

Anwendung aktiver Gleichtakt-Filterung zur effizienten Reduzierung von Ableitströmen in der Leistungselektronik als Ergänzung zu passiven EMV-Filtern

Dipl.-Ing. Christian Paulwitz, EPCOS AG, EMV-Labor, Regensburg
M. Sc. Yasin Karınca, EPCOS AG, Heidenheim
Dr.-Ing. Stefan Weber, EPCOS AG, München

1 Ableitstromproblematik von Frequenzumrichtern mit / ohne EMV-Filter

In [1] wurden Ableitstrom-Messverfahren im Hinblick auf ihre Eignung insbesondere bei leistungselektronischen Anwendungen diskutiert. Dabei wurde festgestellt, dass höherfrequente Ableitstromanteile bedingt durch leistungselektronische Schaltfrequenzen nicht durch die Wahl kleiner EMV-Filterkapazitäten gegen Erde beschränkt werden können, sondern im Rahmen passiver Filtermaßnahmen große Induktivitätswerte erfordern. Insbesondere bei kleinen Schaltfrequenzen und großen Leistungen ist dies besonders aufwendig, und diese beiden Randbedingungen treffen bei vielen Frequenzumrichteranwendungen gleichzeitig zu.

Während große Kapazitäten gegen Erde die Ableitstromanteile, die durch die Versorgungsspannung getrieben werden vergrößern (Netzfrequenz und Harmonische), tragen sie dazu bei, die Ableitstromanteile höherer Frequenzen, die aus der Anwendung heraus getrieben werden, im System zu halten, so dass sie nicht über die Netzleitung fließen. Bild 1 veranschaulicht die Situation, wobei die Darstellung auf die asymmetrischen Strompfade (Gleichtakt) beschränkt wurde.

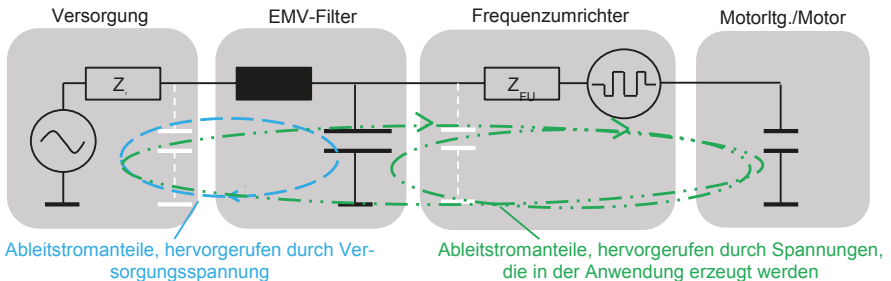


Bild 1: Quellen, die für die Entstehung von Ableitströmen verantwortlich sind

Will man nun das EMV-Filter sowohl im Hinblick auf die über den Netzanschluss fließenden Ableitstromanteile der Versorgungsspannung als auch die der Schaltfrequenz optimieren, so gerät man bei der Auslegung eines passiven Filters in einen Zielkonflikt. Der Kondensatorwert ist letztlich durch die Versorgungsspannung sowie die Netzunsymmetrien begrenzt. Sind dann die Schaltfrequenz-Anteile des Ableitstroms noch zu hoch, so ist deren Reduzierung nur noch über eine Erhöhung der Induktivität möglich (Bild 2). Dies führt zu Volumen, Gewicht, Kosten und ist zumindest bei großen Leistungen völlig unwirtschaftlich.

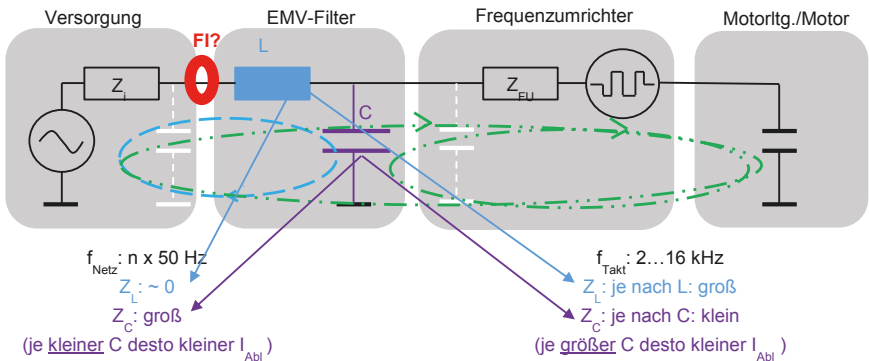


Bild 2: Ableitstromoptimierung eines passiven EMV-Filters in der Anwendung

2 Einsatz von Fehlerstromschutzeinrichtungen

2.1 Ziele und normative Anforderungen

Da es in dreiphasigen Umrichteranwendungen zu Fehlerströmen mit hohem Gleichstromanteil kommen kann, sind hier allstromsensitive Fehlerstromschutzeinrichtungen des Typs B oder B+ zwingend vorgeschrieben. Je nach Schutzziel werden 30-mA-Schutzschalter zum zusätzlichen Schutz gegen elektrischen Schlag eingesetzt und 300-mA-Schutzschalter für den erweiterten Brandschutz. Dabei ist beim Typ B keine Bewertung von Fehlerströmen $>1 \text{ kHz}$ definiert. Bei der Netzfrequenz 50 Hz hat dieser im Bereich zwischen dem halben und dem vollen Bemessungsfehlerstrom auszulösen, bei 150 Hz zwischen dem halben und dem 2,4-fachen Bemessungsfehlerstrom, und bei 1 kHz zwischen dem vollen und dem 14-fachen Bemessungsfehlerstrom [2]. Im darüberliegenden Frequenzbereich ist die Fehlerstromschutzeinrichtung natürlich nicht gänzlich unempfindlich, sondern nur ihr Verhalten nicht definiert. Generell kann man aber sagen, dass technologisch bedingt die Empfindlichkeit bei Frequenzen im kHz-Bereich deutlich abnimmt.

Dies stellt aus Sicht des Brandschutzes ein Problem dar. Hierfür sind Fehlerstromschutzeinrichtungen mit dem Bemessungsfehlerstrom 300 mA auf dem Markt. Während die Abnahme der Empfindlichkeit von Fehlerstromschutzeinrichtungen den Personenschutz nicht einschränkt, ist die Fehlerstromfrequenz für das Brandrisiko in feuergefährdeten Betriebsstätten nicht relevant. Aus diesem Grund wurden Fehlerstromschutzeinrichtungen des Typs B+ mit einem definierten Frequenzbereich bis 20 kHz entwickelt. Sie müssen oberhalb 1 kHz ab dem halben Bemessungsfehlerstrom als Untergrenze bis maximal 420 mA als vom Bemessungsfehlerstrom unabhängige Obergrenze ansprechen [3].

Fehlerstromschutzeinrichtungen, die am Netzanschluss eingesetzt werden, können natürlich auch nur Fehlerströme erkennen, die über den Netzanschluss fließen. Ableitströme – und auch Fehlerströme – innerhalb eines Systems können dagegen nicht erkannt werden. Ableitströme in Frequenzumrichteranwendungen innerhalb des Systems sind immer größer als nur der Anteil, der über den Netzanschluss fließt.

2.2 Frequenzabhängiges Verhalten von Fehlerstromschutzeinrichtungen: reale Fehlerstromschutzeinrichtungen

Im Zuge der Recherchen zu diesem Beitrag wurden keine Fehlerstromschutzeinrichtungen gefunden, deren reale tatsächliche Auslöseschwelle im Frequenzbereich oberhalb 1 kHz in der Nähe der normativen unteren Auslöseschwelle liegen. Typischerweise sprechen die Geräte erst bei deutlich höheren Fehlerströmen an. So gibt [5] beispielhaft als typische Auslösekennlinie für einen FI-Schutzschalter 30 mA Typ B einen steigenden Kennlinienverlauf von 1 kHz bis 10 kHz von 70 bis über 1000 mA, für 300 mA Typ B von 600 bis etwa 3500 mA bei 5 kHz an. [4] spezifiziert Toleranzbereiche mit unterer und oberer Auslöseschwelle, was die Systemplanung erleichtert. Leider sind im Beispiel für einen FI-Schutzschalter Typ B 30 bzw. 300 mA nur Daten bis 1 kHz charakterisiert. Für den Typ B+ ist für beide Bemessungsfehlerströme oberhalb 1 kHz eine Auslöseschwelle zwischen knapp 200 mA und 420 mA dokumentiert. Sehr detailliert sind die Beispiele in [6], mit Toleranzbändern bis 100 kHz sowohl für den Typ B als auch für den Typ B+. Zudem stellt dieser Hersteller auch ein Mess-System zur Verfügung, mit dem der Ableitstrom gemessen und analysiert werden kann, wobei die Kennlinien der eigenen Produkte mit Toleranzen als Referenz hinterlegt sind. Ein solches Analysesystem wurde auch für die Untersuchung der Anwendungsbeispiele in diesem Beitrag verwendet [7].

Eine Untersuchung des Auslöseverhaltens einiger selbst ausgewählter Beispiele von Fehlerstromschutzeinrichtungen (unabhängig von den oben genannten Literaturquellen von Herstellern) war zum Abgabetermin der schriftlichen Ausarbeitung dieses Beitrags noch nicht abgeschlossen und wird im Kongress-Vortrag vorgestellt.

3 Prinzip der aktiven Gleichtakt-Filterung

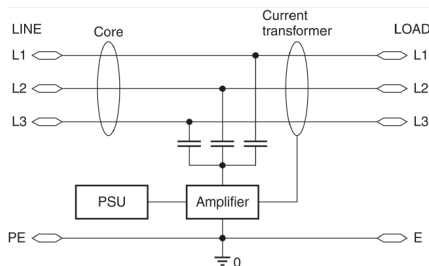


Bild 3: Prinzip der aktiven Gleichtaktfilterung als stromgesteuerte Stromquelle [9]

Das Prinzip aktiver Unterdrückung von Ableitströmen (Gleichtakt-Störströmen) ist lange bekannt und wurde für spezielle Einsätze auch bereits vorgestellt, siehe z. B. [8]. Mittlerweile sind kommerziell erhältliche Produkte auf dem Markt [9]. Dabei wird der Gleichtaktstrom induktiv gemessen und als Eingangssignal in einen Verstärker eingespeist. Der Verstärker speist einen entsprechenden phasenverschobenen Kompensationsstrom über Kondensatoren zurück auf die stromführenden Leiter der Anwendung. Das Funktionsprinzip entspricht damit einer stromgesteuerte Stromquelle (Bild 3).

In der Strommessung und der darauffolgenden Ankopplung an den Verstärkereingang wird ein Hochpassverhalten umgesetzt, denn die Gleichtakt-Stromkompensation soll

erst ab einer Frequenz von etwa 1 kHz wirken. Im darunter liegenden Frequenzbereich darf keine Kompensation erfolgen, da Isolationsfehlerströme sicher erkannt werden müssen. Des weiteren ist eine HF-Entkopplung zum Netz hin (Ferritkern) notwendig, damit die in der Verstärkerelektronik erzeugten HF-Störungen sich nicht negativ auf die Einhaltung von Störspannungsanforderungen auswirken.

Aufgrund der begrenzten Verstärkerleistung ist solch ein aktives Gleichtaktfilter in seinem Arbeitsbereich begrenzt. Es wird ein maximaler Gleichtaktstrom (Spitzenwert) angegeben. Damit dieser Wert in Frequenzrichterapplikationen nicht überschritten wird, ist es grundsätzlich notwendig, das aktive Filter zwischen dem Netzanschluss und dem EMV-Filter zu positionieren, so dass der größte Teil des asymmetrischen Stromes im Bereich der Schaltfrequenz vom Filterkondensator in das System zurückgeführt wird und nicht vom aktiven Filter kompensiert werden muss.

4 Anwendungsbeispiele

Im folgenden Beispiel [10] wird das aktive Filter in beschriebener Weise eingesetzt. Die Messungen erfolgten mit [7]. In den Darstellungen Bild 4 bis Bild 6 ist jeweils links die Messung ohne aktive Filterung, rechts mit aktiver Filterung dargestellt. Dabei wurde zunächst ein Umrichter mit größerer Kapazität gegen Erde eingetauscht – die Aufnahmen erfolgten in eingeschwingener Betriebsart. Bereits in der Zeitbereichsmessung wird die Reduktion des Ableitstroms deutlich (unterschiedliche Skalierung berücksichtigen! – vgl. Bild 3), sehr anschaulich dann in der spektralen Darstellung (Bild 4).

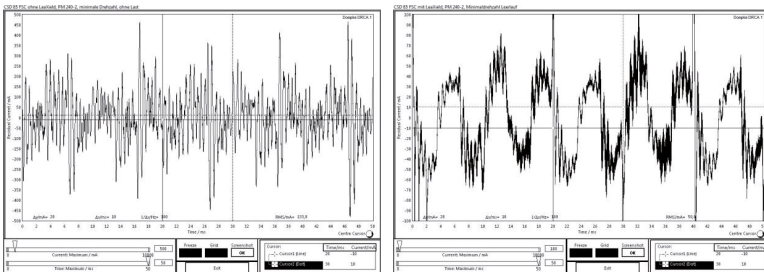


Bild 3: Beispiel [10] Zeitbereich (links bis 500 mA, rechts bis 100 mA)

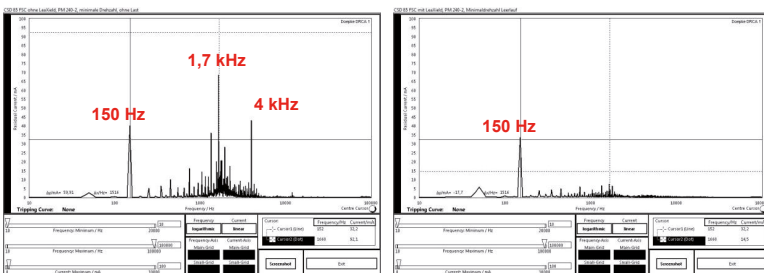


Bild 4: Beispiel [10] spektrale Darstellung

Bei einem beispielhaft gewählten Fehlerstromschutzschalter (300 mA, Typ B+) wird über das gesamte Spektrum ohne die aktive Filterung die Ausschöpfung der Auslöseschwelle mit 37 % angegeben und mit der aktiven Filterung auf 15 % reduziert (Bild 5). Dies ist eine Aufnahme in einem stabilen Betriebsmodus. Zu bedenken ist jedoch, dass bei einer Ausschöpfung der Auslöseschwelle zwischen 50 und 100 % man sich im Toleranzbereich des Fehlerstromschutzschalters befindet und mit zunehmendem Ausschöpfungsgrad die Wahrscheinlichkeit des Ansprechens eines individuellen Geräts statistisch steigt. Im dynamischen Verhalten (Beschleunigung) wurde in dieser Applikation ein Ausschöpfungsgrad der Anschwechschwelle von gut 60 % erreicht, so dass eine Fehlerstromschutzschieneung des gewählten Typs ansprechen kann.

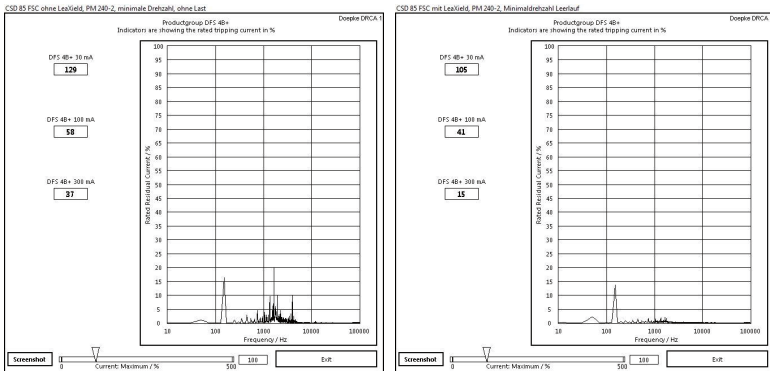


Bild 5: Beispiel [10] spektrale Darstellung unter Berücksichtigung des Ansprechverhaltens eines beispielhaft gewählten Fehlerstromschutzschalters (300 mA, Typ B+: links 37 % - im dynamischen Betrieb bis >60 %, rechts 15 %).

Im gegebenen Beispiel wurde der Umrichter auch gegen einen vergleichbaren Umrichter (auch gleiche Schaltfrequenz) mit geringerem Kondensatorwert gegen Erde eingesetzt. Während der niederfrequente Ableitstromanteil dadurch verringert wird, steigt der Schalfrequenzanteil deutlich an, so dass der zulässige Arbeitsbereich von 1000 mA in der Spitze gelegentlich überschritten wird und der Verstärker in Sättigung gerät (Bild 6). Ein Betrieb an dem zuvor zugrundegelegten Fehlerstromschutzschalter ist in beiden Fällen nicht möglich, da die Auslöseschwelle zu über 100 % ausgeschöpft wird.

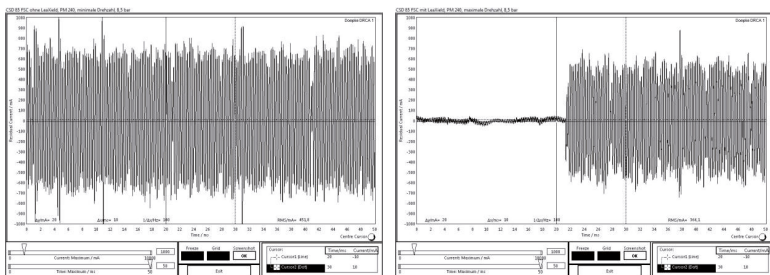


Bild 6: Beispiel [10] Zeitbereich (Skalierung bis 1000 mA) – Verstärker wird übersteuert

5 Auswirkungen auf die Störspannung

Frequenzrichterapplikationen haben üblicherweise Anforderungen an die leitungsgebundene Störaussendung im Frequenzbereich zwischen 150 kHz und 30 MHz gemäß [11] zu erfüllen. Je nach Anwendungsbereich sind unterschiedliche Grenzwertanforderungen gegeben: Kategorie C1 bis Kategorie C3, wobei C1 die höchste Anforderung darstellt. Aufgrund der aktiven Gleichtaktfilterung ist zunächst grundsätzlich eine Verbesserung der leitungsgebundenen Störaussendung zu erwarten, zumindest im unteren Frequenzbereich der Messungen und soweit Gleichtaktstörgrößen hier dominant sind, was von Gerät und Betriebsart abhängt. Andererseits beinhaltet das aktive Filterelement ein Schaltnetzteil und Elektronik und ist somit selbst eine hochfrequente Störquelle. Beide Elemente – aktives Filter und Frequenzrichter – stehen als Störquellen in einer voneinander abhängigen Wechselbeziehung. Die Auswirkung auf die Störspannung wird dabei am besten anhand von Beispielen dargestellt.

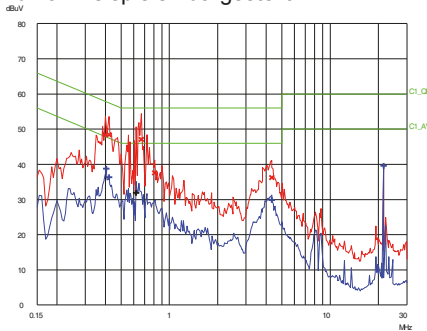


Bild 7: Aktives Filtermodul nach [9], keine weiteren Geräte angeschlossen (Messung siehe [13]) – obere Kurve PK/QP-Detektor, untere Kurve AV-Detektor

Bild 7 zeigt nun die Störspannungsmessung eines aktiven Filtermoduls nach [9] ohne Frequenzrichter. Nur das Filtermodul selbst ist angeschlossen und in Betrieb. Die Grenzwertkategorie C1 wird eingehalten, auch mit grundsätzlich angemessenem Abstand unter den Gesichtspunkten einer EMV-Prüfung. Anders als bei einem passiven Filter ist das aktive Element jedoch nicht ohne eigene Störungen, so dass teilweise der Abstand zum Grenzwert nur ca. 10 dB beträgt (400 bis 700 kHz).

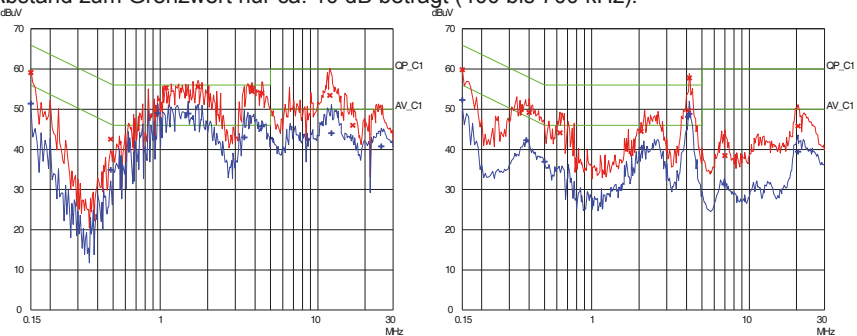


Bild 8: Anwendungsbeispiel nach [12] mit Schaltfrequenz 12,5 kHz; links ohne, rechts mit aktivem Filtermodul nach [9]

In einer Frequenzumrichteranwendung mit EMV-Filter und Schaltfrequenz von 12,5 kHz [12] wurde durch die Kombination mit einem aktiven Filterelement breitbandig bis etwa 3 MHz eine deutliche Verbesserung erzielt (Bild 8), wobei der Grundstörspegel des aktiven Filters (Bild 7) natürlich nicht unterschritten werden kann. Kritisch ist jedoch eine Resonanz bei gut 4 MHz deren Pegel mit EMV-Filter und aktivem Filter höher ist als mit jeweils einem der beiden Elemente.

Im gleichen Beispiel wird bei einer Schaltfrequenz von 2 kHz bei Anwendung des aktiven Filtermoduls dessen Verstärker übersteuert und gerät in Sättigung. Die Auswirkung auf die Störspannungsmessung sieht sehr ähnlich der Sättigung eines passiven Filters aus (Bild 9). Das aktive Filter ist hier außerhalb der Spezifikation betrieben und dadurch ohne Zweck.

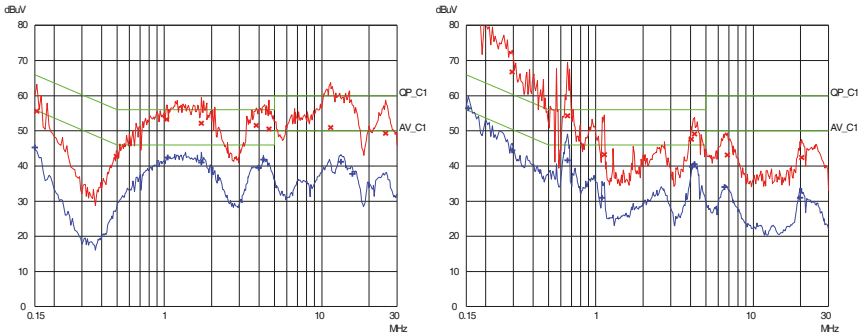


Bild 9: Anwendungsbeispiel nach [12] mit Schaltfrequenz 2 kHz; links ohne, rechts mit aktivem Filtermodul nach [9]

In einem weiteren Beispiel [13] ist die Störaussendung eines Frequenzumrichters (Standby-Betrieb) durch hohe Pegel eines Schaltnetzteils mit 100-kHz-Harmonischen gekennzeichnet. Die Kombination mit der breitbandigen Störaussendungskurve des Verstärkers führt zu Mischprodukten und dadurch zu einer Anhebung der Störungen im Frequenzbereich zwischen 1,5 und 6 MHz.

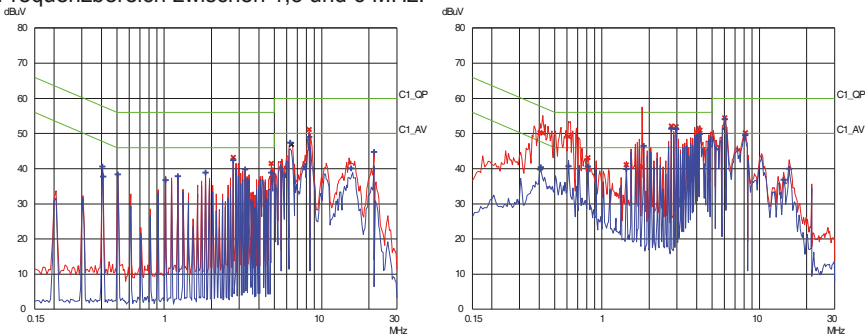


Bild 10: Anwendungsbeispiel nach [13] im Standby-Betrieb; links ohne, rechts mit aktivem Filtermodul nach [9]

Die hier gezeigten Beispiele sollen mögliche Wechselwirkungen illustrieren, die Auswahl ist nicht repräsentativ. Das aktive Filter entsprach dem derzeit verfügbaren Entwick-

lungsstand. Es konnte das Verbesserungspotential der Störspannung durch aktive Filterung des Ableitstroms bzgl. Gleichtakt-Störungen grundsätzlich gezeigt werden, aber auch Wechselwirkungen zwischen aktivem Filter und Anwendung. Referenz war der schärfste Grenzwert nach [11] (Kategorie C1).

6 Zusammenfassung

In Anwendungen mit Frequenzumrichtern fließen betriebsbedingte Ableitströme im Schaltfrequenzbereich, die durch die Gleichtaktspannung am Umrichterausgang erzeugt werden. Sie fließen über dort befindliche parasitäre Kapazitäten gegen Erde und werden in der Regel über Leitungsschirme oder geerdete Strukturen zum Netzanschluss zurückgeführt. EMV-Maßnahmen am Netzanschluss halten die hochfrequenten Ströme vom Netz fern und leiten sie auf definiertem niederimpedanten Pfad zurück zur Quelle. Passive Maßnahmen wie Y-Kondensatoren erzeugen aber selbst wieder netzfrequente Ableitströme, die auch zu Fehlauslösungen von Fehlerstromüberwachungseinrichtungen führen können.

Der Vorteil der aktiven Filterung besteht in der frequenzselektiven und dabei kompakten und kostengünstigen Ableitstrombegrenzung auf das System. Während nur die schaltfrequenten Ableitströme zurückgeleitet werden, werden zusätzliche niederfrequente Ableitströme vermieden, und die niederfrequenten Fehlerströme können zuverlässig detektiert werden.

Um auch systeminterne Ableitströme im kHz-Bereich zu reduzieren bzw. zu überwachen, wäre eine aufwendige Filterung des Umrichterausgangs notwendig in Kombination mit einem Fehlerstromschutzschalter in der Motorleitung, wie es für explosionsgeschützte Bereiche gemacht wird: mit Sinusfilter, Trenntrafo und Fehlerstromschutzschalter.

Eine Reduktion der Ableitströme am Netzanschluss durch Impedanzerhöhung ist im unteren kHz-Bereich für größere Leistungen kaum machbar, da die erforderlichen Induktivitäten viel zu groß wären.

Literaturangaben

- [1] Christian Paulwitz: Was ist ein ableitstromarmes EMV-Filter in der Praxis? – Zielkonflikte und anforderungsspezifische Meßverfahren, Kongress EMV 2012, Düsseldorf, paper 34.
- [2] DIN EN 62423 (12/2012): Fehlerstrom-/Differenzstrom-Schutzschalter Typ F und Typ B mit und ohne eingebauten Überstromschutz für Hausinstallationen und für ähnliche Anwendungen
- [3] DIN VDE 0664-401 (5/2012): Fehlerstrom-Schutzschalter Typ B mit eingebautem Überstromschutz zur Erfassung von Wechsel- und Gleichfehlerströmen für den gehobenen vorbeugenden Brandschutz – Teil 401: RCBO Typ B+
- [4] Eaton Industries Manufacturing GmbH: xEffect – Schaltgeräte für industrielle Anwendungen – Katalog 2015
- [5] Siemens AG: Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen – Technik-Fibel, Ausgabe 2012
- [6] Doepke Schaltgeräte GmbH & Co. KG: Allstromsensitive Fehlerstromschutzeinrichtungen (RCD Typ B) - Anwendungshinweise und technische Information, April 2012
- [7] Doepke Schaltgeräte GmbH & Co. KG: Differenzstromanalysestystem DRCA1 - Anwendungshinweise und technische Informationen, 2011
- [8] Harm-Friedrich Harms, Holger Arends, Thorsten Büscher: Aktive Unterdrückung asymmetrischer Störströme, Kongress EMV 2010, Düsseldorf, paper 46.
- [9] EPCOS AG: Ableitströme eliminieren und die EMV deutlich verbessern – Applikationsschrift LeaXield, März 2015
- [10] EPCOS EMV-Labor: Laborbericht 7624 (Oktober 2015); Ergebnisse anonymisiert
- [11] DIN EN 61800-3 (9/2012): Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe – Teil 3: EMV-Anforderungen einschließlich spezieller Prüfverfahren
- [12] EPCOS EMV-Labor: Laborbericht 7619 (Oktober 2015) aus einem Laboraufbau; Ergebnisse anonymisiert
- [13] EPCOS EMV-Labor: Laborbericht 7577 (Juni 2015) aus einem Laboraufbau; Ergebnisse anonymisiert