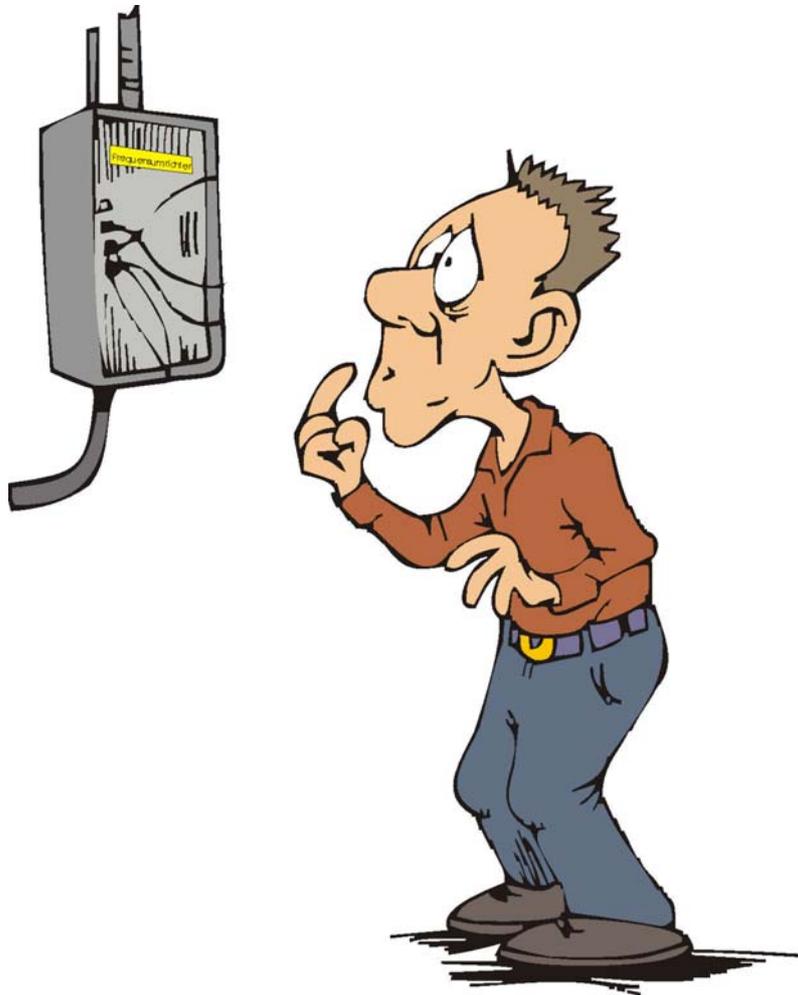


Realisierung eines zuverlässigen Fehlerstromschutzes in elektrischen Anlagen mit Frequenzumrichtern

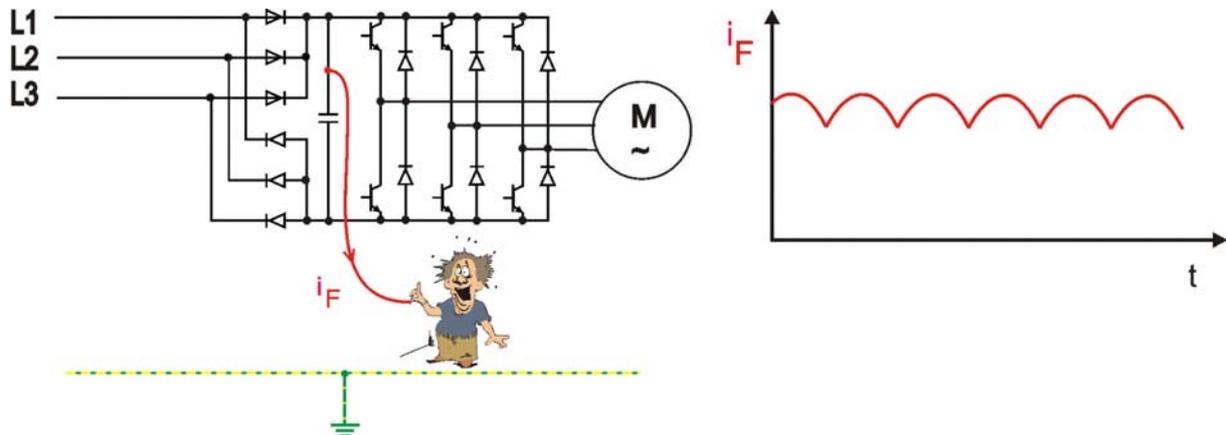


Warum eigentlich ALLSTROMSENSITIV?

1. Einsatz von allstromsensitiven Fehlerstromschutzeinrichtungen (Typ B) in elektrischen Anlagen mit Frequenzumrichter:

Mehrphasig betriebene elektronische Betriebsmittel wie z. B. Frequenzumrichter (FU) oder Wechselrichter können im Fehlerfall wie in Bild 1 dargestellt einen glatten Gleichfehlerstrom erzeugen.

Bild 1:



Dieser durch die B6 - Schaltung im Eingang des FU hervorgerufene glatte Gleichfehlerstrom* würde einen herkömmlichen FI - Schutzschalter vom Typ A oder AC nicht auslösen, da im Summenstromwandler des FI - Schutzschalters keine zeitlich veränderliche Magnetisierung erfolgt, die für eine induktive Energieübertragung auf das Auslöserelais des FI - Schutzschalters notwendig ist.

Je nach Höhe bewirkt der Gleichfehlerstrom stattdessen eine magnetische Vormagnetisierung des Wandlerkernes und erhöht damit die Auslöseschwelle des FI - Schutzschalters für weitere möglicherweise noch vorhandene Wechselfehlerströme bis hin zur Nichtauslösung.

* (im Anhang A wird die Entstehung des Gleichfehlerstromes aus den drei Einzelströmen der Phasen L1, L2 und L3 näher dargestellt.)

2. Was sind Fehlerströme und was sind Ableitströme?

Fehlerströme sind überwiegend ohmsch und entstehen durch Isolationsfehler zwischen spannungsführenden Teilen und Erde, beispielsweise aufgrund von Schmutz und Feuchtigkeit in einem Gerät. Ein anderes Beispiel wäre ein Stromfluss zur Erde, wenn eine Person direkt eine Phase des Netzes berührt (siehe Bild 2a).

Ableitströme sind betriebsbedingte Ströme überwiegend kapazitiver Art und fließen z. B. aufgrund von Entstörmaßnahmen durch Kondensatoren in EMV - Filtern oder über die Kapazität langer abgeschirmter Leitungen zur Erde (siehe Bild 2b).

Fehlerströme und auch Ableitströme können je nach Anwendung und elektrischer Anlage mehrere, von der Netzfrequenz 50 Hz deutlich verschiedene Frequenzanteile, gleichzeitig aufweisen. Der FI - Schutzschalter kann Fehlerströme und Ableitströme nicht voneinander unterscheiden und bewertet sie deshalb gleichermaßen. So kann eine Auslösung bereits erfolgen, wenn die Summe aller fließenden Ableitströme die Auslöseschwelle des FI - Schutzschalters überschreitet, obwohl kein Fehler (Fehlerstrom) in der elektrischen Anlage vorliegt.

Bild 2a:

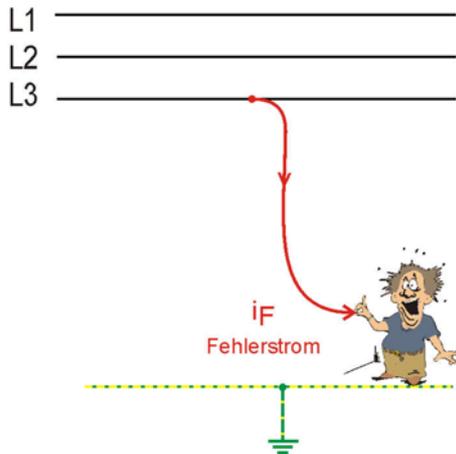
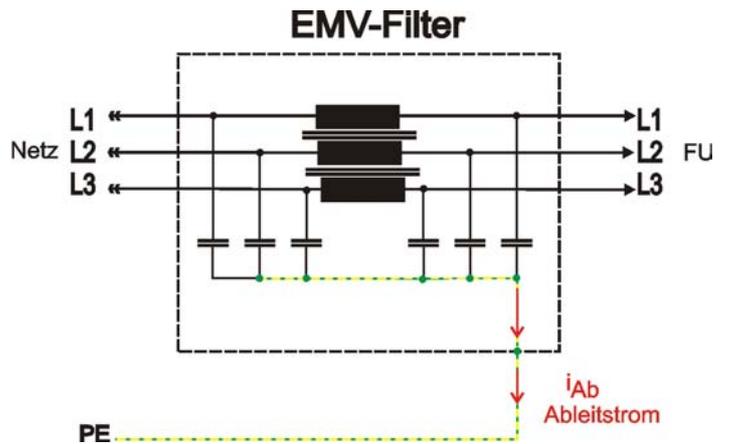


Bild 2b:



3. Welche Fehlerströme können in Anlagen mit Frequenzumrichtern auftreten:

Einige Beispiele möglicher Fehlerströme in einer Anlage mit einem Asynchronmotor, der mit einem Frequenzumrichter (FU) betrieben wird:

Bild 3:

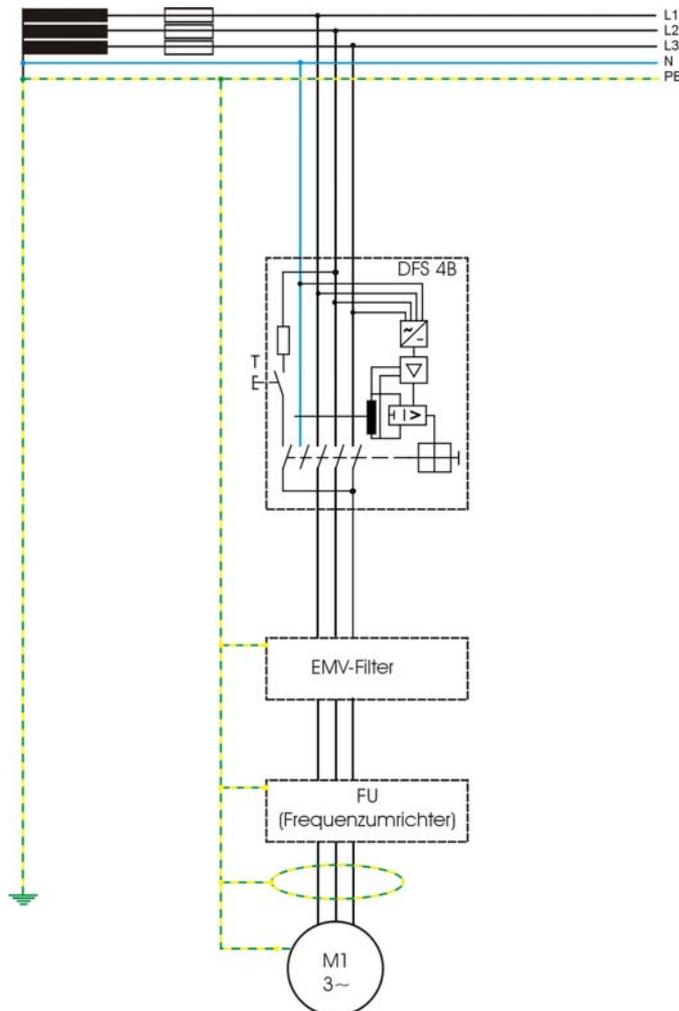
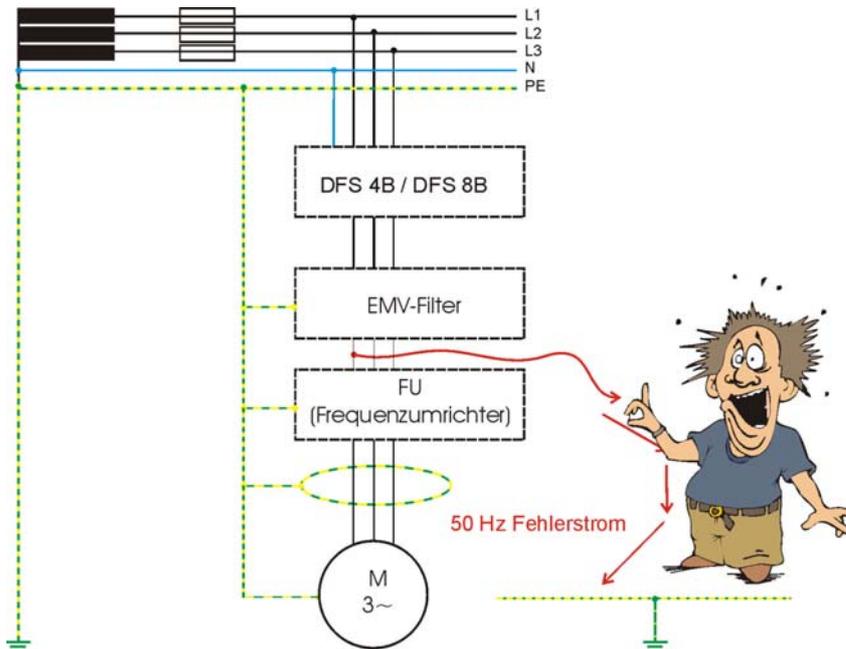
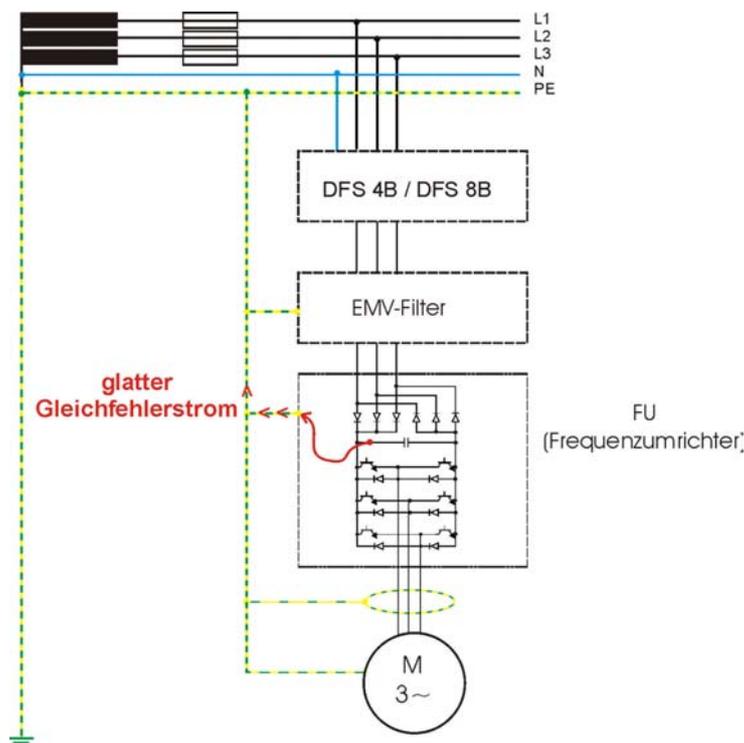


Bild 3a: Eine Person berührt am Eingang des FU den Leiter L1



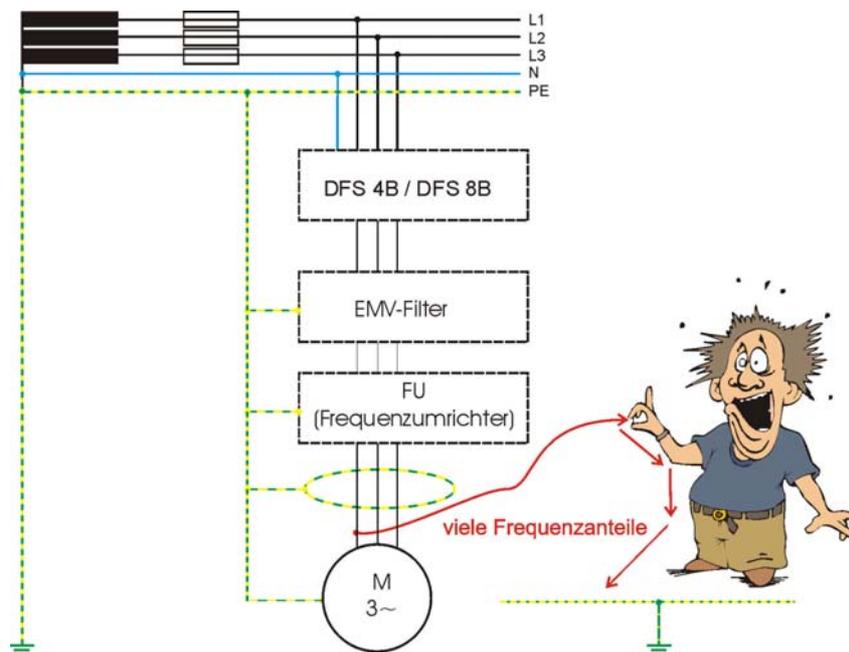
Es fließt ein rein sinusförmiger 50 Hz - Fehlerstrom durch den Körper der Person. Bei entsprechender Höhe dieses Fehlerstromes erfolgt eine sichere Auslösung des FI's.

Bild 3b: Isolationsfehler vom +Pol des Zwischenkreiskondensators zum Gehäuse des FU



Dieser Fehler könnte z. B. durch Schmutz und Feuchteinwirkung verursacht sein. Hier fließt ein nahezu glatter Gleichfehlerstrom. Eine sichere Auslösung bei Verwendung eines allstromsensitiven FI's ist bei entsprechender Höhe des Gleichfehlerstromes gewährleistet.

Bild 3c: Eine Person berührt direkt die Zuleitung des Motors an L1



Beispiel: Der Motor wird mit einer Ausgangsfrequenz (auch als Maschinen- oder Motorfrequenz bezeichnet) von 10 Hz betrieben. Die Schaltfrequenz (auch als Chopper- oder Taktfrequenz bezeichnet) des FU beträgt 8 kHz.

Die Person berührt während des Betriebes den Leiter L1 im schadhafte Zuleitungskabel des Motors. Durch den Körper der Person fließt jetzt ein Fehlerstrom, der aus sehr vielen Frequenzanteilen besteht. Er enthält neben der Ausgangsfrequenz 10 Hz mit geringerer Amplitude auch die Schaltfrequenz des FU mit 8 kHz und deren Oberschwingungen* 16 kHz, 24 kHz, 32 kHz, usw. mit erheblichem Anteil sowie einem geringen 150 Hz – Anteil, welcher durch die eingangsseitige Sechspuls – Brückengleichrichtung des FU generiert wird.

* (im Anhang B wird die Entstehung von Oberschwingungen näher erläutert)

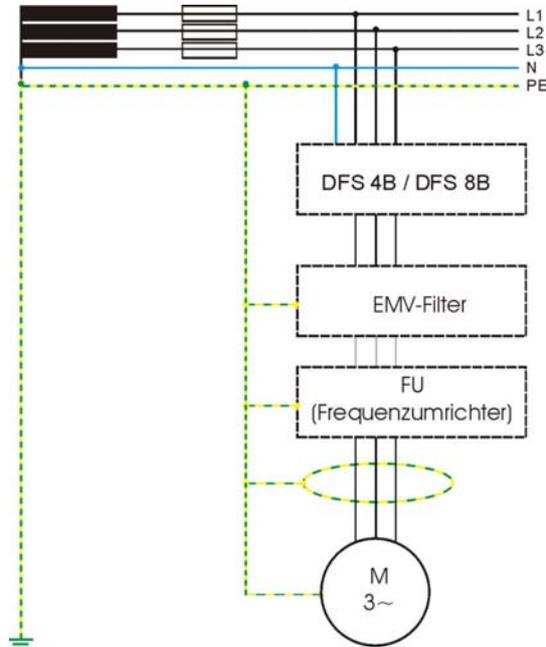
Für Körperströme mit Frequenzen oberhalb von 1 kHz liegt die Gefährdungsgrenze für Herzkammerflimmern beim Menschen über 300 mA. Jedoch kann ein hoher Fehlerstrom auch thermische Schäden im menschlichen Körper bewirken. Ein FI-Schutzschalter, der den Menschen auch bei direktem Berühren eines spannungsführenden Teiles schützen soll, muss deshalb auch im Frequenzbereich oberhalb von 1 kHz noch eine ausreichende Empfindlichkeit aufweisen. Unsere allstromsensitiven FI-Schutzschalter der Baureihen DFS 4B und DFS 8B erfassen deshalb lückenlos auch noch Fehlerstromanteile mit Frequenzen bis in den MHz-Bereich mit ausreichender Empfindlichkeit. Damit ist der durch den Bemessungsfehlerstrom gekennzeichnete Schutzpegel (Schutz bei indirektem Berühren, Brandschutz oder Schutz bei direktem Berühren) über den gesamten Frequenzbereich gegeben.

4. Welche Ableitströme können auftreten ?

Man unterscheidet stationäre, variable und transiente Ableitströme.

Zur Erläuterung hierzu dient noch einmal das Beispiel einer Anlage mit einem Asynchronmotor, der mit einem Frequenzumrichter (FU) betrieben wird.

Bild 4:



Zur Einhaltung der einschlägigen EMV - Vorschriften (**Elektromagnetische Verträglichkeit**) darf der FU nur über ein vorgeschaltetes EMV - Filter, welches auch schon im FU integriert sein kann, betrieben werden. Da die pulsweitenmodulierte Ausgangsspannung des FU äußerst steilflankig ist und somit Oberschwingungen hoher Amplituden und Frequenzen enthält, darf der Motor ebenfalls zur Einhaltung der EMV - Vorschriften nur über eine abgeschirmte Leitung mit dem FU verbunden werden.

Stationäre Ableitströme:

Das EMV - Filter besteht in einfachster Ausführung aus LC - Tiefpässen, deren Kondensatoren im Stern zum Schutzleiter geschaltet sind. Bei idealem Netz mit einer streng sinusförmigen Spannung ergibt die Summe aller kapazitiven Ströme durch diese Kondensatoren Null. Durch die mittlerweile starken Verzerrungen der Netzspannung ergibt sich jedoch in der Praxis ein kapazitiver Gesamtstrom ungleich Null, der fortwährend über den Schutzleiter abfließt und daher als stationärer Ableitstrom bezeichnet wird. Auch durch die Kommutierung der B6 -Brückenschaltung im Eingang des FU werden Ableitströme durch die internen Kondensatoren des EMV - Filters generiert. Der stationäre Ableitstrom ist auch bei nichtlaufendem Motor vorhanden (Reglersperre des FU) und weist typischerweise Frequenzanteile von 100 Hz bis 1 kHz auf und kann eine Amplitude von mehreren hundert Milliampere haben. Besonders einfache und preiswerte EMV - Filter mit kleinen Induktivitäten und großen Kondensatoren bewirken hohe Ableitströme und können zur ungewollten Auslösung des FI - Schutzschalters führen.

Anmerkung zum Einsatz einphasig betriebener FU:

Einphasig betriebene FU sind oft mit einem integrierten EMV - Filter ausgestattet. Bei diesem Filter sind die Filterkondensatoren von L nach PE und N nach PE geschaltet. Dadurch entstehen hier nicht unerhebliche 50 Hz - Ableitströme. Bei Verwendung mehrerer FU ist deshalb darauf zu achten, dass diese zur Kompensation der Ableitströme möglichst gleichmäßig auf die drei Phasen verteilt werden, um eine Auslösung des FI - Schutzschalters zu vermeiden.

Variable Ableitströme:

Wird der Motor jetzt durch den FU in seiner Drehzahl geregelt, so treten noch weitere Frequenzanteile oberhalb von 1 kHz im Gesamtleitstrom auf. Besonders die Schaltfrequenz des FU (typische Werte: 2, 4, 8, 16 kHz) und auch die dazugehörigen Oberschwingungen sind mit sehr hoher Amplitude vorhanden. Eine lange Motorleitung mit einer geerdeten Abschirmung wirkt wie ein Kondensator, der gegen Erde geschaltet ist und Ströme mit entsprechender Frequenz und deren harmonische Oberschwingungen dorthin ableitet.

Stationäre und variable Ableitströme verlaufen bei konstanter Drehzahl des Motors nahezu periodisch. Ein FI - Schutzschalter reagiert auf diese Ableitströme mit einer Abschaltung, wenn sie in ihrer Höhe die Ansprechschwelle des FI - Schutzschalters bei der jeweiligen Frequenz überschreiten. Veränderungen der Drehzahl bewirken auch eine Veränderung der variablen Ableitströme sowohl im Frequenzspektrum als auch in der Amplitude und können möglicherweise dann eine Auslösung des FI - Schutzschalters bewirken.

Zur Vermeidung von Fehlauflösungen kann der allstromsensitive FI - Schutzschalter so ausgelegt werden, dass er generell auf Differenzströme im Frequenzbereich der Ableitströme unempfindlich reagiert. Wenn auch Fehlerströme in diesem Frequenzbereich vorkommen können, wird durch diese Maßnahme jedoch der Schutzzumfang eingeschränkt!

Transiente Ableitströme

Bei Ausschaltvorgängen treten im Netz infolge der Induktivitäten in den Strompfaden Spannungsspitzen auf, die aufgrund der steilen Anstiegsflanken sehr hohe Frequenzanteile enthalten. Auch durch Einschaltungen bei ungünstigen Phasenwinkeln der Netzspannung enthält das Spektrum der Netzspannung kurzzeitig Hochfrequenzanteile infolge des schnellen Spannungsanstiegs.

Diese hochfrequenten Spannungsanteile treiben über die o. a. Kapazitäten der EMV - Schutzmaßnahmen transiente Ströme zur Erde, die eine unerwünschte Abschaltung von FI - Schutzschaltern bewirken können.

Bei Aufschaltung der Netzspannung mit Schaltern ohne Sprungschaltfunktion werden, je nach Schaltgeschwindigkeit, die drei Phasen zeitlich zueinander versetzt zugeschaltet. Solange nicht alle drei Leiter Spannung führen, fließt dann über die Filterkondensatoren des EMV - Filters der bereits zugeschalteten Leiter ein erhöhter Ableitstrom zur Erde.

Fehlausschlösungen infolge transienter Ableitströme können vielfach durch den Einsatz von FI - Schutzschaltern mit Ansprechverzögerung vermieden werden. Um die Schutzwirkung nicht unzulässig zu beeinträchtigen, darf die Ansprechverzögerung

nur in engen Grenzen wirken. Hieraus folgt, dass der FI - Schutzschalter auch gegen transiente Ableitströme nicht beliebig „immunisiert“ werden kann. Die FI – Schutzschalter der Baureihen DFS 4B und DFS 8B weisen eine solche Ansprechverzögerung auf. Überschreiten die transienten Ableitströme in ihrer Dauer jedoch die durch die Vorschriften vorgegebene höchstzulässige Abschaltzeit des FI – Schutzschalters, so kommt es dennoch bei entsprechender Höhe zu einer Auslösung!

5. Maßnahmen zur Reduzierung der Ableitströme:

Wie weiter oben deutlich wurde, geht eine Ertüchtigung des FI - Schutzschalters gegen Fehlauflösungen durch Ableitströme in den meisten Fällen zu Lasten der Schutzwirkung. Es ist daher immer zu empfehlen, Ableitströme durch die folgenden Maßnahmen kleinstmöglich zu halten.

Gemäß DIN VDE 0100-530 (Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel) Absatz 531.3.3 ist die elektrische Anlage so auszulegen, dass der Ableitstrom das 0,4fache des Bemessungsfehlerstromes des FI – Schutzschalters nicht überschreitet.

5.1. Reduzierung von stationären Ableitströmen:

- Viele FU-Hersteller bieten mittlerweile auch s. g. ableitstromarme EMV - Filter an. Bei diesem Filtertyp treten bauartbedingt deutlich niedrigere Ableitströme auf, als bei Standardfiltern. Die Herstellerangaben bezüglich einer maximal zulässigen Länge der geschirmten Motorzuleitung sind zu beachten.
- In elektrischen Netzen, in denen der Neutralleiter vorhanden ist, kann ein 4 - Leiter - Filter eingesetzt werden. Dieser Filtertyp weist die geringsten Ableitströme auf. (Der Hauptanteil der Ableitströme wird jetzt über den Neutralleiter abgeführt)
- Durch weitere Maßnahmen sollte gewährleistet werden, dass die Netzspannung möglichst unverzerrt bleibt.
- Auf gar keinen Fall darf am Ausgang eines dreiphasigen EMV - Filters (ohne Neutralleiteranschluss) ein einphasiger Verbraucher wie z. B. eine Glühlampe gegen den Neutralleiter angeschlossen werden! Durch die unsymmetrische Belastung des Filters werden die Ableitströme weiter erhöht, und die Filterwirkung wird stark beeinträchtigt, so dass die zulässigen Grenzen zur Einhaltung der EMV - Vorschriften deutlich überschritten werden!
- Werden mehrere einphasig betriebene FU verwendet, sollten diese zur Kompensation der Ableitströme gleichmäßig auf alle Phasen verteilt werden.

5.2. Reduzierung von variablen Ableitströmen:

- Die abgeschirmte Motorzuleitung möglichst kurz halten.
- Sinus - Filter, EMV - Sinus - Filter, du/dt -Filter oder Ausgangsdröseln direkt hinter dem Ausgang des FU (vor der Motorzuleitung) installieren. Diese verringern durch eine Reduzierung der Flankensteilheit der Ausgangsspannung des FU die Ableitströme oberhalb von 1 kHz auf der Leitung zum Motor erheblich. Besonders niedrige Ableitströme werden bei der Verwendung eines du/dt – Filters erreicht.

- Werden mehrere FU mit eigenem (integrierten) EMV - Filter eingesetzt, können durch ein zusätzlich vorgeschaltetes gemeinsames 4 - Leiter - Filter die variablen Ableitströme erheblich reduziert werden.

5.3. Weitere Reduzierung von Ableitströmen:

- Netzdrosseln, welche noch vor das EMV - Filter gesetzt werden, reduzieren die Stromwelligkeit samt Oberschwingungen und erhöhen zudem die Lebensdauer von Bauelementen im FU.
- In elektrischen Anlagen mit mehreren FU sollte an Stelle der einzelnen EMV - Filter eines jeden FU ein Sammelfilter verwendet werden. Die Ableitströme der einzelnen EMV - Filter addieren sich. Hierbei ist die Summe der Ableitströme aller Einzelfilter meist größer als der Ableitstrom eines größeren gemeinsamen Filters. Die Angaben des Filterherstellers bezüglich der maximal zulässigen Längen der geschirmten Motorzuleitungen sind zu beachten.
- Werden mehrere FU in einer elektrischen Anlage verwendet, sollte vermieden werden, diese gleichzeitig hochzufahren. Bei gleichzeitiger Reglerfreigabe mehrerer FU entstehen kurzzeitige hohe und sich addierende Ableitströme, welche zu einer ungewollten Auslösung führen können.

Anmerkung:

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Filter sind in der Regel als Zubehör bei den Herstellern der elektronischen Betriebsmittel (Frequenzumrichter, Wechselrichter, usw.) erhältlich. Hier sind auch ggfs. nähere technische Einzelheiten zu erfragen.

5.4. Reduzierung transienter Ableitströme beim Ein- und Ausschalten einer elektrischen Anlage mit elektronischen Betriebsmitteln:

Wie bereits weiter oben erwähnt, müssen beim Einsatz elektronischer Betriebsmittel zur Einhaltung der EMV - Vorschriften Filter verwendet werden. Diese Filter enthalten z. B. bei einem 3 - Leiter - Standard - EMV - Filter u. a. eine Sternschaltung von drei Kondensatoren gegen Erde. Die meisten FI - Schutzschalter enthalten ein einfaches Schaltwerk. Die zeitliche Schließung und Öffnung der einzelnen Strompfade ist abhängig von der Schaltgeschwindigkeit des Bedieners und kann u. U. eine Zeitdifferenz von 10 - 20 ms ergeben. Während dieser Zeit ist die Symmetrierung des Sternpunktes der drei Kondensatoren nicht mehr gegeben und es kann ein erheblicher kapazitiver Ableitstrom über den Schutzleiter fließen und den FI - Schutzschalter sofort wieder zum Auslösen bringen. Daher sollte eine Zuschaltung und Trennung nur mit Hilfe eines zusätzlichen schnellschaltenden Schaltorgans (z. B. Trennschalter mit Sprungschaltfunktion oder allpolig schaltendes Schütz) und nicht mit dem FI - Schutzschalter selbst erfolgen.

In elektrischen Anlagen mit sehr vielen FU kann es besonders beim Einschalten in Ausnahmefällen trotz Zuschaltung mit einem schnellschaltenden Schaltorgan zu einer Auslösung kommen. In diesem Fall fließen bedingt durch die ungeladenen Filterkondensatoren sehr hohe Ableitströme über einen Zeitraum, der die höchstzulässige Abschaltzeit des FI - Schutzschalters überschreitet. Ein Sammel - EMV - Filter für

mehrere FU kann auch den hohen Einschaltbleitstrom deutlich reduzieren (siehe auch Punkt 5.3).

5.5. Vermeidung von stark erhöhten Ableitströmen als Ursache einer Schwingneigung (Resonanz) eines EMV - Filters:

- Bei Frequenzumrichtern können in der Regel verschiedene Schaltfrequenzen (Chopper) gewählt werden. Im ungünstigen Fall (z.B. bei langen geschirmten Motorzuleitungen) kann die Schaltfrequenz zu einer Schwingneigung eines vorgeschalteten EMV - Filters und somit zu stark überhöhten Ableitströmen führen, welche dann eine Auslösung des FI - Schutzschalters bewirken. In diesem Fall ist die Schaltfrequenz des FU zu ändern!

5.5.1 Wichtige Hinweise bei der Verwendung von FU mit integrierten EMV-Filtern:

- Viele FU sind bereits mit einem internen EMV – Eingangsfiler ausgestattet, so dass die Verwendung eines externen Filters entfallen kann. **Wichtig:** Diese integrierten Filter lassen oft nur eine maximale Länge der geschirmten Motorzuleitung von 5 – 10 m zu! Die in den Bedienungsanleitungen der FU angegeben Konformitätserklärungen zu den EMV – Richtlinien (z.B. EN55011, Klassen A, B) sind meist nur für diese relativ kurzen Leitungslängen gültig. Oft sind auch Leitungslängen von 50 – 100 m angegeben: Diese Leitungslängen beziehen sich jedoch meist nicht auf EMV – Konformität, sondern auf eine maximal zulässige kapazitive Last (Kapazität der geschirmten Motorzuleitung), welche die Ausgangsstufe des FU noch problemlos treiben kann.
- Längere Zuleitungen bewirken durch die Zunahme der asymmetrischen kapazitiven Ströme eine magnetische Sättigung der EMV - Filterdrossel. Extrem hohe Ableitströme und eine Filterresonanz sind die Folge. Eine gesättigte Filterdrossel führt zur Unwirksamkeit des Filters, so dass die zulässigen Grenzwerte der einschlägigen EMV – Richtlinien weit überschritten werden und der FU somit meist unbemerkt zur hochgradigen Störquelle für andere Verbraucher wird!
- Wird ein FU mit integriertem EMV – Filter und langer geschirmter Motorzuleitung (> 10 m) verwendet, so ist das integrierte Filter nach Möglichkeit zu deaktivieren und ein externes EMV – Filter, welches für den Betrieb mit langen Motorzuleitungen geeignet ist, zu verwenden. Welches Filter geeignet ist, muss ggf. durch eine EMV – Messung an der gesamten elektrischen Anlage ermittelt werden.

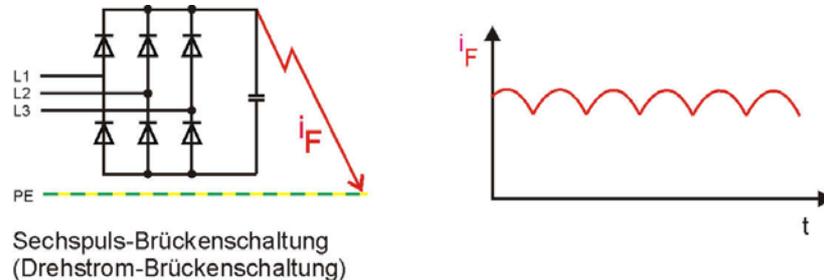
6. Richtige Anwendung eines allstromsensitiven Fehlerstromschutzes in einer elektrischen Anlage mit elektronischen Betriebsmitteln:

6.1. Vorschriftsmäßiger Einsatz von allstromsensitiven FI - Schutzeinrichtungen:

Sind in elektrischen Anlagen glatte Gleichfehlerströme (keine Nullpunktberührung) bedingt durch den Einsatz bestimmter elektronischer Betriebsmittel zu erwarten, so sind laut VDE 0160 / EN 50178 (Errichtung von Starkstromanlagen mit elektronischen Betriebsmitteln, Absätze 5.2.11.2 und 5.3.2.3) und laut DIN VDE 0100-530 (Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Absatz 531.3.2) allstromsensitive FI – Schutzeinrichtungen zu verwenden, auch wenn die elektronischen Be-

triebsmittel der elektrischen Anlage fest (ohne Steckvorrichtung) angeschlossen sind. Dieses trifft z. B. für dreiphasig betriebene FU zu, welche eingangsseitig in der Regel zur Gleichrichtung der Netzspannung eine Sechspuls - Brückenschaltung verwenden (siehe Bild 5).

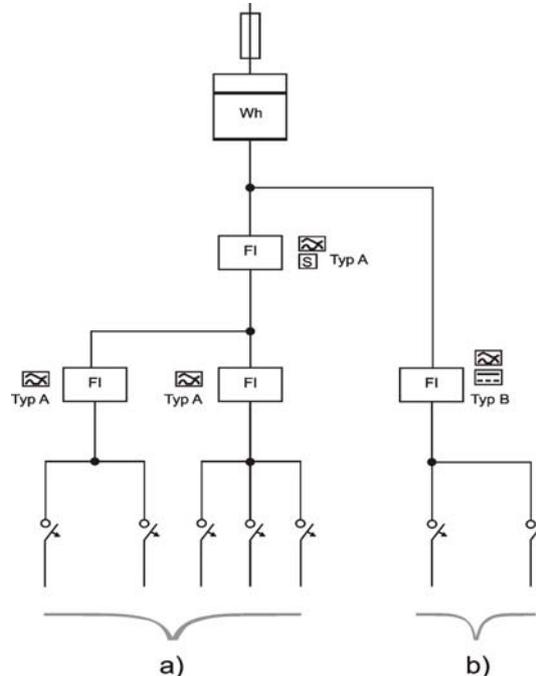
Bild 5:



6.2. Aufteilung der Stromkreise:

Stromkreise mit elektronischen Betriebsmitteln wie FU dürfen nach VDE 0160 / EN 50178 Abschnitt 5.3.2.3 keine pulsstromsensitiven Schutzeinrichtungen vorgeschaltet sein, da diese, wie bereits oben beschrieben, durch glatten Gleichfehlerstrom in ihrer Funktion beeinträchtigt werden (oder Vormagnetisierung des Wandlerkernes).

Bild 6



Zu Bild 6:

a): Stromkreise mit elektrischen Betriebsmitteln, bei denen im Fehlerfall Wechselfehlerströme oder / und pulsierende Gleichfehlerströme auftreten können.

b): Stromkreise mit elektrischen Betriebsmitteln, bei denen im Fehlerfall Wechselfehlerströme oder / und pulsierende Gleichfehlerströme oder / und glatte Gleichfehlerströme auftreten können.

6.3. Schutzmaßnahmen beim Betrieb elektronischer Betriebsmittel auf Baustellen:

Auszüge aus VDE 0100 T704 (Errichten von Starkstromanlagen auf Baustellen) und BGI 608 (Auswahl und Betrieb elektrischer Anlagen und Betriebsmittel auf Baustellen):

- **Einphasig** betriebene elektronische Betriebsmittel AC 230 V / 16 A dürfen über pulsstromsensitive FI - Schutzeinrichtungen mit $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$ oder Schutztrenntransformatoren betrieben werden, wenn keine glatten Gleichfehlerströme zu erwarten sind.
Über eine einphasige **Brückengleichrichtung** kann im Falle eines Erdschlusses **kein glatter Gleichfehlerstrom** fließen, auch wenn im Brückenweig ein Glättungskondensator angeordnet ist. Ist das elektronische Betriebsmittel jedoch eingangsseitig mit einer **Einweggleichrichtung mit Glättungskondensator** versehen, so kann im Falle eines Erdschlusses ein **glatter Gleichfehlerstrom** entstehen.
- Dreiphasig betriebene elektronische Betriebsmittel mit Steckvorrichtungen $\leq 32 \text{ A}$ dürfen nur über allstromsensitive FI – Schutzeinrichtungen mit $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$ oder Schutztrenntransformatoren betrieben werden.
- Dreiphasig betriebene elektronische Betriebsmittel mit Steckvorrichtungen $> 32 \text{ A}$ bis 63 A dürfen nur über allstromsensitive FI - Schutzeinrichtungen mit $I_{\Delta n} \leq 500 \text{ mA}$ oder Schutztrenntransformatoren betrieben werden.
- Dreiphasig betriebene elektronische Betriebsmittel mit Steckvorrichtungen $> 63 \text{ A}$ dürfen nur über allstromsensitive FI - Schutzeinrichtungen oder Schutztrenntransformatoren betrieben werden.
- Elektronische Betriebsmittel mit Festanschluss ohne Steckverbindung dürfen ohne FI - Schutzeinrichtungen oder Schutztrenntransformatoren betrieben werden, jedoch sind Schutzmaßnahmen nach DIN VDE 0100 - 410 anzuwenden.

Anhang A:

Zusammensetzung des Gleichfehlerstromes aus den drei einzelnen Strömen der Phasen L1, L2 und L3:

Bild 7a: Vereinfachte Schaltung aus dreiphasigem Netz mit B6 - Brückenschaltung des FU und eines Isolationsfehlers

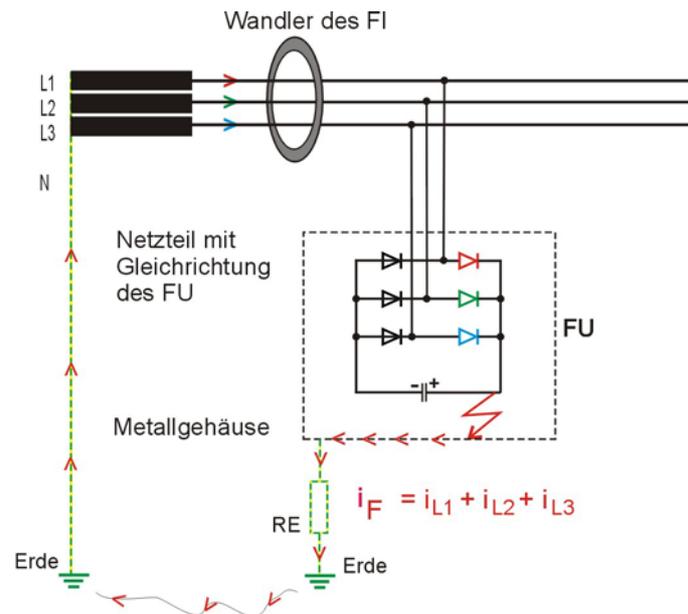
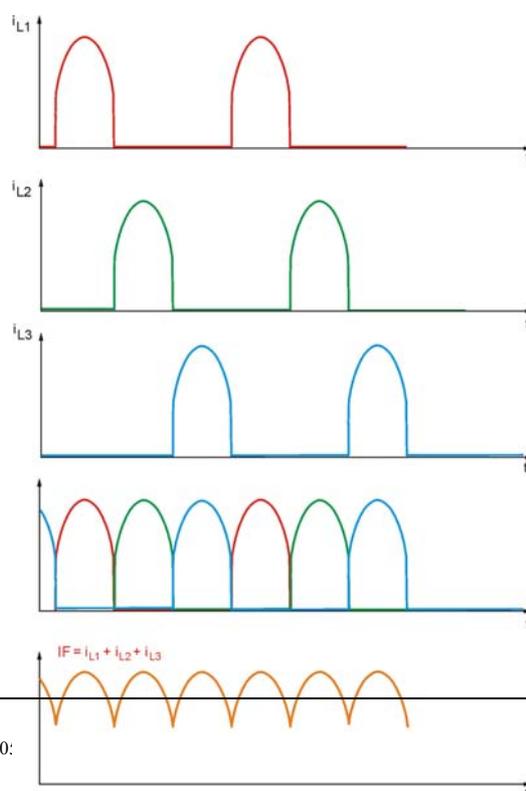


Bild 7b: Darstellung der einzelnen Leiterströme und des sich daraus ergebenden Fehlerstromes



Der Fehlerstrom i_F ergibt sich aus einer Addition der einzelnen Ströme i_{L1} , i_{L2} und i_{L3} in den drei Leitern L1, L2 und L3. Die einzelnen Leiterströme i_{L1} bis i_{L3} stellen pulsierende Gleichfehlerströme mit längerer Nullpunktberührung dar, die sich aus der Kommutierung von drei der 6 Gleichrichterioden ergeben.

Ihre einzelnen magnetischen Flüsse addieren sich im Wandlerkern. Als Summe ergibt sich ein dem Fehlerstrom i_F proportionaler magnetischer Fluss mit hohem Gleichanteil, der eine Vormagnetisierung des Wandlerkernes bewirkt und eine weitere Wechselfeldmagnetisierung durch möglicherweise noch vorhandene Wechselfeldströme stark einschränkt und ggfs. sogar verhindert.

Anhang B:

Grundschiwingung und Oberschwingungen:

Die einfachste und mathematisch nicht mehr zerlegbare Schwingung ist sinusförmig (Bild 8a). Das Frequenzspektrum enthält nur eine einzige Frequenz: die Grundschiwingung f_1 (Bild 8b). Würde man diese Sinusschwingung über einen Verstärker wiedergeben, so hört sich diese sehr weich an. Anders hingegen eine Schwingung mit rechteckförmigem Verlauf (Bild 9a). Über einen Verstärker wiedergegeben, klingt diese Schwingung bei gleicher Grundschiwingung f_1 recht hart und markant. Betrachtet man das Frequenzspektrum (Bild 9b) so sind neben der Grundschiwingung noch viele Oberschwingungen (auch Harmonische genannt) zu erkennen. Die rechteckförmige Schwingung setzt sich also aus einer Addition der sinusförmigen Grundschiwingung (mit der höchsten Amplitude) und vielen sinusförmigen Oberschwingungen zusammen. Die Oberschwingungen sind mathematische Vielfache der Grundschiwingung. Im Falle einer Rechteckschwingung sind es nur ungeradzahlige Vielfache. Diese Reihe der Oberschwingungen setzt sich mit abnehmenden Amplituden bis ins Unendliche fort. (Durch eine Pulsweitenmodulation der rechteckförmigen Ausgangsspannung eines FU sind auch geradzahlige Vielfache im Frequenzspektrum möglich.)

Bild 8a: Sinusförmige Schwingung

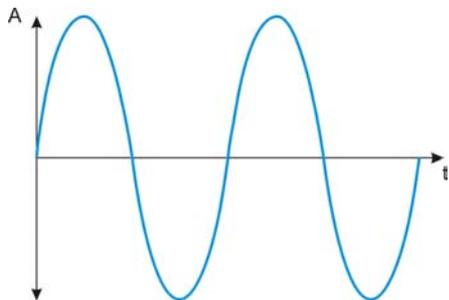


Bild 8b: Frequenzspektrum



Bild 9a: Rechteckförmige Schwingung

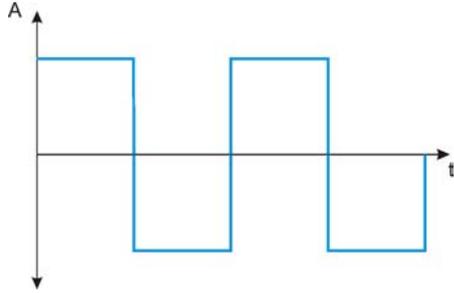
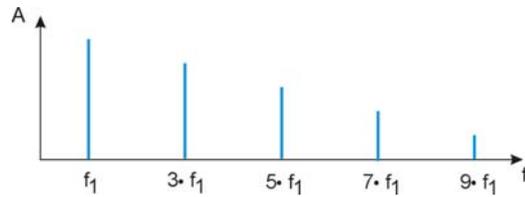


Bild 9b: Frequenzspektrum



Rechteckförmige Ausgangsspannungen des FU:

In Bild 1 ist eine stark vereinfachte Darstellung eines Frequenzumrichters zu sehen. Zu erkennen sind drei Transistorpaare, welche durch Schaltvorgänge die drei Ausgangsspannungen für den Motor generieren. Die Transistoren sind mit einer Steuer-elektronik verbunden und erzeugen eine rechteckförmige Ausgangsspannung mit (überwiegend) konstanter Frequenz (Schalt- oder Chopperfrequenz) bei variierendem Pulsweitenverhältnis. Durch die Veränderung des Pulsweitenverhältnisses wird die Ausgangsfrequenz (Maschinenfrequenz) zur Drehzahlregelung des Motors erzeugt. Aufgrund der hohen Induktivitäten der Motorwicklungen entsteht dann ein fast sinusförmiger Strom mit der Ausgangsfrequenz durch den Motor. Die Schaltfrequenz des FU mit den Oberschwingungen ist im Motor durch ein unangenehmes Piepen hörbar. Da eine abgeschirmte Motorzuleitung wie ein Kondensator wirkt, werden aufgrund der hohen rechteckförmigen Ausgangsspannungen des FU dementsprechend hohe Ableitströme mit den Frequenzanteilen der Schaltfrequenz und Oberschwingungen generiert.

Anhang C:

Produktübersicht:

DFS 4B:

- Erfüllt alle Anforderungen gemäß EN 61008 und VDE 0664 Teil 100.
- $I_{\Delta n} = 0,03$ A: Auslöseschwelle von 0 ... 2 kHz gemäß Herzkammerflimmergrenze des IEC – Reportes 479-2
- Brandschutz und Schutz gegen thermische Körperschädigungen bis 1 MHz für $I_{\Delta n} = 0,03 / 0,1 / 0,3$ A.
- Bemessungsfehlerströme: 0,03 / 0,1 / 0,3 / 0,5 A

DFS 4B SK:

- Erfüllt alle Anforderungen gemäß EN 61008 und VDE 0664 Teil 100.
- $I_{\Delta n} = 0,03$ A: Auslöseschwelle von 0 ... 2 kHz gemäß Herzkammerflimmergrenze des IEC – Reportes 479-2
- Aufgrund einer erhöhten Auslöseschwelle von 2 A im oberen Frequenzbereich optimiert für den Einsatz in elektrischen Anlagen mit Frequenzumrichtern, in denen stark erhöhte variable Ableitströme (> 1 kHz) zu erwarten sind.
- Bemessungsfehlerströme: 0,03 / 0,1 / 0,3 / 0,5 A

DFS 4B SK S:

- Selektive Ausführung des DFS 4B SK
- Bemessungsfehlerströme: 0,3 / 0,5 A

DFS 4B FU:

- Optimiert für den Einsatz in elektrischen Anlagen mit Frequenzumrichtern für Motorfrequenzen bis 100 Hz. Erhöhte Unempfindlichkeit gegenüber stationären Ableitströmen im Bereich von 100 bis 1000 Hz.
- Brandschutz und Schutz gegen thermische Körperschädigungen für Frequenzen von 1 kHz bis 1 MHz für $I_{\Delta n} = 0,03 / 0,1 / 0,3$ A.
- Bemessungsfehlerströme: 0,3 / 0,1 / 0,3 / 0,5 A

DFS 4B FU S:

- Selektive Ausführung des DFS 4B FU
- Bemessungsfehlerströme: 0,3 / 0,5 A



Bemessungsströme für oben aufgeführte Typen:
16 – 125 A
Baubreite: 4 TE
Für Hutschienenmontage



DFS 8B FU:

- Optimiert für den Einsatz in elektrischen Anlagen mit Frequenzumrichtern für Motorfrequenzen bis 100 Hz. Erhöhte Unempfindlichkeit gegenüber stationären Ableitströmen im Bereich von 100 bis 1000 Hz.
- Brandschutz und Schutz gegen thermische Körperschädigungen für Frequenzen von 1 kHz bis 1 MHz
- Bemessungsfehlerstrom: 0,03 A
- Bemessungsströme: 100 / 125 / 160 / 200 / 250 A

DFS 8B FU S:

- Optimiert für den Einsatz in elektrischen Anlagen mit Frequenzumrichtern für Motorfrequenzen bis 100 Hz. Erhöhte Unempfindlichkeit gegenüber stationären Ableitströmen im Bereich von 100 bis 1000 Hz.
- Brandschutz und Schutz gegen thermische Körperschädigungen für Frequenzen von 1 kHz bis 1 MHz für $I_{\Delta n} = 0,1 / 0,3$ A.
- Bemessungsfehlerströme einstellbar: 0,1 / 0,3 / 1,0 A
- Auslöseverzögerung einstellbar (selektiv)
- Bemessungsströme: 100 / 125 / 160 / 200 / 250 A

DMD 3-1 FU und DMD 3-2 FU:

- Differenzstrommonitor, geeignet zur Fehlermeldung
- Optimiert für den Einsatz in elektrischen Anlagen mit Frequenzumrichtern für Motorfrequenzen bis 100 Hz. Erhöhte Unempfindlichkeit gegenüber stationären Ableitströmen im Bereich von 100 bis 1000 Hz.
- Brandschutz und Schutz gegen thermische Körperschädigungen für Frequenzen von 1 kHz bis 1 MHz für $I_{\Delta n} = 0,03 / 0,1 / 0,3$ A.
- DMD 3-1 FU: Bemessungsdifferenzströme einstellbar: 0,03 / 0,1 / 0,3 A
- DMD 3-2 FU: Bemessungsdifferenzströme einstellbar: 0,3 / 0,5 / 1,0 A
- Auslöseverzögerung einstellbar bis 1,0 s
- Integrierter Durchsteckwandler: Durchmesser 25 mm

- Einstellbarer Vor- und Hauptalarm mit jeweils zugeordnetem potentialfreien Wechsler 250 VAC / 2 A
- LED-Balkenanzeige