

Filter zur Reduzierung der 3. Stromoberschwingung

E. Hering, Dresden

Die von einigen elektrischen Betriebsmitteln verursachten Stromoberschwingungen 3. Ordnung können die Leistungsverluste im Netz steigern, die Auslastbarkeit der Anlagenteile herabsetzen und vor allem den Neutralleiter überlasten. Spezielle Filter ermöglichen es, diese Oberschwingungen mit einer Frequenz von 150 Hz auf eine tragbare Größe zu reduzieren. Der Beitrag erläutert, wie die Filter anzuordnen sind, damit sich die gewünschten Wirkungen ergeben und keine vermeidbaren neuen Probleme mit sich bringen.

1 Wesen der Oberschwingungen

Oberschwingungen liegen vor, wenn die Wechselspannung oder der Wechselstrom im Diagramm über der Zeit von der Sinusform abweicht. Die Spannung bzw. der Strom setzt sich dann aus einer sinusförmigen Grundschwingung und unendlich vielen Oberschwingungen, deren Frequenzen ganze Vielfache der Frequenz der Grundschwingung (Grundfrequenz) sind, zusammen (sog. Fourier-Reihe). Die Ordnungszahl einer Oberschwingung ist das Verhältnis von deren Frequenz zur Grundfrequenz, z. B. gilt $f_3 / f_1 = 150 \text{ Hz} / 50 \text{ Hz} = 3$ für die 3. Oberschwingung mit der Frequenz 150 Hz bei einer Grundfrequenz von 50 Hz.

Die Oberschwingung ist entweder eine Spannungs- oder eine Stromoberschwingung, je nachdem, ob sie die Wechselspannung oder den Wechselstrom betrifft. Beide Erscheinungen können sich gegenseitig bedingen und deswegen zusammen auftreten.

2 Entstehung von Stromoberschwingungen

Neuzeitliche elektrische Betriebsmittel verursachen in zunehmendem Maße Stromoberschwingungen [1] bis [6]. Zu den Verursachern gehören u. a.

- Gleichrichter, insbesondere solche mit nachgeordneten Glättungskondensatoren;
- transformatorlose Netzteile, z. B. Schaltungselektronik und von Computern, elektronische Vorschaltgeräte von Kompaktleuchtstofflampen („Energiesparlampen“), Konverter für Niedervolt-Halogenlampen;

- Umrichter und Steuergeräte mit Phasenanschnitt, z. B. Frequenzumrichter, Steuergeräte für Antriebe, Dimmer für Lampen.

Die Stromoberschwingungen entstehen dadurch, dass der Strom sich nicht proportional mit der Spannung ändert oder (z. B. beim Phasenanschnitt) gar periodisch unterbrochen wird.

3 Nachteilige Auswirkungen von Stromoberschwingungen

3.1 Addition von Stromoberschwingungen im Neutralleiter

Sind in einem Drehstromsystem einphasige Verbraucher einerseits an die drei Außenleiter (L1, L2, L3) und andererseits an den Neutralleiter (N) angeschlossen, so heben sich ihre Ströme mehr oder weniger gegenseitig auf. Wenn alle drei Ströme gleich groß sind und die gleiche Phasenlage zu ihrer Spannung haben (z. B. $\varphi = 0$ bei ohmschen Widerständen), können sie sich völlig aufheben, so dass der Neutralleiter stromlos ist. Das gilt jedoch nur für die Stromgrundschwingung.

Alle Stromoberschwingungen, deren Ordnungszahl durch 3 teilbar ist, haben im Gegensatz zur Grundschwingung die schlimme Eigenart, dass sie sich im Neutralleiter addieren. Von ihnen ist im Allgemeinen die 3. Stromoberschwingung besonders stark [1] bis [6]. Bei einem hohen Anteil solcher Stromoberschwingungen kann der Strom im Neutralleiter so groß wie in den Außenleitern oder gar größer sein. Selbst bei Gleichheit der Ströme und der Querschnitte von Außenleitern und Neutralleiter kann ein normgerecht bemessenes und abgesichertes Kabel oder eine solche Leitung übermäßig erwärmt werden, weil den Angaben in den Normen die Belastung von nur drei Adern zu Grunde liegt, hier aber in vier Adern Wärme erzeugt wird und somit die gesamte Wärmeleistung $4/3$ der normalen beträgt. Noch viel kritischer ist die Situation natürlich, wenn der Neu-

tralleiter stärker als die Außenleiter belastet wird oder wenn er nur den halben Querschnitt der Außenleiter hat [3]. Das vorstehend über den Neutralleiter Gesagte gilt im TN-C-System für den PEN-Leiter.

3.2 Belastung der Außenleiter

Die Außenleiter werden (abgesehen von der Stromgrundschwingung) von den Stromoberschwingungen

- a) der mit dem Neutralleiter verbundenen Betriebsmittel und
- b) der zwischen ihnen (also an 400 V im 230/400-V-Netz) angeschlossenen Betriebsmittel durchflossen.

3.3 Belastung des Umspanners

Die Sekundärwicklung wird wie die Außenleiter belastet. Nach Maßgabe des Übersetzungsverhältnisses erfährt die in Dreieck geschaltete Primärwicklung eine Belastung

- a) proportional zu der der Sekundärwicklung und
- b) zusätzlich durch eine kreisende Stromoberschwingung, die der unter 3.1 behandelten proportional ist.

3.4 Sonstige Auswirkungen und Nachteile

Die unter 3.1 bis 3.3 genannten Belastungen bringen nicht nur eine erhöhte Wärmeentwicklung und damit eine Herabsetzung der Ausnutzbarkeit der Betriebsmittel (z. B. Leitungen, Schalter, Umspanner), sondern auch folgende Nachteile mit sich.

- a) Die Stromoberschwingungen durchfließen wie Blindströme die Anlagenbestandteile, ohne eine Wirkleistung zu übertragen. Dabei verursachen sie zusätzliche Leistungsverluste.
- b) Durch den Spannungsfall an den durchflossenen Anlagenbestandteilen rufen sie Spannungsoberschwingungen hervor, die die Spannungsqualität verschlechtern und manche Betriebsmittel (z. B. Blindstrom-Kompensationskondensatoren) gefährden können.

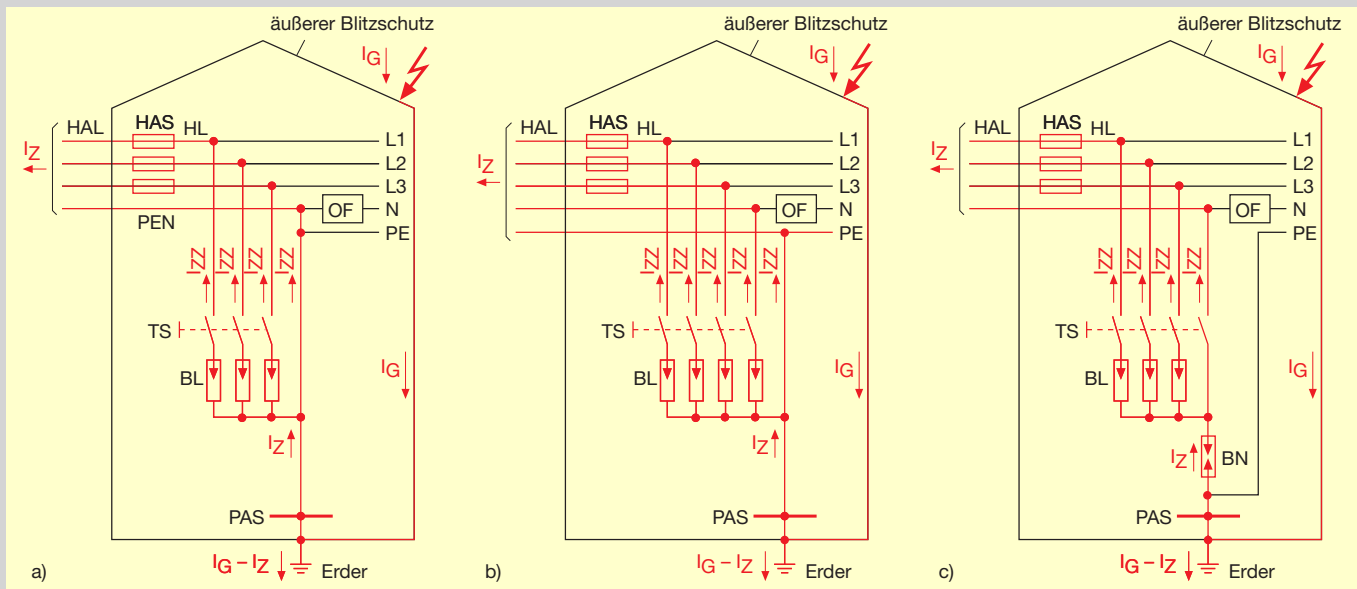
4 Filter gegen die 3. Stromoberschwingungen

Das beste wäre es, wenn die Stromoberschwingungen gar nicht erst verursacht würden. Diesbezügliche Bemühungen lassen jedoch keinen großen Erfolg erwarten, u. a. deswegen, weil

- die Nutzer von Verursachern (z. B. Dimmer) nicht auf diese verzichten wollen,
- die Hersteller von Geräten mit darin enthaltenen Verursachern (z. B. mit Schaltungsteilen) diese aus ökonomischen Gründen nicht durch bessere Bauteile ersetzen können und

Autor

Dipl.-Ing. (FH) Enno Hering ist Mitglied des AK „Starkstromanlagen bis 1000 V“ des VDE-Bezirksvereins Dresden.



1 Anordnung des Überspannungsfilters OF im Neutralleiter und Verzweigung des Blitzstoßstroms beim Direktanschlag in den äußeren Blitzschutz

a) Haus mit Hausanschluss und Hauptleitung im TN-C-System

b) Haus mit Hausanschluss im TN-S-System

c) Haus mit Starkstromanlage im TT-System

BL L-Blitzstromableiter; BN N-PE-Blitzstromableiter; HAL Hausanschlussleitung; HAS Hausanschlusssicherung; HL Hauptleitung; I_G gesamter Blitzstoßstrom; I_Z über die Hausanschlussleitung zu fernen Erdern fließender Zweig-Stoßstrom; I_{ZZ} pro Ader der Hausanschlussleitung und pro L-Blitzstromableiter fließender Zweig-Stoßstrom; PAS Potentialausgleichsschiene; TS Trennschalter für Messzwecke. Die Richtung der Strompfeile entspricht der Fortpflanzungsrichtung der Stoßströme und Stoßspannungen.

- es für manche Verursacher keine brauchbaren Alternativen gibt.

Als Abhilfe sind in letzter Zeit Filter entwickelt und auf den Markt gebracht worden, die in die Zuleitung eingefügt werden können und dann die 3. Stromüberschwingung erheblich reduzieren [7][8]. Es handelt sich um die Typen THF 25 bis 160 der Fa. ABB Controly (FIN-65101 Vaasa) sowie die Typen THF 25 NV bis 160 NV und THX-400/50-63 bis 3750 der Fa. ABB Kondensatoren (59929 Brilon). Der Bestandteil „400/50“ der Typenbezeichnungen bedeutet 400 V Nennspannung und 50 Hz Nennfrequenz (Grundfrequenz). Diese Daten treffen auch auf die Geräte THF von ABB Kondensatoren zu, obwohl sie dort nicht in der Typenbezeichnung enthalten sind. Die sonstigen Nummern entsprechen dem Nennstrom in A.

Der Grundgedanke des Filters ist ein auf Resonanz bei 150 Hz bemessener Sperrkreis (Parallelresonanzkreis), also eine Parallelschaltung von Drosselspule und Kondensator. Die Blindleitwerte dieser beiden Bauelemente sind bei der genannten Frequenz im Betrag gleich, jedoch einander entgegengerichtet, so dass der Filter in Bezug auf die 3. Stromüberschwingung einen geringen Leitwert, also einen hohen Widerstand hat. Statt eines Kondensators können auch mehrere eingebaut sein.

Die Typen THX enthalten statt der Drossel einen mit großer Streuung ausgeführten Transformator, an dessen Sekundärwicklung der Kondensator (oder die Kondensatoren) angeschlossen ist (bzw. sind). Durch die große Streuung wirkt der Transforma-

tor wie eine Drosselspule. Auch bei diesen Geräten beträgt die Resonanzfrequenz 150 Hz. Bei großen Überströmen kommt der Transformator in die Sättigung, so dass die Impedanz bei Kurzschlussströmen verkleinert wird.

Der Filternennstrom muss auch bei Einbau in den Neutralleiter mindestens so groß wie der Sicherungsnennstrom in den Außenleitern sein. Zwar wird der 150-Hz-Strom durch den Filter stark reduziert. Der 50-Hz-Strom im Neutralleiter kann jedoch u. U. – z. B. bei stark unsymmetrischer Last, bei Ausfall eines Außenleiters oder bei einpoligem Kurzschluss – die Größe des Außenleiterstroms haben.

Es ist zweckmäßig, Trennschalter (evtl. NH-Unterteile mit Trennlaschen) vorzusehen, die es ermöglichen, den Filter zu überbrücken und von der Anlage zu trennen. Dann sind Prüfung, Reparatur und Austausch des Filters ohne Abschaltung der Anlage möglich.

Es ist ratsam, vor der Entscheidung für den Einsatz des Filters ausführliche technische Unterlagen (Datenblatt, Angaben über bestandene Prüfungen und erteilte Prüfzeichen, Einbauanleitung, Informationen über Schutz- und Überwachungseinrichtung) anzufordern.

5 Regeln für die Anordnung der Filter

5.1 Anordnung im Neutralleiter

Wie schon im Abschn. 3.1 erörtert, belasten die 3. Stromüberschwingungen besonders den Neutralleiter. Darum ist es nahe liegend, den Filter gemäß Bild 1 in diesen

einzuführen. So wird es im Allgemeinen auch ausgeführt.

Das Teilbild 1 b) ist für Anlagen an öffentlichen Verteilungsnetzen nicht typisch, weil deren Betreiber keine Fünfleiter-Hausanschlüsse ausführen. Es hat jedoch für die in Rechtsträgerschaft der Verbraucher befindlichen Netze (z. B. Industrienetze) Bedeutung.

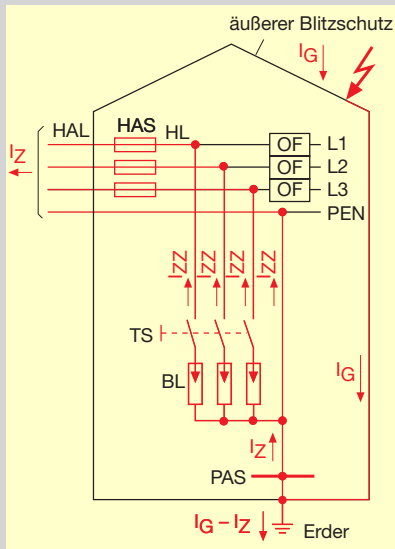
5.2 Berücksichtigung der Blitzstoßströme

Bei direkten Blitzeinschlägen fließt entsprechend Bild 1 ein Teil des Blitzstoßstroms über den Hausanschluss. Ähnlich verhält es sich bei nahen Blitzeinschlägen. Die Filter haben keine Blitzstoßstromtragfähigkeit und dürfen darum nicht in dieser Strombahn, d. h. zwischen der Hausanschlussleitung HAL und den Blitzstromableitern BL liegen. Sie müssen vielmehr wie im Bild 1 verbraucherseitig vom Abzweig zu den Blitzstromableitern angeordnet werden.

5.3 Berücksichtigung des Elektroschutzes

Die Normen enthalten noch keine diesbezüglichen Bestimmungen, weil die Filter relativ neu sind. Dennoch dürfen diese nicht in den PEN-Leiter eingefügt werden, und zwar aus folgenden Gründen.

- a) Ein Filter würde die Wirksamkeit der Schutzmaßnahme durch Vergrößerung der bis zur Abschaltung auftretenden Fehlerspannung und durch Verlängerung der Abschaltzeit beeinträchtigen.
- b) Der 150-Hz-Strom könnte über den nachgeordneten Schutzleiter fließen und damit den Filter umgehen.



2 Anordnung von je einem Überspannungsfilter in den drei Außenleitern in einem Haus mit Hausanschluss und Hauptleitung im TN-C-System

5.4 Anordnung in den Außenleitern

Für das TN-C-System ist die Lösung nach Bild 2 mit je einem Filter in den drei Außenleitern möglich. Neue Anlagen werden selbstverständlich besser als TN-S-System errichtet. Viele noch bestehende Altanlagen sind jedoch als TN-C-System ausgeführt. Die Hauptleitungen können auch nicht auf das TN-S-System umgestellt werden, solange das nicht mit allen nachgeordneten Anlagenteilen geschehen ist, denn ein TN-S-System darf keinem TN-C-System vorgeordnet sein ([9], Abschn. 8.2.3). Der sehr hohe Aufwand mit den drei Filtern kann sich vielleicht auch bei mancher Anlage mit TN-C-S-, TN-S- oder TT-System lohnen, denn diese Lösung hat folgende Vorteile.

- Beim einpoligen Kurzschluss ist die Verlagerung des Neutralleiterpotentials in der Anlage und damit die Spannungserhöhung der an die ungestörten Außenleiter angeschlossenen Verbraucher ([3], Abschnitte 3.3 und 4.1) bis zur Abschaltung kleiner als bei der Anordnung eines einzigen Filters im Neutralleiter. Die Gefährdung der Verbraucher durch Spannungserhöhungen wird herabgesetzt.
- Die Möglichkeit einer Neutralleiterunterbrechung, die durch einen Defekt des Filters auftreten könnte und die Verbraucher durch Spannungserhöhung gefährden würde, entfällt.
- Es erfolgt eine Reduzierung der 3. Stromoverschwingungen, die von den an mehrere Außenleiter angeschlossenen Betriebsmitteln verursacht werden.
- Im Falle des Defektes oder der Überbrückung eines der drei Filter werden die 3. Stromoverschwingungen im Neutralleiter bei weitem nicht so sehr vergrößert wie bei einem solchen Vorgang

an einem einzigen Filter, der im Neutralleiter angeordnet ist.

- Die Reduzierung der 3. Stromoverschwingungen im Neutralleiter ist geringer als bei der Anordnung eines einzigen Filters in diesem. Das hat zwar den Nachteil, dass die Stromwärmeverluste im Neutralleiter größer sind, wird aber mitunter durch die Reduzierung der Stromwärmeverluste in den Außenleitern ausgeglichen. Vorteilhaft ist, dass hinter den Filtern die 3. Spannungsüberschwingungen zwischen den Außenleitern und dem Neutralleiter nicht gar so groß werden.
- Im Gegensatz zur Anordnung des Filters im Neutralleiter wird vermieden, dass zwischen diesem und dem Schutzleiter die Filterspannung auftritt.

5.5 Anordnung am Sternpunkt des Umspanners

Von den Herstellern wird u. a. eine Lösung vorgeschlagen, die darin besteht, den Filter direkt am Sternpunkt des Umspanners anzuordnen. Diese Lösung ist für öffentliche Verteilungsnetze nicht geeignet, weil deren Betreiber keinen Überblick darüber haben, wie sich die daraus resultierende Steigerung der 3. Spannungsüberschwingungen in den Verbraucheranlagen auswirkt. Dieses Hemmnis besteht nicht, wenn sich das Verteilungsnetz und die Verbraucheranlagen in gleicher Hand befinden (z. B. Industrienetz). Hierbei muss allerdings sichergestellt sein, dass der Filter nicht durch Blitzstoßströme beschädigt werden kann. Die Voraussetzungen dafür sind günstig, wenn sich der Umspanner mit den Verbraucheranlagen im gleichen Gebäude befindet oder wenn der Filter auf Grund großer Nennstromstärke die nötige Blitzstoßstromtragfähigkeit hat.

6 Wirkungen der Filter und Konsequenzen

6.1 Vorteile

Durch die Verringerung der 3. Stromoverschwingungen werden die Leistungsverluste gesenkt und die Ausnutzbarkeit der Anlagenbestandteile gesteigert. Den Nutzen hat vor allem der Betreiber des Verteilungsnetzes. Aber auch für den Betreiber der Anlagen innerhalb des Hauses entstehen Vorteile.

6.2 Bemessung des Neutralleiters

Die Entlastung des Neutralleiters ist kein Freibrief, ihn mit halbem Querschnitt auszuführen (Dreieinhalb-Leiter-Kabel zu verwenden), und zwar aus folgenden Gründen.

- Im Falle einer Störung des Filters wird der Neutralleiter nicht entlastet.
- Der 50-Hz-Strom im Neutralleiter kann bei stark unsymmetrischer Last, bei

Ausfall eines Außenleiters und bei einpoligem Kurzschluss die Größe wie der im Außenleiter haben.

- Die Querschnittsreduzierung kann bei einem einpoligen Kurzschluss die Verlagerung des Neutralleiterpotentials und damit die Spannungserhöhung zwischen Neutralleiter und ungestörten Außenleitern steigern ([3], Abschnitte 3.2 und 4.1) sowie im TN-System den Elektroschutz gefährlich beeinträchtigen ([3], Abschn. 4.2).

6.3 Auswirkungen auf Blindstrom-Kompensationsanlagen

Die bereits unter 3.4 erwähnte Entstehung von 3. Spannungsüberschwingungen durch den Spannungsfall, den die 3. Stromoverschwingungen hervorrufen, wird durch den Filter vergrößert [4][5]. Das kann zu Störungen und Schäden in der Anlage hinter dem Filter, insbesondere zu Zerstörungen von Blindstrom-Kompensationsanlagen führen. Zu deren Schutz sind die folgenden Maßnahmen erforderlich [6][7], und es sollten Beratungen durch Spezialisten (z. B. durch Hersteller von Kondensatoren, Filtern und dgl.) in Anspruch genommen werden.

- Reduzierung der 3. Spannungsüberschwingungen dadurch, dass auf Resonanz bei 150 Hz bemessene Saugkreise (Reihenresonanzkreise), also Reihenschaltungen von Drosselspule und Kondensator, oder in gleichem Sinne wirkende elektronische Filter jeweils zwischen Außenleiter und Neutralleiter angeschlossen werden [6][7].
- „Verdrosselung“ der Blindstrom-Kompensationskondensatoren, d. h. Vorschaltung von Drosselspulen.
- Einsatz von Schutz- und Überwachungseinrichtungen für die Blindstrom-Kompensationsanlagen.

Literatur

- Fassbinder, S.: Was heißt hier schon harmonisch? de, München 73(1998)1 bis 5.
- Fassbinder, S.: Netzbelastung durch Oberschwingungen (Inhalt entspricht [1]). Sonderdruck Nr. s. 182 – 4/98. Deutsches Kupfer-Institut (DKI), 40474 Düsseldorf.
- Hering, E.: Nachteile von Dreieinhalb-Leiter-Kabeln. Elektropraktiker, Berlin 52(1998)6, S. 547-549.
- Fassbinder, S.: Wir müssen draußen bleiben! Zutritt nur mit 50 Hz! e-Motion, München (1999) 1, S. 32-34.
- Fassbinder, S.: Vor der eigenen Tür gefegt. de, München 74 (1999) 11 bis 20.
- Fassbinder, S.: Wechselwirkungen von Blindstrom-Kompensationsanlagen mit Oberschwingungen (Inhalt entspricht [5]). Sonderdruck Nr. s. 185 – 2/2000. DKI
- Fassbinder, S.: Eine fin(n)dige Erfin(n)dung gegen Disharmonie. e-Motion, München (2000)3, S. 32-35.
- Fassbinder, S.: Oberschwingungen im Griff. de, München 76(2001)8, S. 68-74.
- DIN VDE 0100 Teil 540:1991-11 Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V; Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel; Erdung, Schutzleiter, Potentialausgleichsleiter. ■