

Durchmesser übersteigt und Hörerplätze in mindestens vier Ebenen aufweist – nämlich auf der Grundfläche in der Mitte des Innenraums sowie auf drei Emporen, die in einen Winkelbereich von bis zu 300° den Innenraum umfassen. In konventioneller Beschallungstechnik wäre diese Konstellation zwar schwierig, aber wohl in den Griff zu bekommen gewesen. Die zusätzliche Einschränkung durch die Forderung nach der „Unsichtbarkeit“ der Lautsprecher, zwang die Planer, unkonventionelle Wege zu beschreiten, und zwar insbesondere im Bereich der Emporen.

5.2 Beschallungskonzept

Für die Parkettebene kamen Line-Array-Lautsprecher zum Einsatz. Da hier eine wirklich „unsichtbare“ Installation nicht möglich war, mussten Lautsprecher mit möglichst schlankem Profil und dennoch wohldefinierten Abstrahleigenschaften gefunden werden. Man entschied sich hier für Intellivox-Systeme des niederländischen Herstellers Duran Audio – genauer: für die besonders schlank gebaute Intellivox-2c mit einer Länge von nahezu 3 m. Als Besonderheit weist dieses System eine individuelle DSP-Ansteuerung der einzelnen Lautsprecher auf, mit der auch eine elektronische Schwenkung der Richtcharakteristik in der Vertikalen möglich ist.

Die Kombination dieser technischen Merkmale erlaubt nun die Versorgung der gesamten Parkettebene mit nur zwei optisch sehr unauffälligen Lautsprechersystemen, die links und rechts des Altarbereiches installiert sind. Die Länge der Line-Arrays sorgt für eine sehr definierte Abstrahlung in der Vertikalen, sodass unerwünschte Bereiche oder gar die Kuppel nicht beschallt werden. Gleichzeitig haben die Systeme einen sehr breiten horizontalen Abstrahlwinkel, mit dem auch die fast seitlich von den Lautsprechern gelegenen Bereiche erfasst werden. Die Länge des Arrays sorgt unter anderem auch für ein ausgedehtes Nahfeld und mithin einen großen Bereich, in dem sich der Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Entfernung wenig stark ändert. Ein Verhalten, das es gestattet, sowohl weit entfernte, als auch nah am Lautsprecher gelegene Bereiche zu versorgen, ohne im Nahbereich übermäßig hohe Schalldruckpegel in Kauf nehmen zu müssen. Die Richtcharakteristik ist so geneigt, dass die Fensterflächen auf der Rückseite nur wenig angeregt werden.

Fortsetzung

ELEKTRO
PRAKTIKER

Beschallung der Emporen,
Audio-Technik,
Gebäudeautomation,
Prüfung und Wartung

Allstromsensitive Fehlerstromschutzeinrichtungen

S. Davids, Norden

Der Einsatz von elektronischen Betriebsmitteln nimmt in der Elektroinstallation immer mehr zu. Im Fehlerfall können hier glatte Gleichfehlerströme und hochfrequente Wechselfehlerströme auftreten, die von einer handelsüblichen Fehlerstromschutzeinrichtung des Typs A nicht erfasst werden. Abhilfe schaffen allstromsensitive FI-Schutzschalter.

1

Grundlagen

1.1 RCDs in elektrischen Anlagen mit Frequenzumrichter

Mehrphasig betriebene elektronische Betriebsmittel, z. B. Frequenzumrichter (FU) oder Wechselrichter, können im Fehlerfall einen glatten Gleichfehlerstrom erzeugen (Bild 1). Dieser durch die B6-Schaltung im Eingang des FU hervorgerufene glatte Gleichfehlerstrom würde eine herkömmliche RCD (Residual current-operated protective device) vom Typ A oder AC nicht auslösen, da im Summenstromwandler der RCD keine zeitlich veränderliche Magnetisierung erfolgt, die für eine induktive Energieübertragung auf das Auslöserelay der RCD notwendig ist.

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

1.2 Fehler- und Ableitströme

Fehlerströme sind überwiegend ohmsch und entstehen durch Isolationsfehler zwi-

schen 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 einen aktiven Leiter des Netzes berührt (Bild 2). **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 (Bild 3).

Fehlerströme und auch Ableitströme können je nach Anwendung und elektrischer Anlage mehrere, von der Netzfrequenz 50 Hz deutlich verschiedene Frequenzanteile gleichzeitig aufweisen.

Die RCD 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 der RCD überschreitet, obwohl kein Fehler (Fehlerstrom) in der elektrischen Anlage vorliegt.

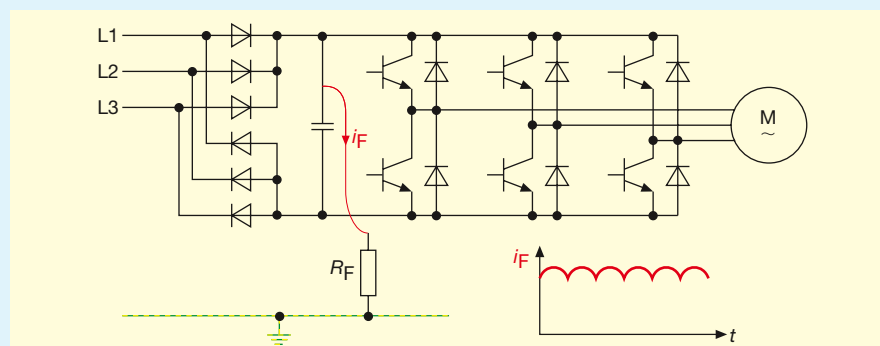
2

Fehlerströme in Anlagen mit Frequenzumrichtern

Isolationsfehler am Eingang des Frequenzumrichters. Bild 4 zeigt einen Erdschluss am Eingang des Frequenzumrichters. Es fließt ein rein **sinusförmiger 50-Hz-Fehlerstrom** durch den Körper der Person. Bei entsprechender

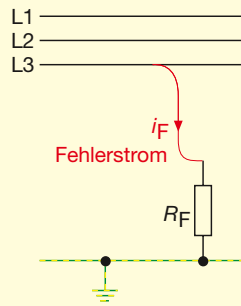
Autor

Stefan Davids ist Mitarbeiter im technischen Vertrieb der Fa. Doepke Schaltgeräte, Norden.

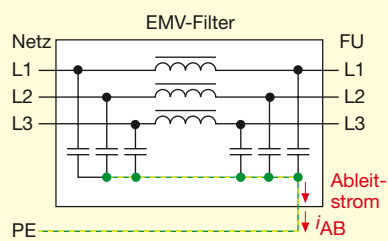


1 Erzeugung eines nahezu glatten Gleichfehlerstroms

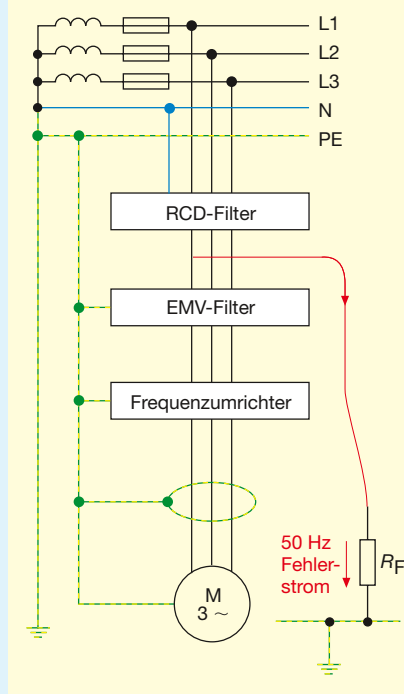
Vereinfachte Darstellung eines FU mit B6-Brückengleichrichter, Zwischenkreiskondensator, Ausgangsstufe und Motor



② Wechselfehlerstrom



③ Kapazitiver Ableitstrom (vereinfachte Darstellung eines EMV-Filters)



④ Fehlerstrom 50 Hz

Höhe dieses Fehlerstromes erfolgt eine sichere Auslösung der RCD.

Isolationsfehler am Zwischenkreiskondensator des Frequenzumrichters. In Bild ⑤ tritt ein Isolationsfehler vom Pluspol des Zwischenkreiskondensators zum Gehäuse des Frequenzumrichters auf. Dieser Fehler könnte z. B. durch Schmutz- und Feuchte-Einwirkung verursacht sein. Hier fließt ein nahezu **glatter Gleichfehlerstrom**. Eine sichere Auslösung bei Verwendung einer RCD vom Typ B ist bei entsprechender Höhe des Gleichfehlerstromes gewährleistet.

Fehler zwischen FU und Motor. Ein Beispiel hierfür ist eine beschädigte Motorzuleitung (Bild ⑥): 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. Es 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, der durch die eingangsseitige Sechspuls-Brückengleichrichtung des FU generiert wird.

3 Ableitströme

3.1 Allgemeine Betrachtung

Es wird zwischen stationären, variablen und transienten Ableitströmen unterschieden. Zur Erläuterung hierzu dient noch einmal das Beispiel einer Anlage mit einem Asynchronmotor, der mit einem Frequenzumrichter (FU) betrieben wird.

Zur Einhaltung der einschlägigen EMV-Vorschriften darf der FU nur über ein vorgeschaltetes EMV-Filter, das 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.

3.2 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 sowie Frequenzanteile im Bereich der Eigenresonanzfrequenz des EMV-Filters (typisch im Bereich von 2 bis 4 kHz) auf. Besonders einfache und preiswerte EMV-Filter mit kleinen Induktivitäten und großen Kondensatoren bewirken hohe Ableitströme und können zur ungewollten Auslösung der RCD 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 Außenleiter L1, L2 und L3 verteilt werden, um eine Auslösung der RCD zu vermeiden.

3.3 Variable Ableitströme

Wird der Motor jetzt durch den FU in seiner Drehzahl geregelt, so treten noch weitere Frequenzanteile oberhalb von 1 kHz im Gesamtableitstrom auf. Besonders die Schalt-

frequenz 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.

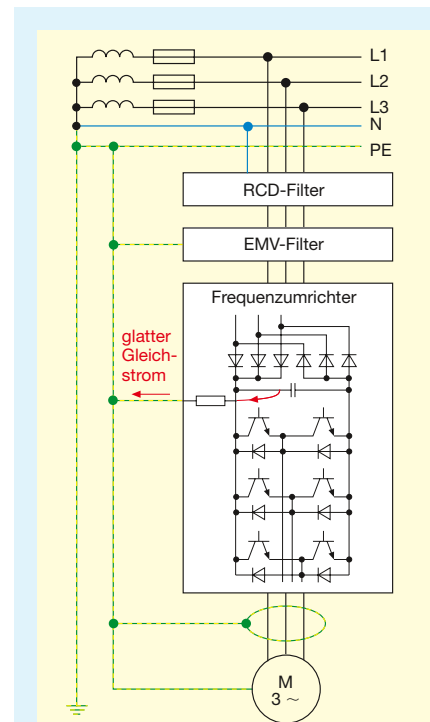
Zudem können die Frequenzanteile im Bereich der Eigenresonanzfrequenz des EMV-Filters stark ansteigen, wenn die Schaltfrequenz des FU etwa gleich oder ein Vielfaches der Eigenresonanzfrequenz des EMV-Filters ist. Das EMV-Filter wird durch die Schaltfrequenz des FU zum Schwingen angeregt und kann sehr hohe Ableitströme im Bereich der Eigenresonanzfrequenz generieren. Auch wenn eine sehr hohe Schaltfrequenz des FU eingestellt ist (z. B. 16 kHz), kann der FU bei niedrigen Ausgangsfrequenzen (auch beim Hoch- und Herunterfahren des Motors) selbsttätig aufgrund seines geänderten Modulationsverfahrens die Schaltfrequenz deutlich verringern. Im ungünstigsten Fall ist die dann verringerte Schaltfrequenz etwa gleich oder ein Vielfaches der Eigenresonanzfrequenz des EMV-Filters, sodass sich der Ableitstrom stark erhöht und somit die Gefahr einer unerwünschten Auslösung einer RCD erheblich steigt. Stationäre und variable Ableitströme verlaufen bei konstanter Drehzahl des Motors nahezu periodisch. Eine RCD reagiert auf diese Ableitströme mit einer Abschaltung, wenn sie in ihrer Höhe die Ansprechschwelle der RCD 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 der RCD bewirken.

3.4 Transiente Ableitströme

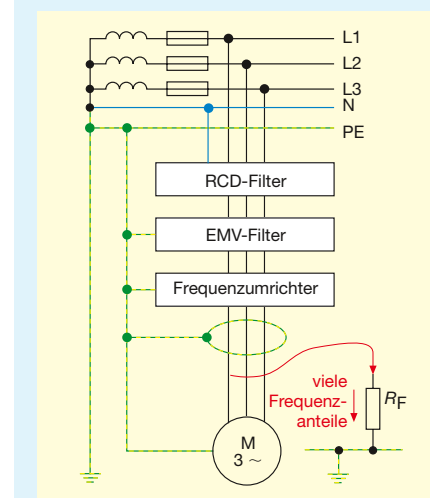
Bei Ausschaltvorgängen treten im Netz infolge der Induktivitäten in den Strompfaden Spannungsspitzen auf, die aufgrund der steilen Anstiegsflanken sehr hohe Frequenzanteile enthalten. Auch durch Einschaltungen bei ungünstigen Phasenwinkeln der Netzspannung enthält das Spektrum der Netzspannung kurzzeitig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

Bei Aufschaltung der Netzspannung mit Schaltern ohne Sprungschaltfunktion werden je nach Schaltgeschwindigkeit die drei Außenleiter 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.



5 Gleichfehlerstrom



6 Fehlerstrom mit Frequenzgemisch

Fehlauflösungen infolge transienter Ableitströme können vielfach durch den Einsatz von RCDs mit Ansprechverzögerung vermieden werden. Um die Schutzwirkung nicht unzulässig zu beeinträchtigen, darf die Ansprechverzögerung (Nichtansprechzeit) bestimmte Maximalwerte nicht überschreiten. Hieraus folgt, dass die RCD auch gegen transiente Ableitströme nicht beliebig „immunisiert“ werden kann. Die RCDs der Baureihen DFS 4B und DFL 8B von Doepke weisen beispielsweise eine solche Ansprechverzögerung auf. Überschreiten die transienten Ableitströme in ihrer Dauer jedoch die durch die Vorschriften vorgegebene höchstzulässige Nichtansprechzeit der RCD, so kommt es dennoch bei entsprechender Höhe zu einer Auslösung.

4 Maßnahmen zur Reduzierung von Ableitströmen

Wie zuvor deutlich wurde, geht eine Erhöhung der RCD gegen Fehlauslösungen 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 Einrichtung elektrischer Betriebsmittel“, Absatz 531.3.3, ist die elektrische Anlage so auszulegen, dass der Ableitstrom das 0,4-fache des Bemessungsfehlerstromes der RCD nicht überschreitet.

4.1 Reduzierung von stationären Ableitströmen

- Viele FU-Hersteller bieten mittlerweile auch 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 dann 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, sodass 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 Außenleiter verteilt werden.

4.2 Reduzierung von variablen Ableitströmen

- Die abgeschirmte Motorzuleitung ist möglichst kurz zu halten.
- Sinus-Filter, EMV-Sinus-Filter, du/dt-Filter oder Ausgangsdrosseln 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.

4.3 Weitere Möglichkeiten

- Netzdrosseln, die 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 Motorleitungen 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, die 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.

4.4 Reduzierung transienter Ableitströme

Wie bereits 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 RCDs 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 bis 40 ms ergeben. Während dieser Zeit ist die Symmetrierung des Sternpunktes der drei Kondensatoren nicht mehr gegeben. Es kann ein erheblicher kapazitiver Ableitstrom über den Schutzleiter fließen und die RCD sofort wieder zum Auslösen bringen. Daher sollte eine Zuschaltung und Trennung nur mit Hilfe eines zusätzlichen, schnell schaltenden Schaltorgans (z. B. Trennschalter mit Sprungschaltfunktion oder allpolig schaltendes Schütz) und nicht mit der RCD selbst erfolgen.

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

auch den hohen Einschaltableitstrom deutlich reduzieren.

4.5 Eigenschwingungen eines EMV-Filters

Bei elektronischen Betriebsmitteln wie z. B. Frequenzumrichtern können in der Regel verschiedene Schaltfrequenzen (Chopper) gewählt werden. Im ungünstigen Fall (z. B. bei langen geschirmten Motorzuleitungen) kann die Schaltfrequenz zu einer Schwingung eines vorgeschalteten EMV-Filters und somit zu stark überhöhten Ableitströmen führen, die dann eine Auslösung der RCD bewirken. In diesem Fall ist die Schaltfrequenz des FU zu ändern. Zudem ist die vom FU- bzw. Filterhersteller maximal zulässige Länge der geschirmten Motorzuleitung zu beachten.

Eine erhöhte Gefahr einer unerwünschten Auslösung der RCD besteht, wenn die Schaltfrequenz des FU etwa gleich oder ein Vielfaches der Eigenresonanzfrequenz des EMV-Filters ist. Viele FU verringern bei niedrigen Ausgangsfrequenzen (typisch unterhalb von etwa 20 bis 30 Hz) die Schaltfrequenz selbsttätig (auch beim Hoch- und Herunterfahren des Motors). Höhere Schaltfrequenzen (auch Vielfache höherer Ordnung der Eigenresonanzfrequenz) minimieren generell die Gefahr der Schwingneigung des EMV-Filters.

Beispiel: Die Eigenresonanzfrequenz des EMV-Filters beträgt 2,1 kHz. Eine möglicherweise gewählte Schaltfrequenz des FU von 2 kHz liegt in unmittelbarer Nähe der Eigenresonanzfrequenz und kann ggf. zu sehr hohen Ableitströmen führen. Auch eine Schaltfrequenz von 4 kHz kann noch zu hohen Ableitströmen führen, da sie fast dem 2-fachen der Eigenresonanzfrequenz entspricht. Höhere Schaltfrequenzen und besonders Nichtvielfache der Eigenresonanzfrequenz (z. B. 6 kHz oder besser 7 kHz) verringern die Gefahr der Schwingneigung des EMV-Filters und die damit verbundenen hohen Ableitströme.

Weitere Einzelheiten bezüglich der Eigenresonanzfrequenz des EMV-Filters sowie eine mögliche Deaktivierung der selbsttätigen Änderung der Schaltfrequenz eines FU bei niedrigen Ausgangsfrequenzen sollten ggf. bei den Herstellern dieser Betriebsmittel erfragt werden. ■

Fortsetzung



**Vorschriftsmäßiger Einsatz
eines allstromsensitiven
Fehlerstromschutzes**