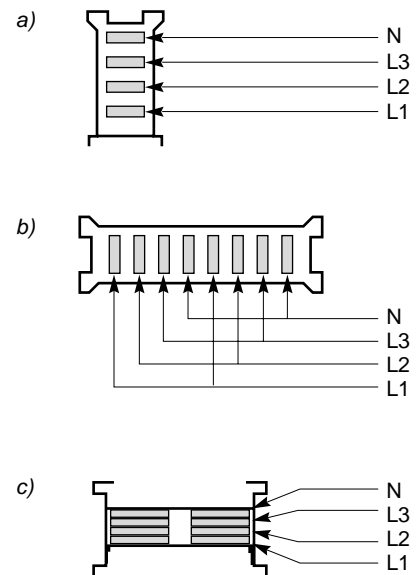


Abb. 18: Die verschiedenen Ausführungen eines Schienenverteilers: Standardausführung (a), Sandwich- (b) und Kompaktschienen-Ausführung (c).

Die elektrodynamischen Kräfte, die bei einem Kurzschluß auftreten, werden in diesen Schienenverteilern durch das Verhalten des metallischen Gehäuses ausgeglichen.

Aufgrund des Wärmeverhaltens eignet sich diese Ausführung ideal zur Übertragung von horizontalem und vertikalem Strom.

Verteilung elektrodynamischer Kräfte

Dieser Abschnitt führt ein einfaches und konkretes Beispiel an, um die verschiedenen Kräfte, denen Leiter ausgesetzt sind, zu veranschaulichen und ihre Größen zu bestimmen.

Die untersuchte Struktur hat folgende Kennwerte:

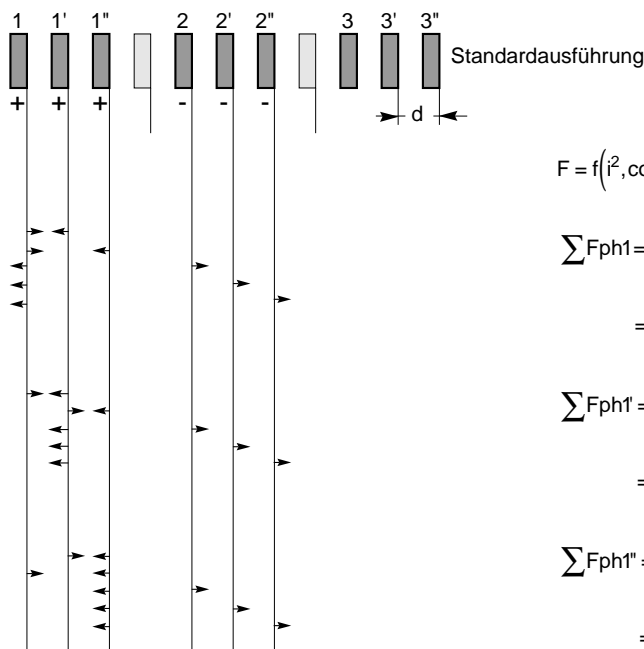
- $I_n = 3000 \text{ A}$,
- Drei Leiter/Phase, i.e. 1000 A/Leiter ,
- Leiterquerschnitt = $90 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,
- Material = Aluminium oder Kupfer,
- Abstand zwischen den Leiterachsen = 18 mm .

Mit Hilfe der in Abbildung 19 dargestellten Berechnung läßt sich die mechanische Beanspruchung der elementaren Leiter (je nach Stromrichtung) der Phasen 1 und 2 bei einem Zweiphasen-Kurzschluß der Phase 1/Phase 2 mit Korrektur der

geometrischen Anordnung (Inzidenz) in Übereinstimmung mit dem Dwight-Diagramm bewerten.

Teilschlußfolgerungen:

Bei der Standardausführung zeigt sich ein Anstieg und eine breite Streuung der Kräfte, denen die verschiedenen Leitelemente ausgesetzt wurden. Bei der Sandwichschienen-Ausführung hingegen bleiben die Kräfte an jedem Leiterteil mehr oder weniger gleich. Bei diesem Beispiel beträgt die mechanische Beanspruchung der Sandwichschienen-Ausführung nur ein Fünftel der Beanspruchung der Standardausführung.

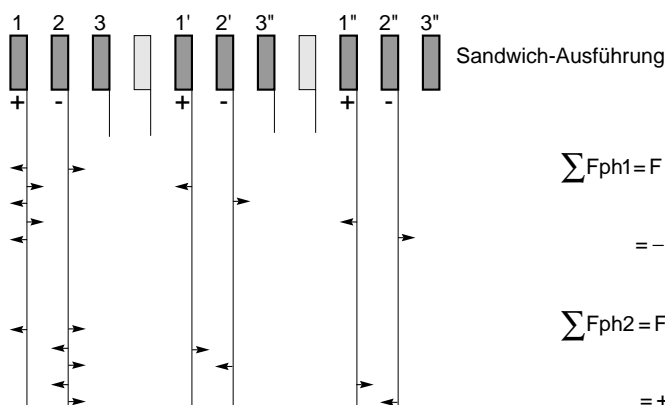


$$F = f(i^2, \cos\varphi) \text{ mit } i = I/3$$

$$\begin{aligned} \sum F_{ph1} &= F \left[\left(\frac{1}{d} \cdot 0.42 \right) + \left(\frac{1}{2d} \cdot 0.62 \right) - \left(\frac{1}{4d} \cdot 0.83 \right) - \left(\frac{1}{5d} \cdot 0.87 \right) - \left(\frac{1}{6d} \cdot 0.92 \right) \right] \\ &= \frac{F}{d} \cdot 0.19 \Rightarrow K1 = 0.19 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum F_{ph1'} &= F \left[\left(-\frac{1}{d} \cdot 0.42 \right) + \left(\frac{1}{d} \cdot 0.42 \right) - \left(\frac{1}{3d} \cdot 0.75 \right) - \left(\frac{1}{4d} \cdot 0.83 \right) - \left(\frac{1}{5d} \cdot 0.87 \right) \right] \\ &= -\frac{F}{d} \cdot 0.63 \Rightarrow K1' = 0.63 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum F_{ph1''} &= F \left[\left(-\frac{1}{d} \cdot 0.42 \right) + \left(\frac{1}{2d} \cdot 0.62 \right) - \left(\frac{1}{2d} \cdot 0.62 \right) - \left(\frac{1}{3d} \cdot 0.75 \right) - \left(\frac{1}{4d} \cdot 0.83 \right) \right] \\ &= -\frac{F}{d} \cdot 1.49 \Rightarrow K1'' = 1.49 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \sum F_{ph1} &= F \left[-\left(\frac{1}{d} \cdot 0.42 \right) + \left(\frac{1}{4d} \cdot 0.83 \right) - \left(\frac{1}{5d} \cdot 0.87 \right) - \left(\frac{1}{8d} \cdot 1 \right) - \left(\frac{1}{9d} \cdot 1 \right) \right] \\ &= -\frac{F}{d} \cdot 0.37 \Rightarrow K1 = 0.37 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum F_{ph2} &= F \left[+\left(\frac{1}{d} \cdot 0.42 \right) - \left(\frac{1}{3d} \cdot 0.75 \right) + \left(\frac{1}{4d} \cdot 0.83 \right) - \left(\frac{1}{7d} \cdot 0.97 \right) + \left(\frac{1}{8d} \cdot 1 \right) \right] \\ &= +\frac{F}{d} \cdot 0.36 \Rightarrow K2 = 0.36 \end{aligned}$$

Abb. 19: Mechanische Beanspruchung von elementaren Leitern der Phase 1 und 2.

Das Sandwichsystem bietet außerdem noch einen weiteren Vorteil, was den Spannungsfall betrifft: Die „Sandwichschienen“-Anordnung von Phasen verringert die resultierende magnetische Induktion und somit den induktiven Blindwiderstand, d. h. auch den Spannungsfall.

Abzweigungen und Splicing

Zur Entnahme von Strom an den Abzweigungen oder um Strom in die einzelnen Schienen eines Schienenverteilers zu leiten, werden normalerweise die folgenden zwei Techniken angewandt: die „Schraubtechnik“ und die „Kontakttechnik“.

■ Schraubtechnik

Die Verbindungen bestehen aus speziellen verschraubten Anschlußflächen, mit denen das System schon in der Entwicklungsphase ausgestattet wurde.

Die oben aufgeführten Gesetze werden auch bei der Dimensionierung der Anschlußflächen und Isolatoren angewandt.

Die Anwendung dieser Technik hat folgende praktische Grenzen:

- 1250 A (Abzweigung),
- bis 6000 A (Splicing).

Hinweis:

Einige Gelenkwinkel derselben Ebene folgen dem Prinzip der Schraubtechnik.

■ Kontakttechnik

Strom wird über parallel miteinander verbundene Kontaktfinger geleitet.

In einem ersten Schritt wird der Strom entsprechend der Anzahl der parallelen Kontakte verteilt. Jeder Kontaktpunkt hat eine statische Kraft (von einer externen Feder erzeugt) und seine Dimensionierung ist das Ergebnis eines Kompromisses zwischen der Höhe des Kontaktwiderstands, der erforderlich ist, um einen nominalen Stromfluß ohne übermäßigen Temperaturanstieg zu gewährleisten, und der Reibungskraftfestigkeit während der Leiterausdehnung.

Hierbei sollte der Vorteil, den die Schmierung der elastischen Kontakte oder die Verwendung von Silber/Graphit-Typ-Kombinationen bei montierten Kontakten bieten, in Betracht gezogen werden.

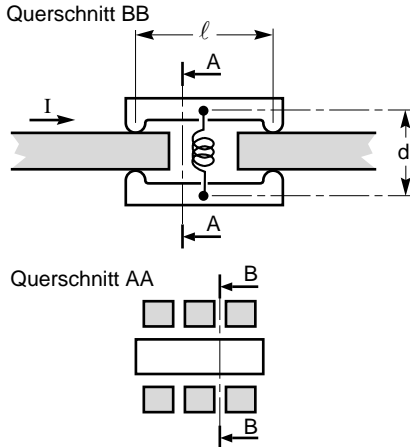
Diese Technik wird besonders bei folgenden Stromstärken angewandt:

- 16-400 A (Abzweigung),
- 40-1000 A (Splicing).

■ Festigkeit gegenüber elektrodynamischen Kräften

Während bei der Schraubtechnik die Elemente der betreffenden Struktur denselben elektrodynamischen Kräften wie bei den Sammelschienen in NS-Schaltanlagen ausgesetzt werden, profitiert die Kontakttechnik von diesen Kräften.

Die Abbildung 20 zeigt die normalerweise gewählte Anordnung der Kontaktfinger und macht deutlich, daß die Ströme, die durch einander gegenüberliegende Kontaktfinger fließen, in dieselbe Richtung laufen. Die elektrodynamischen Kräfte, die entlang der Kontaktfinger entstehen, und die mit Hilfe der oben erwähnten Methoden berechnet werden, neigen folglich dazu, sich anzuziehen. Sie verstärken somit die Kontaktkraft und wirken der Abstoßungskraft der Kontakte, die ihren Ursprung in der Striktion der Stromlinien in der Nähe des Kontaktpunkts hat (s. Abb. 21). Hierbei handelt es sich um das Selbstkompensationsprinzip (s. Abb. 20).



In der Berechnung befassen wir uns mit den Kräften an jeder der Halbkontaktbacken mit dem Querschnitt a x b, wobei alle Kontaktelemente der Backen zusammengefaßt werden.

Wenn n die Anzahl der parallelen Kontaktbacken ist, dann ergibt sich für die Gesamtabstoßungskraft an den Halbkontaktbacken:

$$F_r = 2 n 3 \cdot 10^{-7} (I 2n)^2$$

Die Anziehungskraft, die sie kompensieren soll, ist:

$$F_a = 2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{I}{2} \right)^2 k \frac{\ell}{d} \left(\sqrt{1 + \frac{d^2}{\ell^2}} - \frac{d}{\ell} \right)$$

Abb. 20: Das Selbstkompensationsprinzip

k ist der Formfaktor (dem Diagramm in Abb. 2 zu entnehmen) für einen Leiter mit einem Gesamtquerschnitt a x b.

Wenn wir $F_a \geq F_r$ setzen, so daß Kompensation erreicht wird, ergibt sich folgendes:

$$\frac{\ell}{d} \geq \sqrt{\left(\frac{3}{n k} + 1 \right)^2} - 1$$

Zum Beispiel: Bei einem Wert von $k = 0,8$ muß die Verhältniszahl ℓ/d wie folgt sein:

4,6	bei 1 Kontaktbacke	(n = 1)
2,7	bei 2 Kontaktbacken	(n = 2)
1,4	bei 5 Kontaktbacken	(n = 5)
0,95	bei 10 Kontaktbacken	(n = 10).

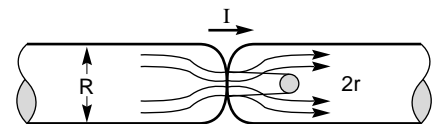
Obwohl es interessant scheinen mag, die Anzahl n der parallelen Kontaktbacken zu erhöhen, bieten uns nicht nur technische Erwägungen schnell Einhalt, sondern auch die unterschiedlichen Wirk- und Scheinwiderstände benachbarter Kontaktbacken, die eine gleichmäßige Verteilung des Stroms verhindern, von der aber der berechnete Wert von ℓ/d ausgeht.

Wir müssen daher bei diesem Wert einen Sicherheitsabstand einkalkulieren, der der Anzahl der parallelen Kontaktbacken entspricht. In der Praxis existieren Anwendungen von bis zu 2 x 12 parallelen Kontakten, die akzeptablen kurzzeitig auftretenden Strömen der Größenordnung 50 kA_{eff}-1s standhalten.

Elektrodynamische Kräfte im Test

Die für Schienenverteiler spezifischen Typprüfungen sind in den Normen IEC 439-2 festgelegt.

Der wichtigste Unterschied dabei gegenüber den NS-Schaltanlagen liegt in den Kurzschlußtestbedingungen, nach denen die Prüfungen an einer installierten Leitung vorgenommen werden sollen, die nicht länger als 6 m sein darf, und mindestens eine Verbindungsstelle und eine Richtungsänderung (Winkel) (s. Abb. 22) aufweisen sollte.



Zwischen den zwei Leitern tritt die Abstoßungskraft F auf:

$$F = 10^{-7} \ln \frac{R}{r} I^2$$

(\ln = natural log und r = der mit Hilfe der Formel von R. Holm berechnete Kontaktpunktradius).

Abb. 21: Beispiel für den Stromfluß im Leiter in der Nähe des Kontaktpunkts zwischen zwei zylindrischen stromführenden Elementen

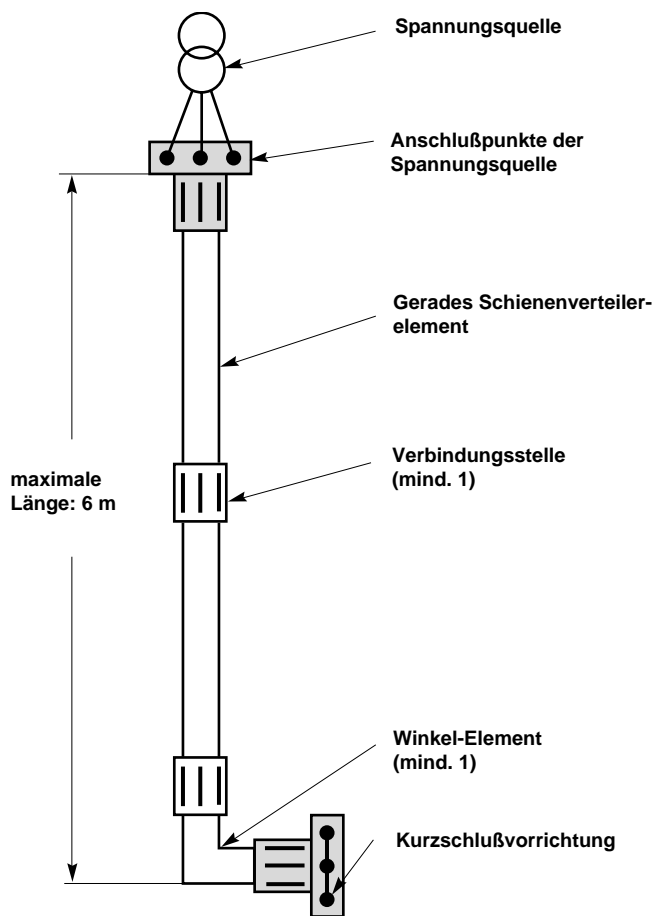


Abb. 22: Skizze eines Schienenverteiler-Prüfaufbaus gemäß den Normen für Typprüfungen.

5. Schlußfolgerung

Die großen elektrodynamischen Kräfte, die bei einem Kurzschluß auftreten und der Sachschaden, den sie hervorrufen können, rechtfertigen die Bedeutung, die der mechanischen Festigkeit von Sammelschienen beigemessen wird. Eine unzureichende Festigkeit dieser Teile kann nämlich dazu führen, daß sie ausgetauscht werden müssen und die ganze Anlage abgeschaltet wird.

Es ist daher für die Installateure und/oder Anwender von Vorteil, Geräte zu wählen, die maximale Garantie (TSK) bieten.

In diesem Fall ist die Bedeutung, die den Prüfungen zukommt, offensichtlich. Derartige Tests erfordern jedoch einen beträchtlichen Aufwand, den nur größere Hersteller angesichts der notwendigen Infrastruktur und Kosten tragen können.

Abweichungen von den typgeprüften Fällen in der Ausführung sind jedoch denkbar. Hierbei können die rechnerische Annäherung und das Know-how des Herstellers bis zu einem gewissen Grad die Aufgabe der experimentellen Annäherung übernehmen.

6. Quellenverweise

Normen

- IEC 439-1: NS-Schaltgeräte-kombinationen - Teil 1: Typgeprüfte und partiell typgeprüfte Kombinationen
- IEC 439-2: NS-Schaltgeräte-kombinationen - Teil 2: Besondere Anforderungen an Schienenverteiler.
- IEC 865-1: Kurzschlußströme - Berechnung der Wirkung - Teil 1
- IEC 909: Kurzschlußströme -Berechnung der Ströme in Drehstromanlagen
- IEC 909-1: Kurzschlußströme - Berechnung der Ströme in Drehstromanlagen. Faktoren für die Berechnung von Strömen in Drehstromanlagen gemäß IEC 909.
- IEC 117: NS-Schaltgeräte-kombinationen; Verfahren zur Ermittlung der Kurzschlußfestigkeit von partiell typgeprüften Schaltgeräte-kombinationen (PTSK).

Die technischen Hefte von Merlin Gerin

- Thermische Untersuchung von Niederspannungs-Schaltanlagen Technisches Heft Nr. 145
C. KILINDJIAN
- Betriebszuverlässigkeit und Niederspannungs-Schaltanlagen Technisches Heft Nr. 156 - O. BOUJU

- Berechnung von Kurzschlußströmen Technisches Heft Nr. 158
R. CALVAS, B. DE METZ-NOBLAT, A. DUCLUZAUX, und G. THOMASSET

Verschiedene Veröffentlichungen

- Elektrodynamische Beanspruchung von parallelen Leitern
P. BALTENSPERGER
Bulletin Schweiz Elektrotechn. Verein Nr. 25, 1944
- Sammelschienen in verschiedenen Ausführung in Anlagen der ersten und zweiten Kategorie
R. ROLS.
Vierteiliges Heft, das in der Revue de l'Aluminium Nr. 212 - 213 - 214 - 215, 1954, veröffentlicht wurde.
- Übertragung von hohen Strömen in NS- und MS-Wechselstromanlagen LV - Zweiter Teil -
P. BEIGBEDER
Bulletin Etudes et Réalisations Nr. 43, 1957
- Berechnung von Dreiphasen-sammelschienen-Anlagen in Hinblick auf die Festigkeit gegenüber elektrodynamischen Kräften
R. MASCARIN
Revue générale de l'Electricité RGE, August 1957.
- Zur Aufstellung von Formeln zur Bestimmung der Kraft pro Längeneinheit im Fall eines Kurzschlusses, der eine Dreiphasen-Sammelschiene (Phasen in Flächordnung), beeinflusst.
R. MASCARIN.
Revue générale de l'Electricité RGE, März 1959.
- Über den Einfluß von Resonanzerscheinungen auf die mechanische Kurzschlußfestigkeit von biegesteifen Stromleitern.
P. SIEBER
AEG Mitteilungen Nr. 49, 1959
- Mechanische Kräfte an stromführenden Leitern.
E.D. CHARLES
Proceedings IEE, Band 110, Nr. 9, September 1963
- Elektrodynamische Kräfte an elektrischen Schaltstationen bei einem Kurzschluß
G. SCHAFFER
Revue Brown Boveri, 1970.

Deutschland

**Schneider Electric
GmbH**

Gothaer Straße 29
D-40880 Ratingen
Telefon (49) 21 02 4 04 - 0
Telefax (49) 21 02 4 04 - 92 56
www.schneiderelectric.de

Österreich

**Schneider Electric
Austria Ges.m.b.H**

Biróstraße 11
A-1239 Wien
Telefon (43) 1 610 54 - 0
Telefax (43) 1 610 54 - 54
www.schneider-electric.at

Schweiz

**Schneider Electric
(Schweiz) AG**

Schermenwaldstrasse 11
CH-3063 Ittigen
Telefon (41) 31 917 33 33
Telefax (41) 31 917 33 66
www.schneider-electric.ch