Schaffner EMV AG Nordstrasse 11 4542 Luterbach Schweiz
T +41 32 681 66 26 F +41 32 681 66 30 www.schaffner.com

energy efficiency and reliability

Ableitströme in Netzentstörfiltern

Grundlagen zu Ableitströmen sowie deren Berechnung und Messung

1. Einleitung

Ableitströme sind Ströme, die beim Betrieb eines Elektrogerätes über den Schutzleiter gegen Erde abfliessen. Da solche Ströme ein Sicherheitsrisiko für den Benutzer darstellen, legen die gängigen Sicherheitsnormen für verschiedene Produkte Grenzwerte für den Ableitstrom fest, die nicht überschritten werden dürfen. Immer häufiger finden dabei auch Fehlerstromschutzschalter Anwendung, die beim Überschreiten des Ableitstroms auslösen und den Stromkreis unterbrechen.

Auch Netzentstörfilter, EMV-Filter genannt, tragen durch ihre Kondensatoren gegen Erde zum Ableitstrom des Gerätes bei. Da aufgrund der heutigen Technologien in immer mehr Produkten Entstörfilter Anwendung finden, wird auch die Thematik des Ableitstroms für solche Filter immer wichtiger. Verunsicherung beim Endanwender entsteht vor allem dadurch, dass Filterhersteller die Ableitströme ihrer Filter auf verschiedene Weisen bestimmen und dadurch die Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Filterherstellern verloren geht. In diesem Artikel sollen Grundlagen über Ableitströme sowie deren Berechnung und Messung näher betrachtet werden.

2. Normenvorgaben

Die Funktion des Schutzleiters in elektrischen Systems besteht darin, den Benutzer im Falle von Fehlfunktionen und Kurzschlüssen vor gefährlichen Berührspannungen zu schützen. Diese Funktion kann nur gewährleistet werden, wenn Ableitströme über den Schutzleiter auf ein Minimum reduziert werden. Aus diesem Grund sehen die üblichen Produktnormen einen Grenzwert vor für den maximal zulässigen Ableitstrom. Dies soll am Beispiel der EN 60950-1 erläutert werden, der Sicherheitsnorm für informationstechnische Einrichtungen.

Obgleich der Begriff Ableitstrom als gängige Bezeichnung verwendet wird, unterscheidet die Norm grundsätzlich zwischen Berührstrom und Schutzleiterstrom. Der Berührstrom ist derjenige Strom, der durch den Körper eines Menschen fliesst, wenn dieser eine elektrische Einrichtung oder ein elektrisches Betriebsmittel berührt. Der Schutzleiterstrom hingegen ist der Strom, der bei bestimmungsgemässem Gebrauch der elektrischen Einrichtung über den Schutzleiter abgeleitet wird. Letzteres wurde früher als Ableitstrom bezeichnet.

Alle elektrischen Einrichtungen müssen so konstruiert sein, dass auftretende Berühr- und Schutzleiterströme keine Gefährdung für den Benutzer darstellen. Generell sollte dabei ein Berührstrom von 3,5mA nicht überschritten werden. Zur Überprüfung wird eine Messung durchgeführt, die im weiteren Verlauf des Artikels noch genauer erklärt wird.

Für manche Geräte ist diese Anforderung von 3.5 mA jedoch nicht realistisch. Es gilt deswegen zusätzlich, dass Geräte mit Festanschluss oder Geräte mit industriellen Steckanschlüssen (Steckanschluss Typ B) und Schutzleiter den Berührstrom von 3,5 mA überschreiten können, wenn der Schutzleiterstrom 5% des Aufnahmestroms nicht überschreitet. Zusätzlich muss auch gegeben sein,

dass der Querschnitt des Schutzpotential-Ausgleichsleiters die Mindestmasse der EN 60950-1 nicht unterschreitet. Zu guter Letzt muss die elektrische Einrichtung mit einer der beiden folgenden Warnhinweise versehen sein.

„ACHTUNG!
Hoher Berührungsstrom. Vor Anschluss an den Versorgungsstromkreis unbedingt Erdungsverbindung herstellen.“

„ACHTUNG!
Hoher Ableitstrom. Vor Anschluss an den Versorgungsstromkreis unbedingt Erdungsverbindung herstellen.“

Neben den gängigen Produktnormen gibt es auch Sicherheitsnormen für passive Filter. Für Europa ist dies die EN 60939; VDE 106 Teil 102. Der VDE berät zur Zeit über eine verbesserte Angabe bezüglich der Ableitströme bei Netzfilter in der VDE 106, es werden Berechnungs- und Messverfahren zur Angabe der Ableitströme diskutiert. Bezüglich der zulässigen Höhe der Ableitströme stellt diese Norm allerdings keine zusätzlichen Forderungen. Anders sieht es hier schon bei der amerikanischen Filternorm aus, der UL 1283. Neben den gängigen Sicherheitsprüfungen wird hier auch die Messung des Ableitstroms verlangt. Dieser darf im Normalfall 0,5mA bei Steckerfiltern und 3,5mA bei Festanschluss nicht überschreiten. Bei höheren Ableitströmen ist ein Warnhinweis anzubringen mit dem Vermerk, dass dieses Filter nicht für Haushaltsanwendungen geeignet ist, der Erdanschluss zum Schutz gegen elektrischen Schock vorhanden ist und das Filter an eine geerdetes Netz angeschlossen werden muss.

3. Berechnungsmodelle für Ableitströme

In den folgenden Abschnitten werden die theoretischen Berechnungsmöglichkeiten für Ableitströme erläutert. Die Berechnungen stimmen nicht immer mit den aktuellen Messungen überein, da Toleranzwerte von Komponenten sowie Unsymmetrien von Netzen nur angenommen werden können. Auch der Netzspannung (50Hz/60Hz) überlagerte Oberschwingungen können zu höheren Ableitströmen führen. Filterhersteller geben meist die berechneten Werte für Nennspannung bei 50Hz mit Unsymmetrie von 3% und einer definierten Kapazitätstoleranz von +/-20% an, Für alle Berechnungen werden die parasitären Komponenten der Bauteile sowie die Impedanz des Schutzleiters vernachlässig. Die Berechnung bezieht sich lediglich auf die Filter-Kondensatoren mit ihren Toleranzen. In einem typischen EMV-Filter werden Kondensatoren zur Unterdrückung von symmetrischen und unsymmetrischen Störströmen eingesetzt. Im ersten Fall werden sogenannte X-Kondensatoren zwischen den Phasen bzw. zwischen Phase und Nullleiter geschaltet. Für unsymmetrische Störungen verwendet man Y-Kondensatoren zwischen Phase und Erde.

Ebenso werden Frequenz- und Spannungsabhängigkeit der Kondensatoren nicht berücksichtigt. Dies ist speziell dann zu beachten, wenn im Filter Keramikkondensatoren eingesetzt werden. Diese zeigen eine deutliche Veränderung des Kapazitätswertes in Abhängigkeit von Spannung und Frequenz, womit sich auch der Ableitstrom wesentlich nach oben verändern kann.

3.1 Ableitströme im Dreiphasennetz

Um den Ableitstrom eines Filters im Dreiphasenetz zu bestimmen, wird zunächst grundsätzlich die Spannung zwischen Netzsternpunkt M_Q und Verbrauchersternpunkt M_L bestimmt. Im Netz liegen die drei Strangspannungen $\underline{U}_{L1}$, $\underline{U}_{L2}$ und $\underline{U}_{L3}$ an, die in M_Q als Stern verschaltet sind. Lastseitig befinden sich die Impedanzen $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ und $\underline{Z}_3$, die ebenfalls sternförmig verbunden sind in M_L. Die beiden Sternpunkte sind über die Impedanz $\underline{Z}_{QL}$ miteinander verbunden, an der der Spannungsabfall $\underline{U}_{QL}$ entsteht.

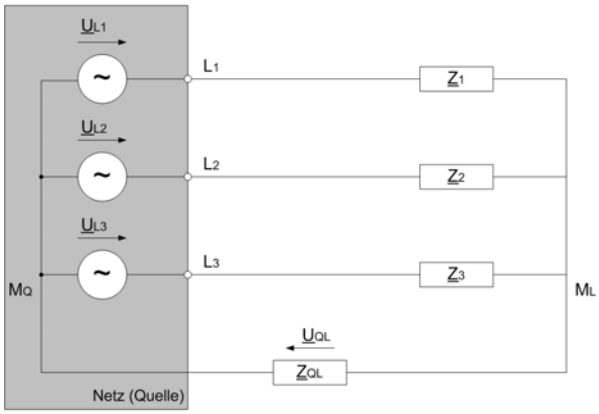

Abbildung 1: Sternschaltung von Quelle und Verbraucher

Die aktuelle Spannung U_{QL} über die Impedanz Z_{QL} lässt sich berechnen gemäss folgender Gleichung:

$$\underline{U}_{QL} = \frac{\frac{\underline{U}_{L1}}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{U}_{L2}}{\underline{Z}_2} + \frac{\underline{U}_{L3}}{\underline{Z}_3}}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{\underline{Z}_{QL}}} \qquad (1)$$

In passiven Dreiphasenfiltern werden nun häufig Kondensatoren im Stern verschaltet und anschliessend über einen Y-Kondensator mit dem Erdpotential bzw. dem Gehäuse verbunden. Wenn die Kondensatorschaltung symmetrisch ist, werden nur sehr geringe Ableitströme auftreten, da die Summe aller Ströme im Drehstromsystem =0 ist. Auf der anderen Seite treten genau dann die höchsten Ströme auf, wenn die Unsymmetrie zwischen den Phasen am grössten ist. Diese Unsymmetrie setzt sich zusammen aus den Kapazitätsunterschieden der X-Kondensatoren sowie der Spannungsunsymmetrie im Netz.

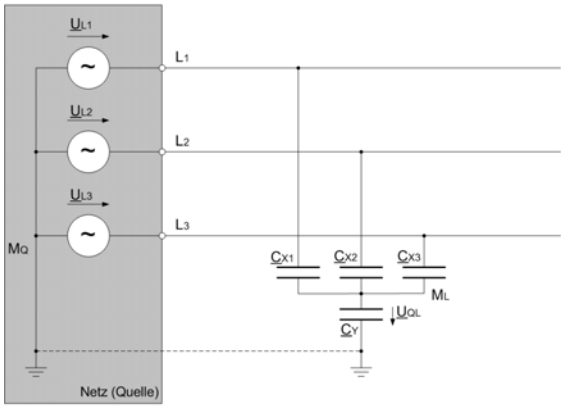

Abbildung 2: Typische Kondensatorenanordnung in Dreiphasenfiltern

Entscheidend für den Ableitstrom ist also die Spannung $\underline{U}_{QL}$, die sich aus der Unsymmetrie der Kondensatoren $\underline{C}_{X1}$, $\underline{C}_{X2}$ und $\underline{C}_{X3}$ ergibt. Diese haben in der Regel die gleiche Kapazitätsnennwerte, unterliegen aber der gängigen Herstellertoleranz. . Am Kondensator C_Y fällt dann die Spannung $\underline{U}_{QL}$ ab, was folgenden Ableitstrom verursacht:

$$\underline{I}_{abl,\max} = \underline{U}_{QL} \cdot j\omega\, C_{Y,\max}$$

mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (2)

Die am häufigsten verwendeten Kondensatoren werden von den Herstellern üblicherweise mit einer Toleranz von ±20% angegeben. Der grösste Spannungsabfall an C_Y entsteht, wenn zwei der X-Kondensatoren an der unteren Toleranzgrenze liegen und einer an der oberen und wenn zusätzlich der Maximalwert für C_Y angenommen wird. Wird dies in Gleichung (1) eingesetzt, so erhält man folgenden maximalen Ableitstrom:

$$\left|I_{abl,\max}\right| = \omega\, C_{Y,\max} \frac{U_{\max} C_{X,\max} - U_{\min} C_{X,\min}}{C_{X,\max} + 2C_{X,\min} + C_{Y,\max}} \quad (3)$$

Am einfachsten lässt sich dies an einem Berechnungsbeispiel veranschaulichen. Als Beispiel dient ein Dreiphasenfilter für eine Versorgungsspannung von 480V. Die Kondensatorwerte betragen C_X=4,4µF und C_Y=1,8µF. Bei einer Herstellertoleranz von ±20% und unter Vernachlässigung der Spannungstoleranz ergibt sich ein maximaler Ableitstrom von ca. 23mA.

Erfahrungen aus der Praxis belegen jedoch, dass solche Herstellertoleranzen bei Kondensatoren faktisch nicht auftreten. Als realistischer Toleranzbereich gilt eher der Bereich von -20% bis 0%. Für das obige Beispiel beträgt der maximale Ableitstrom somit nur noch ca. 10mA. Es muss jedoch zusätzlich angemerkt werden, dass es derzeit keine übereinstimmende Meinung zwischen den Filterherstellern gibt, so dass zwischen verschiedenen Herstellern durchaus Unterschiede in den Ableitströmen auftreten können, selbst wenn im Schaltbild die gleichen Kondensatorwerte verwendet werden.

Bislang wurde in der Berechnung der Einfluss der Spannungstoleranz immer vernachlässigt. Da das Netz in der Realität aber immer Unsymmetrien aufweist, sollten diese auch in die Berechnung mit

aufgenommen werden. Als Grundlage dient die Netznorm EN 50160, die die Bedingungen in öffentlichen Versorgungsnetzen definiert. Gemäss dieser Norm kann die maximale Toleranz auch in regionalen Netzen bis zu 3% sein. Beim Einsetzen in die Formel ergeben sich damit 26mA Ableitstrom bei ±20% Kondensatortoleranz und 13mA bei +0/-20%.

3.2 Ableitströme im Einphasennetz

Die Berechnung der Ableitströme im Einphasennetz stellt sich als wesentlich einfacher dar als im Dreiphasennetz. Bei gegebener Spannung und Frequenz hängt der Ableitstrom nur noch von der Gesamtkapazität ab. Die folgende Abbildung zeigt eine typische Schaltung für ein Einphasenfilter.

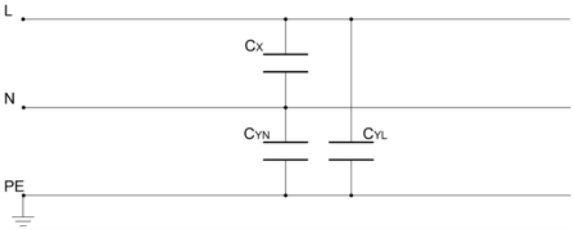

Abbildung 3: Typische Kondensatorenanordnung in Einphasenfiltern

Im normalen Betriebsfall wird der Ableitstrom durch den Kondensator C_{YL} bzw. C_{YN} bestimmt. Der Wert ergibt sich aus der Formel:

$$I_{ableit} = \omega C_{Y,\max} \cdot U \qquad (4)$$

Für ein Filter mit C_X=100nF und C_Y=2,2nF ergibt sich bei angenommener Toleranz von ±20% ein Ableitstrom von 190µA. Der schlechteste Fall tritt ein, wenn der Nullleiter unterbrochen wird. Die Gesamtkapazität berechnet sich dann aus einer Parallelschaltung von C_{YL} und der Serienschaltung von C_X und C_{YN}. Diese Ersatzschaltung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

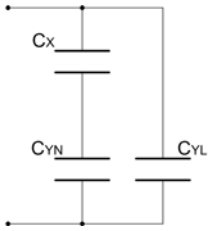

Abbildung 4: Gesamtkapazität bei Ausfall des Nullleiters

Die so entstandene Gesamtkapazität berechnet sich dann zu:

$$C_{ges} = C_{YL} + \frac{1}{\frac{1}{C_{YN}} + \frac{1}{C_X}} \qquad (5)$$

Damit erhält man den Ableitstrom im Fehlerfall von 377µA.

4. Messung von Ableitströmen

Neben den Berechnungen des Ableitstroms gibt es auch die Möglichkeit der Messung. Die notwendigen Messmethoden sind zum Beispiel in der Norm EN 60990 / VDE 106 Teil 102 „Verfahren zur Messung von Berührungsstrom und Schutzleiterstrom“ beschrieben.

4.1 Messung gemäss EN 60950 mit Verweis auf EN 60990

Wie bereits im Kapitel „Normenvorgaben“ erwähnt, verwendet die EN 60950 die Begriffe Berührstrom und Schutzleiterstrom anstelle von Ableitstrom. Gemessen wird dabei der Berührstrom. Da die Messungen für Ein- und Dreiphasennetze sehr ähnlich aufgebaut sind, wird hier nur die Messmethode für Einphasennetze erläutert.

Der grundsätzliche Prüfaufbau für die Messung ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Ausgang B der Messvorrichtung wird mit dem geerdeten Nullleiter des Systems verbunden, der Ausgang A über den Schalter $S_{PRÜF}$ mit der Erdungsklemme des Prüflings. Der Schalter S_{PE} ist dabei geöffnet.

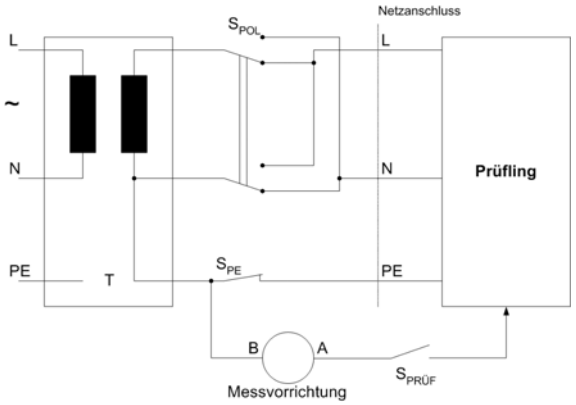

Abbildung 5: Prüfanordnung für Berührströme

Zusätzlich wird die Prüfung auch mit vertauschter Polarität durchgeführt. Zu diesem Zweck wird der Schalter S_{POL} verwendet. Der zulässige höchste Berührungsstrom richtet sich dann nach der Art des Prüflings.

Unabhängig von der Art des Gerätes wird der Berührstrom auch noch für berührbare Teile des Gerätes gemessen. Diese Messung steht jedoch in keinem Verhältnis zum Ableitstrom über den Schutzleiter und wird daher nicht näher erläutert.

Für die in Abbildung 5 gezeigte Messvorrichtung gibt es grundsätzlich zwei Ausführungsformen. Zum einen kann eine Spannungsmessung mit der folgenden Schaltung durchgeführt werden.

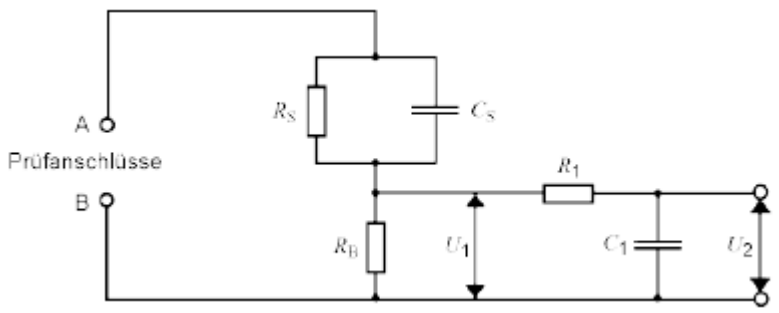

Abbildung 6: Messvorrichtung zur Spannungsmessung

R_S 1500Ω

R_B 500Ω

R_1 10kΩ

C_S 0,22µF

C_1 0,022µF

Das verwendete Messgerät für die Spannung U_1 und U_2 muss einen Eingangswiderstand haben >1MΩ, eine Eingangkapazität <200pF sowie einen Frequenzbereich von 15Hz bis 1MHz. Die Umrechnungsformel für den bewerteten Berührungsstrom (für Spürbarkeit oder Reaktion) lautet:

$$I[A] = \frac{U_2}{500\Omega}$$

Für den unbewerteten Berührungsstrom wird anstelle U_2 der Wert der Spannung U_1 eingesetzt.

Alternativ zur Spannungsmessung gemäss Abbildung 6 kann auch eine Strommessung mit der Schaltung aus Abbildung 7 durchgeführt werden.

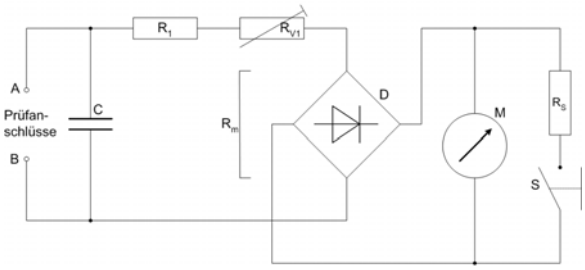

Abbildung 7: Messvorrichtung zur Strommessung

M Drehspulmessgerät

R_1+ R_{V1}+ Rm 1500Ω±1% mit C=150 nF±1% oder
2000Ω±1% mit C=112nF±1%
bei 0,5mA Gleichstrom

D Messgleichrichter

R_S induktionsfreier Widerstand für den Bereich X 10

S Bereichsumschalter

Bei nichtsinusförmigen Schwingungsformen und falls die Grundfrequenz über 100Hz liegt, lassen sich mit der Spannungsmessung gemäss Abbildung 6 genauere Ergebnisse erzielen.

5. Einfluss der Netztopologie auf Ableitströme

Im Kapitel „Berechnungsmodelle für Ableitströme“ wurde bereits darauf hingewiesen, dass der Ableitstrom dann am geringsten ist, wenn das Netz und der Schaltungsaufbau so symmetrisch wie möglich sind. Jede Unsymmetrie erhöht den Ableitstrom.

Vor diesem Hintergrund wird auch verständlich, dass die Netztopologie einen grossen Einfluss auf den tatsächlichen Ableitstrom ausübt. Daher kann es notwendig werden, für speziell ausgelegte Netze eigene Filter zu entwickeln. Besonders häufig tritt diese Herausforderung auf bei japanischen Versorgungsnetzen und Filtern, die für europäische Netze entwickelt wurden.

Die Eigenheit des japanischen Netzes besteht darin, dass von den drei Phasen eine direkt geerdet ist, normalerweise „dreieck-geerdet“. Die ist prinzipiell in Abbildung 8 dargestellt.

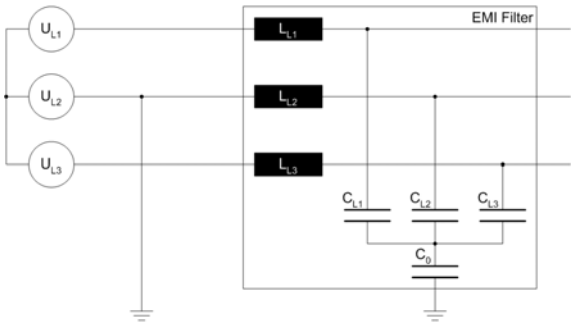

Abbildung 8: Prinzipschaltung eines japanischen Versorgungsnetzes

Durch diese Art der Schaltung entsteht nun ein Parallelkreis zwischen L_{L2} im einen Zweig und C_{L2} und C_0 im anderen. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 9 aufgezeichnet.

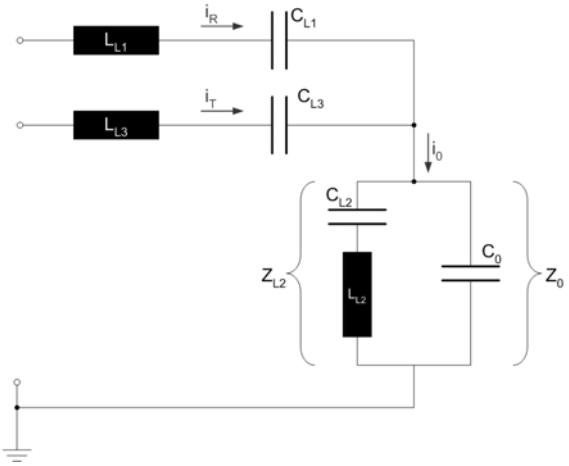

Abbildung 9: Ersatzschaltbild für Abbildung 8

Durch diese Anordnung ergeben sich völlig veränderte Impedanzverhältnisse gegen Erde, die auch den Spannungsabfall und damit den Ableitstrom beeinflussen. Daher können die Angaben für Ableitströme europäischer Filter nicht automatisch für japanische Netze übernommen werden.

Um diese Problematik zu umgehen wäre es möglich, für die geerdete Phase eine andere Impedanz im Filter vorzusehen. Damit entstünde ein unsymmetrisches Filter. Alternativ könnten auch die Impedanzen in allen Phasen des Filters erhöht und damit die Gesamtkapazität gegen Erde (Y-Kondensatoren) verringert werden, so dass ein symmetrischer Aufbau möglich wäre ohne dabei einen extremen Anstieg des Ableitstromes zu verursachen.

6. Zusammenfassung

Aufgrund der sicherheitsrelevanten Auswirkungen ist die Beachtung von Ableitströmen ein wichtiger Faktor beim Einsatz von Netzfiltern. Viele Hersteller geben aus diesem Grund den maximal zu erwartenden Ableitstrom pro Phase für Filter an.

Bei diesen Angaben sollte beachtet werden, dass der angegebene Ableitstrom nicht das Ergebnis einer Messung ist, sondern ein berechneter Wert. Für diese Berechnung werden Voraussetzungen von den Herstellern festgelegt, die noch nicht in entsprechenden Normen vereinheitlicht sind. Zu diesen Voraussetzungen gehören die Toleranzen für die eingesetzten Bauteile, die Spannungsunsymmetrie im Netz oder auch die Betriebsart (normaler Betrieb, Fehlerfall). Herstellerangaben bezüglich des Ableitstroms zu Filtern mit gleichen Schaltbildern und Bauteilwerten können daher sehr unterschiedlich ausfallen.

Die Messung der Ableitströme ist in den Normen sehr genau definiert und daher auch gut reproduzierbar. Allerdings ist hier zu beachten, dass diese Messung nicht als Produktionstest and 100% der Filter durchgeführt wird, sondern nur als Typenprüfung während der Zertifizierung.

Oberschwingungen mit höheren Frequenzen, welche der Netzspannung überlagert sind, erhöhen die Ableitströme erheblich.

Zu guter Letzt hängt der Ableitstrom auch noch von der Netztopologie ab. Ein Filter mit niedrigem Ableitstrom in europäischen Netzen kann in einem japanischen Netz ohne weiteres eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung zum Auslösen bringen.

Gewissenhafte Hersteller werden bei ihren Angaben immer darauf achten, dass der Wert realistisch berechnet wird und die Randbedingungen zur Berechnung auch angegeben werden. Nur so wird es für den Endanwender auch möglich sein, den Gesamtableitstrom seiner Anlage zuverlässig zu planen.

Für weitere Informationen:

Ulrich Stitz
Schaffner Jacke GmbH
Westring 28
33142 Büren / Deutschland

T +49 2951 60 01 0
F +49 2951 60 01 23

mailto:ulrich.stitz@schaffner.com
http://www.schaffner.com