

Stationäre und transiente Magnetfelder von Elektroenergieanlagen

Analyse, EMV, Schutz und Vorsorge

Die Grenzwerte zum Schutz und zur Vorsorge von Personen nach 26.BImSchV und BGV B11, aber auch zur EMV von elektrischen Geräten und Anlagen werden zusammengestellt und die Bedingungen für die vorauszusetzenden Strombelastungen werden diskutiert. Da für die EMV von elektronischen Geräten und Anlagen mit Analog- und Digital-technik auch seltene kurzzeitige und transiente Magnetfeldbelastungen zu bewerten sind, werden Modelle von Elektroenergieanlagen und deren Parametrierung auch für Kurzschlüsse, Erdschlüsse, unsymmetrische Drehstrombelastungen und Oberschwingungen beschrieben. Dabei wird der Einfluss der Spannungsebene, des Netztyps, der Sternpunktterdung und der Kabelmantel-erdung berücksichtigt.

Oft sind elektrische Energieanlagen sowie empfindliche elektronische Rechentechnik, Labortechnik oder Medizintechnik in unmittelbarer Nachbarschaft zu betreiben. Dabei können Bildschirme flimmern, mit Elektronenstrahltechnologie hergestellte Produkte fehlerhaft, Mikroskop-, EKG- und EEG-Aufzeichnungen verfälscht oder Tondokumente gestört sein.

Für den Schutz von Versicherten [1] und bei der Vorsorge gegenüber der Allgemeinbevölkerung [2] ist für den Nachweis über die Einhaltung der Grenzwerte die höchste betriebliche Anlagenauslastung zu Grunde zu legen, beispielsweise der höchste zulässige Dauerstrom der Leitungen und die Bemessungsleistung des Transformators.

Autoren

Doz. Dr.-Ing. H. BAUER und
Dipl.-Ing. TH. BOHN sind am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden tätig;
Mommsenstraße 13, D-01062 Dresden
Fon: +49/351/463-35104
Fax: +49/351/463-39061
E-Mail: bauer@ieeh.et.tu-dresden.de
E-Mail: bohn@ieeh.et.tu-dresden.de

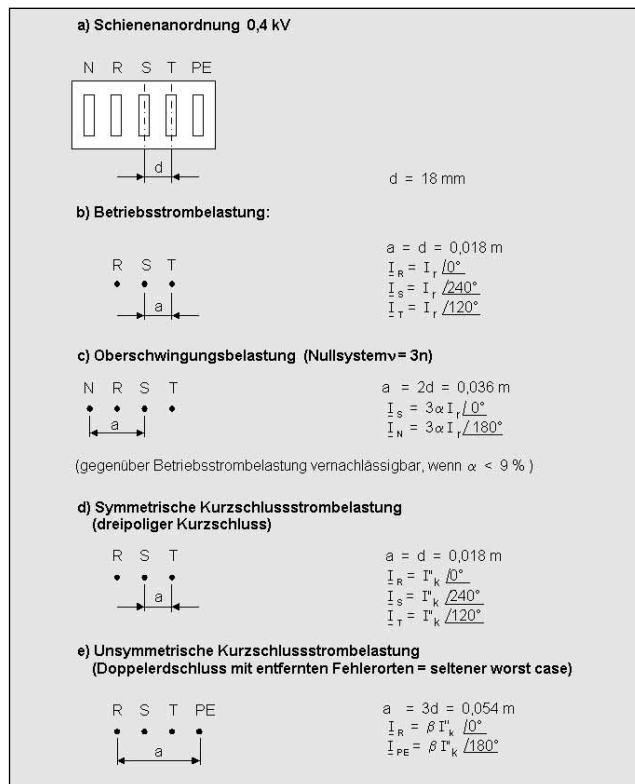


Abb. 1: Stromschienensystem mit fünf Leitern und Parametrierung für die Magnetfeldberechnung bei unterschiedlichen Betriebs- und Kurzschlussfällen

Bei der Störbeeinflussung elektronischer Geräte sind ergänzend hierzu auch niedrigere langdauernde, aber auch kurzzeitige (bis etwa 1 s) und transiente (bis etwa 10 ms) Magnet-

felder nach Intensität und Häufigkeit zu bewerten. Deshalb sind Oberschwingungen, Kurzschlüsse und Schaltvorgänge, aber auch der Netztyp, die Art der Sternpunktterdung

Tabelle 1: Grenzwerte (Effektivwerte) zur Vorsorge gegenüber Personen für niederfrequente Magnetfelder mit technischen Frequenzen bei Dauerexposition

Nr.	Personengruppe	Grenzwert		Verordnung Vorschrift Norm	Bemerkung	Lit.
		H [A/m]	B [μT]			
1	Kontrollierter Bereich, begrenzter Aufenthalt (2 Stunden)		2546 (50 Hz)	BGV B11 Bereich erhöhter Exposition	z.B. Arbeiten unter Spannung (AuS)	[1]
2	Kontrollierter Bereich, unbegrenzter Aufenthalt		1358 (50 Hz)	BGV B11 Expositionsbereich 1	z.B. Schaltpersonal in Umspannwerken	[1]
3	Versicherte Beschäftigte		424 (50 Hz)	BGV B11 Exposit.ber.2	z.B. Werkstattpersonal	[1]
4	Personen allgemein	80 240	100 300	26. BImSchV	Allgemeine Bevölkerung, inkl. Kinder, Kranke	[2]
5	Medizinische Implantate	80	100	E-DIN VDE 0750-9/A1	z.B. Personen mit Herzschrittmacher	[3]

des Netzes und die Art der Erdung von Kabelmänneln bei der Bestimmung der Feldbelastung zu berücksichtigen.

Messungen der magnetischen Flussdichte sind hierfür wegen der Seltenheit der Ereignisse meist nicht geeignet, so dass Berechnungen vorteilhaft sind.

Schutz und Vorsorge für Personen

Die Einhaltung der Grenzwerte (Tab. 1) entsprechend der Berufsgenossenschaftlichen Vorschrift BGV B11 [1] und der 26. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung [2] ist die höchste betriebliche Anlagenauslastung zu Grunde zu legen.

Die Belastungsströme sind deshalb als symmetrische Drehstrombelastung (Summe der drei Leiterströme ist Null), beispielsweise für Leitungen als höchster zulässiger Dauerstrom und für Transformatoren als Bemessungsstrom (frühere Bezeichnung Nennstrom) vorzusetzen.

Störfestigkeit von Analogtechnik

Bei Analogtechnik (z.B. Elektronenstrahltechnologie, Leiterschleifen) können kurzzeitige und transiente Störungen oftmals toleriert werden, wenn sie nur selten (0,1/a bis 10/a) zu erwarten sind. Deshalb kann in vielen Fällen die Dauerbelastung mit Betriebsströmen für die Magnetfeldberechnung vorausgesetzt werden, wobei aber unsymmetrische Belastungen (z.B. einpolige) und Oberschwingungsströme, sowie bei bestimmten Netztypen auch Streuströme einzubeziehen sind.

Um EMV zu erreichen, können Störfestigkeitswerte für verschiedene Prüfschärfegrade nach den zu erwartenden Feldbelastungen ausgewählt werden (Tab. 2). Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine n-te Oberschwingung der magnetischen Flussdichte die n-fache Störspannung in einer Leiterschleife induziert, im Vergleich zu den 50-Hz-Werten.

Störfestigkeit von Digitaltechnik

Digitaltechnik ist wesentlich unempfindlicher gegenüber den durch Magnetfelder induzierten Spannungen. Funktionsstörungen an Schaltkreisen sind erst bei Werten ab 400 mV nicht auszuschließen. Dieser Wert ist etwa 100 mal höher als bei einem 12-Bit-ADU.

Allerdings ist zu beachten, dass sich auch bei kurzzeitigen und transienten Störspannungen der Zustand einer sequenziellen Schaltung

Tabelle 2: Grenzwerte (Effektivwerte) für die Störfestigkeit für niederfrequente Magnetfelder bei Dauerexposition (Auswahl)					
Nr.	Objekt	Grenzwert		Norm	Bemerkung
		H [A/m]	B [µT]		
6	Leittechnik, Schutztechnik	100	126	EN 61000-4-8	Einsatz: MS- + HS-Schaltanlagen
7	Geräte, allgemein	(x) 100 30 10 3 1	(1,26 x) 125,66 37,70 12,57 3,77 1,26	EN 61000-4-1	Prüfschärfegrad (nach Vereinbarung) (Pegel 5) (Pegel 4) (Pegel 3) (Pegel 2) (Pegel 1)
8	Einrichtungen der Informationstechnik	1	1,26	EN 55024	CRT-Monitore EI-dyn. Mikrofone
9	Medizintechnik EKG EEG	0,11 0,05	0,14 0,07	DIN VDE 0107	

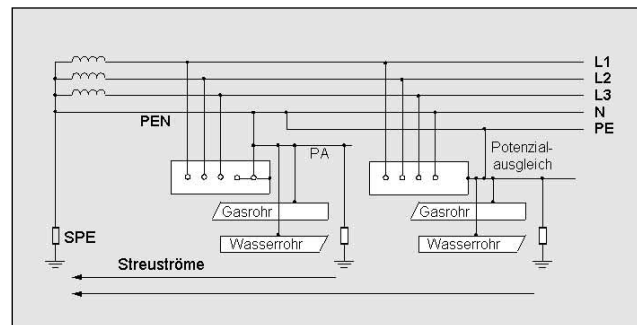


Abb. 2: Streuströme bei unsymmetrischer Belastung in einem TN-C-S-Netz

(z.B. RAM) ändern kann. Deshalb sind zwar höhere Störfestigkeitswerte zu erwarten, aber für die Magnetfeldbelastung sind auch Kurzschlussströme und gegebenenfalls auch Schaltströme zu berücksichtigen.

Potenzielle Feldquellen

Die magnetische Flussdichte B in der Nähe eines unendlich langen geraden Leiters ist vom Strom I und vom Abstand r abhängig.

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (1)$$

Bei Mehrleitersystemen kann ein geringer Abstand a zwischen Hin- und Rückleitern einen reduzierenden Einfluss haben, so dass z.B. bei einpoliger Belastung (Zweileitersystem) oder symmetrischer Drehstrombelastung (Drehstromsystem) näherungsweise

$$B = \frac{\mu I a \gamma}{2\pi r} \quad (2)$$

(für $r \gg a$, mit a) $\gamma = 1$ für das Zweileitersystem und b) $\gamma = \sqrt{3}$ für das Drehstromsystem) gilt.

Für ein 0,4-kV-Schienensystem (Abb. 1a) mit dem Leiterabstand d sind bei symmetrischer Betriebsstrombelastung die drei Ströme in Stärke des Bemessungsstromes I_T phasenverschoben um 120° zu parametrieren (Abb. 1b). Als Näherung kann die magnetische Flussdichte nach Gl. 2 b mit $a = d$ berechnet werden.

Bei den unsymmetrischen Belastungen wird vorerst vorausgesetzt, dass die Rückströme innerhalb des 5-Leitersystems (Abb. 1a) fließen, also für das Schienensystem zu jedem Zeitpunkt die Stromsumme Null ist.

Bei einpoliger Betriebsstrombelastung ist der wirksame Abstand a davon abhängig, welcher Außenleiter belastet ist. Als Worst Case kann die einpolige Belastung des Zweileitersystems T-N (Abb. 1a) vorausgesetzt werden, so dass hierfür $a = 3d$ gilt (vgl. Abb. 1e mit N statt PE). Unter dieser Bedingung liefert Gl. 2a näherungsweise die magnetische Flussdichte für einen einpoligen Betriebsstrom $I = I_T$.

Oberschwingungsströme ergeben als 3. Harmonische (150 Hz) ein Nullsystem. In den drei Außenleitern fließen drei gleichphasige Ströme, die sich als Rückstrom im Neutralleiter N summieren (Abb. 1a). Beträgt der Anteil des Oberschwingungsstromes maximal α vom Bemessungsstrom I_T (z.B. $\alpha = 0,05$), ist für die drei Außenleiter jeweils ein Strom $\alpha \cdot I_T$ mit gleicher Phasenlage zu parametrieren. Als

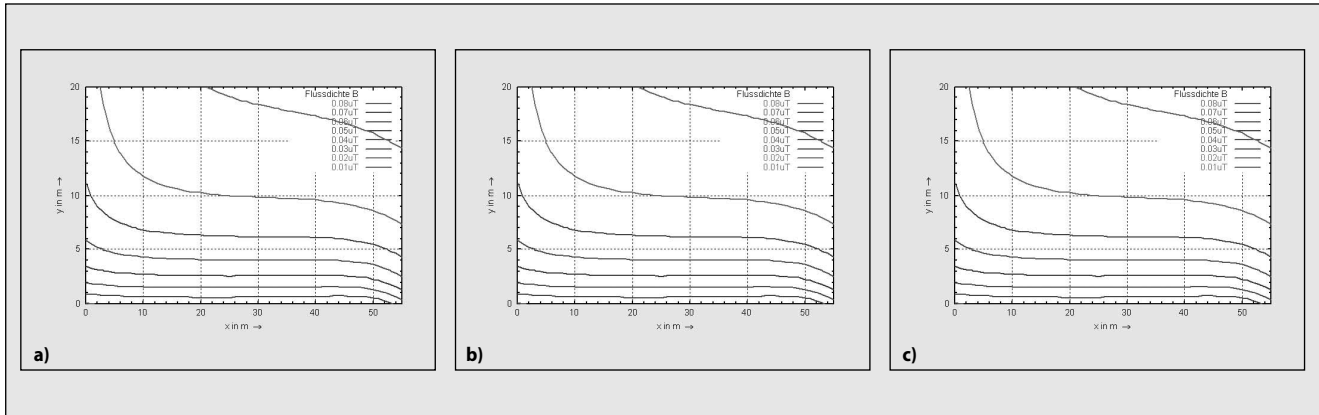


Abb. 3: Magnetfeldbelastung in einem Fertigungsgebäude bei
a) symmetrischer Belastung mit dem höchst zulässigen Dauerstrom der Kabel;
b) einpoligem Kurzschlussstrom in einem Kabel mit Rückfluss über ein Kabel des zweiten Kabelsystems;
c) einpoligem Kurzschlussstrom in einem Kabel mit 100% Streustrom

Näherung kann im mittleren Leiter zusammengefasst $3 \alpha \cdot I_r$ und im Neutralleiter der gleiche Strom, jedoch um 180° phasenverschoben angenommen werden (Abb. 1c). Für dieses Zweileitersystem S-N mit einem Abstand $a = 2d$ kann die magnetische Flussdichte nach Gl. 2 a abgeschätzt werden.

Bei symmetrischen Kurzschlüssen gelten die gleichen Bedingungen wie bei symmetrischen Betriebsströmen mit dem Unterschied, dass als wirksamer Strom ein Kurzschlussstrom einzusetzen ist (Abb. 1d).

Bei einpoligen Fehlern fließt, abhängig von der Sternpunktterdung, ein Erdschlussstrom bzw. ein Erdkurzschlussstrom im fehlerbehafteten Leiter zum Fehlerort und – vorerst angenommen – über den Schutzleiter PE zurück. Die magnetische Flussdichte kann als Worst Case mit $\alpha = 3d$ (Bild 1e) und mit $I = \beta I_k''$ näherungsweise berechnet werden. Dabei kennzeichnet β den Faktor, um den dieser einpolige Fehlerstrom kleiner als der Anfangskurzschlusswechselstrom bei dreipoligem Kurzschluss ist.

Bei zweipoligen Fehlern fließt ein Kurzschlussstrom $I = \beta I_k''$ in den beiden fehlerbehafteten Leitern, so dass maximal $a = 2d$ gilt. Nur bei einem Doppelerdkurzschluss mit zwei räumlich getrennten Fehlerorten würde zwischen diesen beiden Fehlerorten der Fehlerstrom in dem einen fehlerbehafteten Leiter und im PE fließen und somit maximal $a = 3d$ gelten (Abb. 1e).

Netztyp und Sternpunktterdung

Bei unsymmetrischen Betriebsbelastungen ist die Summe der Ströme in den drei Außenleitern L1 bis L3 ungleich Null. Jedoch wird im Niederspannungsnetz vom Typ TT- oder TN-S der Reststrom – wie im Abschnitt 4 vorausge-

setzt – über den Neutralleiter N zurückfließen, so dass die Stromsumme insgesamt für das Vierleitersystem Null wird und die magnetische Flussdichte in der Größenordnung nach Gl. 2 bleibt.

Beim Netztyp TN-C oder TN-C-S (Abb. 2) kann ein Teil dieses Reststromes als Streustrom (vagabundierender Strom) über den Potenzialausgleich und somit auch über Erde fließen.

Damit fehlt aber die kompensierende Wirkung dieser Streuströme im Vierleitersystem L1-L2-L3-PEN und außerdem verursachen diese Streuströme selbst eine magnetische Flussdichte nach Gl. 1, gegebenenfalls in der Nähe von Rohrleitungen.

Die Sternpunktterdung hat wesentlichen Einfluss auf die Höhe des Fehlerstromes bei einpoligen Fehlern. Im Hochspannungsnetz ab 220 kV und im Niederspannungsnetz ist der Sternpunkt starr geerdet, so dass beim einpoligen Fehler ein Kurzschlussstrom fließt.

Ein Mittelspannungsnetz kann mit niederohmiger SPE, ohne SPE oder bevorzugt mit Resonanz-SPE betrieben werden, so dass bei einpoligen Fehlern im fehlerbehafteten Leiter ein Kurzschlussstrom, ein kapazitiver Erdschlussstrom bzw. ein Erdschlussreststrom fließt. Das kann wesentlichen Einfluss auf die dabei zu erwartende Magnetfeldbelastung haben, da diese einpoligen Fehlerströme zwar über Kabelmäntel oder bei 110 kV auch über Erdseile, häufig jedoch zumindest anteilmäßig über Erde zurückfließen, wofür Gl. 1 gilt.

Strombelastungen

Für den Nachweis entsprechend 26.BImSchV und BGV B11 ist die höchste betriebliche Anlagenauslastung unabhängig von der zu erwartenden Häufigkeit des Auftretens vorauszusetzen. Der maximal zulässige Dauerstrom für

Kabel ist vom Leiterquerschnitt, vom Leitermaterial, von der Leiterisolation und gegebenenfalls auch von der Anzahl parallel verlegter Kabel abhängig und wird vom Hersteller vorgegeben. Gegebenenfalls können abhängig von der Netzstruktur als technische Grenzen geringere Werte vorgegeben werden [6]. Bei Stromschienensystemen kann deren Bemessungsstrom I_r oder der Bemessungsstrom des speisenden Transformators die höchste betriebliche Anlagenauslastung ergeben. Bei Freileitungen werden im Rahmen der Projektierung der maximale Durchhang und die maximale Leitertemperatur und damit auch der höchst zulässige Dauerstrom bestimmt. Bei Transformatoren wird als maximale Dauerbelastung sein Bemessungsstrom vorausgesetzt.

Für den Nachweis der EMV sind außer den zu erwartenden Betriebsströmen auch Kurzschlussströme für die Berechnung der magnetischen Flussdichte zu berücksichtigen. Bei Freileitungen, Kabeln und Stromschienen liefert eine Kurzschlussstromberechnung mit den wirksamen Impedanzen im Kurzschlusskreis bei Annahme des ungünstigsten Fehlerortes den maximalen Kurzschlussstrom. Auf der Sekundärseite eines Transformators wird der maximale Kurzschlussstrom wesentlich von seiner Kurzschlussspannung u_k bestimmt. Er kann um den Faktor $1/u_k$ über dem Bemessungsstrom liegen.

Als maximaler Effektivwert kann der Anfangskurzschlusswechselstrom I_k'' berechnet werden. Mit dem Stoßfaktor κ wird der Stoßkurzschlussstrom

$$\hat{I}_s = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (3)$$

bei $\kappa = 1,8$ als maximaler Scheitelwert bestimmt.

Der kapazitive Erdschlussstrom ist von den Leiter-Erde-Kapazitäten der Freileitungen und Kabel abhängig. Der Wirkreststrom und der eingestellte Verstimmungsgrad ergeben in kompensierten Netzen den Erdschlussreststrom. Bei nicht niederohmiger SPE sind einpolige Kurzschlussstrombelastungen von Leitungen nur bei sehr seltenen Doppelerdkurzschlüssen mit räumlich getrennten Fehlerorten zu erwarten.

Erdung von Kabelmänteln

Kabelmäntel sind zumindest einseitig zu erden, um den Berührungsschutz zu sichern. Bei zweiseitiger Erdung können Mantelströme fließen, die das Magnetfeld der Ströme des Mehrleitersystems reduzieren. Die Höhe eines Mantelstromes kann mit der Gegeninduktivität zwischen Kabelader und Kabelmantel berechnet werden. Da die Mantelströme eine zusätzliche Kabelerwärmung bewirken, können sie bei symmetrischer Belastung mit Betriebs- oder Fehlerströmen durch Auskreuzen oder einseitige Erdung vermieden werden.

Bei einpoliger Fehlerstrombelastung der Kabel wird ohne zweiseitige Erdung der Kabelmäntel der Rückfluss des Fehlerstromes als Streustrom über Erde erfolgen, wodurch sich hohe Feldbelastungen entsprechend Gl. 1 ergeben können. Allerdings besteht bei zweiseitiger Erdung auch die Möglichkeit, dass Streuströme anderer Netze – auch von Bahnnetzen – über diese Kabelmäntel fließen und Feldbelastungen entsprechend Gl. 1 zur Folge haben.

Stahlblechkapslungen von Schienensystemen können bei zweiseitiger Erdung ebenfalls Mantelströme führen. Hier ist zusätzlich zu beachten, dass durch deren ferromagnetische Eigenschaft das Magnetfeld außerhalb der Kapslung oft nur geringfügig reduziert ist. Wenn bei hohen Strombelastungen das Stahlblech bis zur Sättigung erregt wird, wirkt es als Oberschwingungsgenerator und dadurch ungünstiger auf induzierte Störspannungen in Leiterschleifen von elektronischen Geräten.

Feldberechnung

Grundlage der meisten Berechnungsprogramme für die magnetische Flussdichte in der Nähe von Elektroenergieanlagen ist das Gesetz von Biot Savart. Die Modelle der Mehrleitersysteme werden zusammengestellt und mit den geometrischen und elektrischen Daten der Anlagen parametrisiert. Die Berechnungsergebnisse werden bevorzugt als Isolinen der magnetischen Flussdichte für ausgewählte Ebenen dargestellt.

Beispielsweise war die EMV für eine Produktionsstrecke mit Elektronenstrahltechnologie in einem Gebäude zu untersuchen, wenn Mittelspannungskabel in 8 m Entfernung vom Gebäude verlegt werden. Die Störfestigkeit für diese Technologie wurde mit $0,2 \mu\text{T}$ angegeben.

Werden hierbei die zwei Dreierbündel von Einleiterkabeln mit ihrem höchst zulässigen Dauerstrom (415 A) symmetrisch belastet, sind die Schutz- und Vorsorgegrenzwerte [1] bzw. [2] erwartungsgemäß weit unterschritten. Auch für die empfindlichen Produktionsanlagen ist bei dieser Strombelastung EMV gegeben (Abb. 3a).

Für die Belastung beider Kabel mit symmetrischen Kurzschlussströmen wurde die magnetische Flussdichte für einen Kurzschlussstrom von 10 kA berechnet. Dadurch ist eine einfache Umrechnung von maximal $3,5\mu\text{T}/10\text{kA}$ auf beliebige, vom Kurzschlussort abhängige Werte des Kurzschlussstromes möglich.

Wird ein Kurzschlussstrom einpolig in nur einem Kabel angenommen, weil er beim Doppelerdkurzschluss weder über das zweite Kabelsystem (Abb. 3b) noch über die Kabelmäntel, sondern über entfernte Rohrsysteme zum zweiten Fehlerort fließt, ist maximal mit $200\mu\text{T}/10\text{kA}$ zu rechnen (Abb. 3c).

Für Kurzschlussströme von 4 kA liegen die Werte der magnetischen Flussdichte über den Störfestigkeitswerten. Es kann entschieden werden, ob das differenziert nach Fehlerarten und -orten auf Grund der jeweils zu erwartenden Häufigkeit toleriert werden kann, oder ob feldreduzierende Maßnahmen erforderlich

sind. Infolge der Resonanz-Sternpunktterdung dieses Netzes waren die Magnetfeldbelastungen bei Erdschlüssen mit Rückströmen über das zweite Kabelsystem oder über die Kabelmäntel unkritisch.

Zusammenfassung

Zum Schutz und zur Vorsorge für die versicherten Beschäftigten bzw. für die allgemeine Bevölkerung sind die Grenzwerte mit der berechneten magnetischen Flussdichte bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung zu vergleichen. Da für die EMV von elektronischen Geräten und Anlagen auch seltene kurzzeitige und transiente Magnetfeldbelastungen zu bewerten sind, werden Modelle und deren Parametrierung von Elektroenergieanlagen auch für Kurzschlüsse, Erdschlüsse, unsymmetrische Drehstrombelastungen und Oberschwingungen beschrieben. Dabei wird der Einfluss der Spannungsebene, des Netztyps, der Sternpunktterdung und der Kabelmantelerdung berücksichtigt.

Literatur

- [1] Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit - Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ BGV B11 (VBG 25) vom 1. Juni 2001
- [2] Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) vom 16. Dezember 1996 (BGBl. Teil I Nr. 66, S. 1966)
- [3] DIN EN 50061/A1; VDE 0750 Teil 9/A1: Sicherheit implantierter Herzschrittmacher, Deutsche Fassung EN 50061: 1988/A1: 1995
- [4] Bauer, H.: Maßnahmen gegen Starkstrombeeinflussungen von Geräten. Abschnitt 14 in Handbuch Elektromagnetische Verträglichkeit, 2. Auflage, Verlag Technik Berlin, München 1992, S. 320 - 344
- [5] Bohn, Th.; Bauer, H.: Magnetfeldberechnung im Vergleich zu -messung- Vor- und Nachteile für die Bewertung der Magnetfeldbelastung an und in Transformatorenstationen. EMC-Kompodium 2001, S. 273 - 276

Beitrag als PDF im Internet:

www.publish-industry.net

more @ click EK3C0302



LESETIPP



Wo können Sie kostenfrei die hochmoderne Knowledge-Plattform nutzen?

www.publish-industry.net/ELEKTRONIK

publish industry
TECHNIK KOMMUNIZIEREN

Gollierstraße 23 · D-80339 München · Fon. +49/89/500383-0 · Fax. +49/89/500383-10 · info@publish-industry.net · www.publish-industry.net