

Effektive Beseitigung von Netzresonanzen

Wenn elektrische Energieversorgungsnetze anfangen zu „schaukeln“

Neben der „klassischen“ niederfrequenten Oberschwingungsproblematik machen sich in unseren Energieversorgungsnetzen seit geraumer Zeit – in immer stärker werdendem Maße – Schwingungen deutlich höherer Frequenz bemerkbar, die sich der Grundschwingung überlagern, diese häufig stark verzerren und infolgedessen zu einer Vielzahl von Problemen führen.

Die höherfrequenten Schwingungen werden von der Fachwelt als „Resonanzen“ tituliert. Plastisch formuliert: Das Netz gerät aus dem Gleichgewicht. Diese Disbalance ist häufig durch ein „Surren“ oder „Summen“ der resonanzbeteiligten und folglich stärker belasteten Betriebsmittel akustisch wahrnehmbar (beispielsweise Transformatoren, Drosseln, Netzteile).

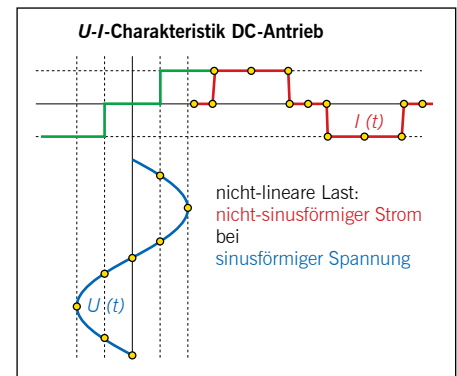
Solche resonanten Schwingungen treten – was den Frequenzbereich angeht – typischerweise oberhalb von ca. 1 000 Hz (20. Ordnung im 50-Hz-Netz) auf. Sie werden somit den sogenannten „Supra-Harmonischen“ zugeordnet. Bei welcher Frequenz sich eine Resonanz genau ausbildet und welche Ausmaße (Amplitude) sie annimmt, hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z. B. der tatsächlichen Netzkurzschlussleistung und der gesamt zugeschalteten Kapazität im jeweiligen Netz. Die Erfahrung zeigt eindeutig, dass Störpotentiale, ausgehend von Resonanz-Phänomenen, zumeist wesentlich höher als die von niederfrequenten Störpegeln sind. Insofern ist diesbezüglich besondere Vorsicht geboten, da meist bereits ein nicht allzu hoher resonanzbedingter Störpegel in einem Netz gravierende „Komplikationen“ (wie beispielsweise Anlagenausfälle) zur Folge haben kann.

Auffrischung der Grundlagen

Was sind die „klassischen“ niederfrequenten Oberschwingungen und wie entstehen sie? Betriebsmittel mit nicht-linearer U - I -Kennlinie (nicht-lineare Strom-Spannungs-Charakteris-

tik, siehe Bild ❶) oder nicht stationärem Betriebsverhalten nehmen, trotz sinusförmiger Netzspannung, zwangsläufig einen nicht-sinusförmigen Strom auf. Dieser führt, durch dessen Einspeisung gegen die vorhandene Netzimpedanz, zu nichtsinusförmigen Spannungsfällen und damit zur Verzerrung der speisenden Spannungsversorgung – es entstehen somit Netzrückwirkungen.

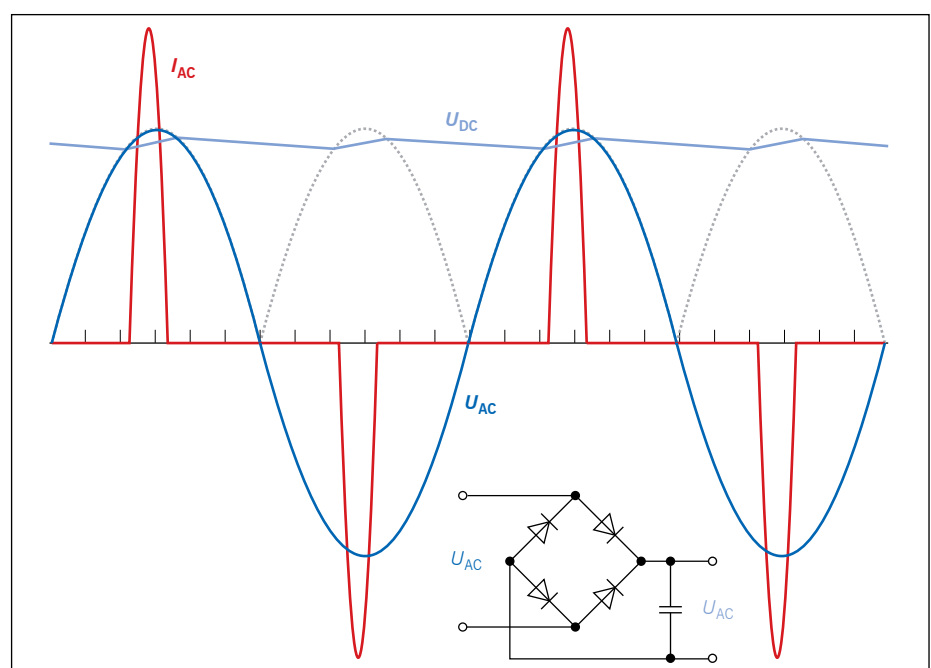
Es handelt sich bei diesen Betriebsmitteln vorwiegend um Frequenzumrichter, Stromrichter oder Netzteile, also Geräte, die auf der Eingangsseite (Netzseite) einen Gleichrichter enthalten. Wie Oberschwingungsströme im Einzelnen zustande kommen, wird an folgendem Beispiel eines Schaltnetzteils, exemplarisch veranschaulicht: Bedingt durch den Glättungskondensator auf der Gleichspannungsseite des Netzteils, nimmt der Dioden-Gleichrichter auf der Netzseite nur dann Strom auf, wenn die – idealisiert sinusförmig dargestellte –



❶ Nicht-lineare U-I-Charakteristik

Netzspannung U_{AC} größer als die Gleichspannung U_{DC} ist. Da diese Tatsache nur im Bereich des Scheitelpunktes der AC-Netzspannung gegeben ist (wenn der Glättungskondensator nachgeladen wird), liegt seitens des Gleichrichters dementsprechend eine pulsartige Stromaufnahme mit relativ geringem Stromflusswinkel vor (Bild ❷). Analysiert man nun das Frequenzspektrum dieses nicht-sinusförmigen, aber periodisch verlaufenden Stroms, stellt man fest, dass hinsichtlich der enthaltenen Frequenzanteile neben der Grundschwingungsfrequenz (1. Ordnung) auch diverse ganzzahlige Vielfache vorhanden sind. Es zeigt sich, dass in diesem spezifischen Stromverlauf die 3., 5., 7. und 9. Harmonische dominieren (vgl. mit Bild ❸).

Diese Oberschwingungsströme treffen im Netz auf die Netzimpedanz und bilden dann nach dem Ohmschen Gesetz äquivalente Spannungspegel, die eine entsprechende Verzerrung



❷ Schaltnetzteil: Schaltung sowie Strom- und Spannungsverlauf

Autor

Dipl.-Ing. Oliver Kuhnhenne, Dipl.-Ing. Hardy Nickell und Dr. rer. nat. Christian Dresel sind tätig bei der Fa. Condensator Dominik, Brilon.

der Spannung bewirken und des Weiteren etwaige Resonanzstellen im Netz anregen. Die IEC 61000-2-4 als Produktleitnorm gibt fest definierte Grenzwerte für die maximal zulässige Spannungsverzerrung vor. Innerhalb dieser Grenzwerte müssen Anlagen einwandfrei funktionieren. Bei Überschreitung dieser Grenzwerte dürfen Betriebsmittel und Prozesse gestört werden, ohne dass deren Hersteller in die Haftung genommen werden können (Verlust der Gewährleistungsansprüche). Der Kunde muss in solchen Fällen die entstehenden Kosten für Reparaturen und Produktionsausfälle selbst tragen. Hierbei können sich, gerade beim Ausfall von gesamten Produktionsprozessen, die finanziellen Zusatzbelastungen auf ein Vielfaches dessen summieren, was geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der verursachenden Spannungsverzerrungen im Vorfeld gekostet hätten. Es obliegt also der Verantwortung des Kunden, sicherzustellen,

dass die vorhandenen Spannungsverzerrungen in seinem Versorgungsnetz auf ein normativ verträgliches Maß reduziert werden.

Maßnahmen zur Reduzierung „klassischer“ Oberschwingungen

Je nach Herkunft, Ursprung und Stärke vorhandener Oberschwingungspegel können, zur effektiven Reduzierung, unterschiedliche Filtertechniken aus den Bereichen aktiver und passiver Systeme eingesetzt werden. Hybride Anlagen, also die Kombination von Aktiv- und Passivkomponenten, sind ein probates Mittel zur „Oberwellen“-Filterung. Bei einem passiven Filterkreis werden, vereinfacht ausgedrückt, ein Kondensator und eine Drossel (LC-Reihenschwingkreis) auf die primär zu filternde(n) Oberschwingungsordnung(en) abgestimmt. Bei der entsprechenden Ordnung bildet sich dann das Impedanzminimum die-

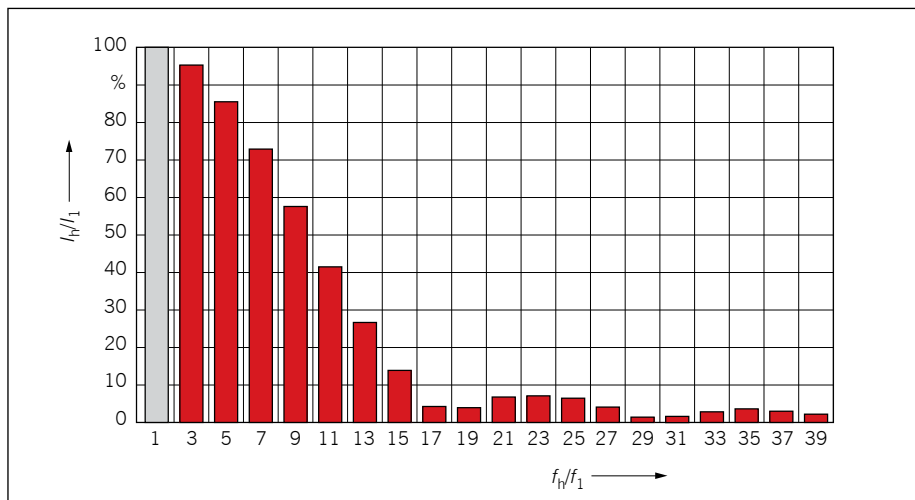
ses Gebildes aus, wodurch der Oberschwingungspegel sozusagen „abgesaugt“ und entsprechend vermindert wird.

Ein handelsübliches Aktivfilter misst hingegen den Laststrom und speist dazu phasenopposite (um 180° entgegengesetzte) Kompensationsströme ins Netz ein, die den jeweiligen Oberschwingungsstrom – ausgehend von der Last – am Verknüpfungspunkt des Aktivfilters bestmöglich „auslöschen“. Zur Auswahl des für die gegebene Anwendung geeignetsten Filtersystems stehen sich, bei aktiven und passiven Filtern, eine Reihe von technischen sowie wirtschaftlichen Vor- und Nachteilen gegenüber. Anhand derer muss entsprechend abgewägt werden, auf welches Konzept zurückgegriffen werden sollte. Eine Zusammenführung der einzelnen Vorzüge passiver und aktiver Systeme, ohne den gleichzeitigen Erwerb der jeweiligen Nachteile, bietet das noch relativ neue Passivfilterkonzept der intelligenten Impedanzanpassung. Hierbei wird, durch die Variation der resultierenden Kapazität des auf die zu filternde Oberschwingungsfrequenz abgestimmten LC-Reihenschwingkreises, dessen Resonanzfrequenz variiert, um einen nahezu konstanten Filterstrom zu erreichen. Eine potentielle Überlastung des Passivfilters wird auf diese Weise gänzlich vermieden (Bild 4).

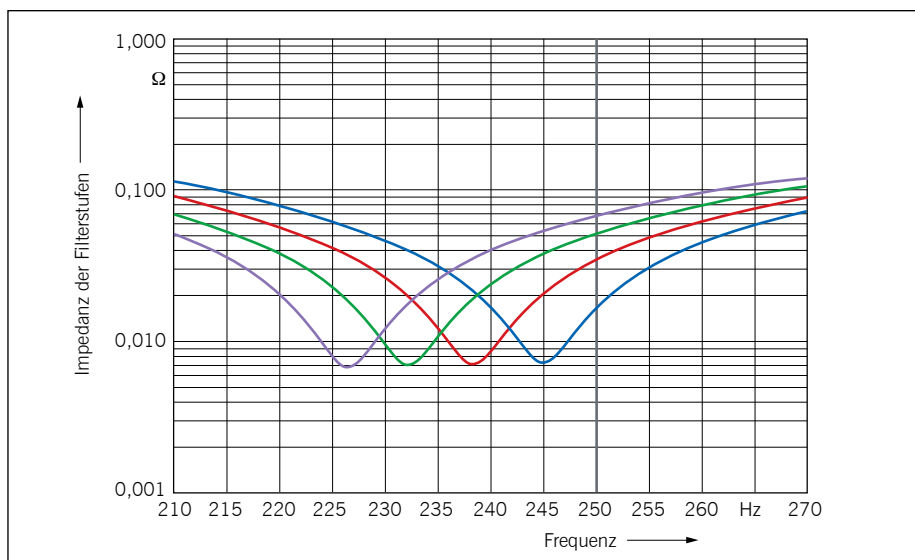
Entstehung von Resonanzen

Wenn im Fachjargon von einer Resonanz gesprochen wird, handelt es sich – physikalisch betrachtet und vereinfacht dargestellt – um ein schwingungsfähiges Gebilde, welches durch eine äußere Kraft „angestoßen“ und auf diese Weise zum Schwingen (Oszillieren) gebracht wird. Die Frequenz der Schwingung entspricht dabei der Eigenfrequenz (und somit der Resonanzfrequenz) des Systems.

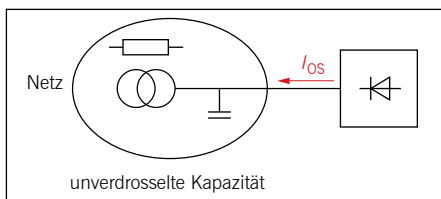
Diese schwingungsfähige Konstellation entsteht in einem elektrischen Netzwerk grundlegend durch das „ungünstige“ Zusammenwirken von induktiven und kapazitiven Bauteilen. In einem üblichen elektrischen Versorgungsnetz lassen sich stets induktive und mittlerweile zumeist auch kapazitive Elemente identifizieren. Im Grunde liegt heutzutage mehr oder minder in jedem Netz „irgendwo“ (bei irgendeiner Frequenz) eine Resonanzstelle vor. Allerdings erwächst daraus nicht immer eine ausgeprägte Schwingung mit hoher Stör-Amplitude. Bei welcher Frequenz die Resonanzstelle sich entwickelt, hängt maßgeblich davon ab, wie leistungsstark das Netz ist und wie viele Kondensatoren in dem jeweiligen Netz in Betrieb sind, also wie hoch die Gesamtkapazität ist.



3 Typisches Frequenzspektrum eines Schaltnetzteils



4 Impedanzkurven eines intelligenten Passivfilters für die 5. Harmonische (250 Hz)



5 Schematische Netzdarstellung mit Transformator, unverdrosseltem Kondensator und Oberschwingungserzeuger

$$U_{OS} = I_{OS} \cdot Z_{res.}$$

7 Formaler Zusammenhang zwischen dem anregenden Oberschwingungsstrom I_{OS} , der Resonanz-Impedanz $Z_{res.}$ und dem resultierenden Spannungspegel U_{OS}

Hinsichtlich der Induktivität ist, in erster Linie, typischerweise der speisende Transformator mit seiner ohmsch-induktiven Charakteristik zu nennen. Der kapazitive Anteil geht in der Regel von folgenden Betriebsmitteln/Komponenten aus:

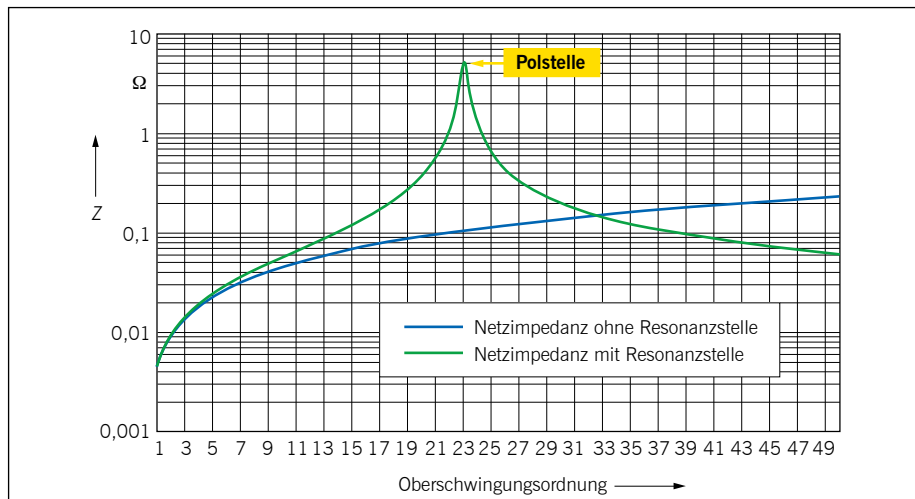
- EMV-Filter (von Umrichtern oder anderen leistungselektronischen Geräten)
- unverdrosselte Kompensationsanlagen
- ausgedehnte Kabelnetze
- Kompensationskondensatoren von Leuchtmitteln
- Glättungskondensatoren (Umrichter, Netzteile usw.).

Diese Kapazitäten bilden zusammen mit der Netz-Induktivität eine Parallelschaltung (Bild 5) und somit einen LC-Parallelschwingkreis mit einer nach der Formel

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

definierten Abstimmfrequenz (Resonanzfrequenz).

Exakt bei dieser System-Eigenfrequenz (Resonanzfrequenz) stellt sich das Impedanzmaximum dieses LC-Parallel-Schwingkreises ein (vgl. Bild 6). Ein solches Gebilde verhält sich somit genau entgegengesetzt zum Prinzip eines passiven Oberschwingungsfilters, welches bei der Abstimmfrequenz sein Impedanzminimum aufweist. Mathematisch gesehen liegt im Netz eine sogenannte Polstelle vor. An dieser Stelle überschreitet die Impedanz die eines unbeeinflussten Netzes um ein Vielfaches. Diese vorliegende Resonanz schwingt bzw. pendelt die Energie zwischen den beteiligten Betriebsmitteln – also der Induktivität und Kapazität – ständig hin und her. Wie lange die Schwingung andauert (bis sie abgeklungen ist) und in welcher Größenordnung sie in Erscheinung tritt, hängt letztendlich primär von



6 Impedanzverlauf eines Netzes ohne (blauer Vektor) und mit Resonanzstelle (grüner Vektor)

der Dämpfung und sekundär von der realen Kurzschlussleistung des Netzes ab.

Bild 6 ist zu entnehmen, dass die resultierende Netzimpedanz mit Resonanzstelle (grüner Verlauf) den unbeeinflussten Impedanzverlauf (blaue Kurve), bei dem ein lineares Verhalten zu Grunde gelegt ist, in einem relativ breiten Frequenzbereich zum Teil deutlich übersteigt. Man spricht in diesem Zusammenhang von Impedanzhöhung bzw. einem verstärkten Impedanzverlauf. Diese zitierte Impedanzhöhung findet real bis zum $\sqrt{2}$ -fachen der eigentlichen Resonanzfrequenz (Polstelle) statt.

Für den speisenden Transformator wurde bei dieser Simulation eine Nennscheinleistung von 1600 kVA bei einer relativen Kurzschlussspannung von 6 % berücksichtigt und für die vorgelagerte Netzebene (Mittelspannung) eine Kurzschlussleistung von 80 MVA. Der unverdrosselte „Störkondensator“, der die Polstelle (Resonanzstelle) letztlich bewirkt, weist in diesem Szenario eine kapazitive Leistung von 40 kvar auf (etwa 2,5 % der Transformator-Nennleistung).

In diesem Beispiel eines 400-V-Netzes bildet sich die Polstelle, also das Impedanzmaximum, bei der 23. Ordnung aus. Folglich wird die Netzimpedanz bis zur 32. Ordnung ($23 \times \sqrt{2} = 32$) verstärkt.

Ist nun ein Oberschwingungsstrom (beispielsweise ausgehend von einem Frequenzumrichter) vorhanden, dessen Frequenz ungefähr der Resonanzfrequenz des Parallelschwingkreises entspricht, so kann dieser Strom aufgrund der stark erhöhten Impedanz im Bereich der Polstelle schon mit einer relativ geringen „Stör-“Amplitude eine ausgeprägte Resonanzschwingung anregen und in weiterer Folge einen dementsprechend erheblichen Spannungspegel verursachen (Bild 7).

Es werden in einem resonanzbehafteten Netz somit, analog zur Netzimpedanz, alle etwaigen Spannungspegel im gesamten Band der Impedanzverstärkung (nicht nur bei der Polstelle selber) angehoben.

Der Stromverlauf in Bild 8, der so in einem realen Industrienetz aufgezeichnet wurde, zeigt, wie regelmäßig (in kurzen Zeitabständen) immer wieder resonante – gedämpfte – Schwingungen angeregt werden. Nachdem eine Schwingung angestoßen wurde, beginnt sie exponentiell periodisch abzuklingen (Kreis in Bild 8), bis sie anschließend, nach wenigen Millisekunden, erneut angeregt wird – noch bevor sie vollständig abklingen konnte. Das setzt sich so fort und kann insofern zu massiven Problemen im Netz führen.

Wenn eine Last aufgrund ihres spezifischen Betriebsverhaltens eine vorhandene Resonanzstelle quasi permanent (immer wiederkehrend) anstößt – wie z. B. bei einem Lichtbogenofen gegeben – und seitens des Gesamtsystems keine hinreichende Dämpfung besteht, kann sich die Situation immer weiter „aufschaukeln“ und die resonante Schwingung eine immer größer werdende Amplitude annehmen. Dieses führt dann zu Überschlägen und Zerstörungen der Betriebsmittel.

Angeregt werden kann eine Resonanz (neben Oberschwingungsströmen) bereits durch ein Einzelereignis wie einen Spannungssprung, einen Schaltvorgang oder eine Transiente (schnelle/rapide Strom- bzw. Spannungsänderungen) im Energieversorgungsnetz (Bild 9). Dieses auslösende Ereignis muss dabei nicht zwingend in dem Niederspannungsnetz auftreten, in dem sich die Resonanz störend bemerkbar macht, sondern kann seinen Ursprung auch auf der vorgelagerten, höheren Netzebene (Mittelspannungsnetz) haben.

Mögliche Folgen/Auswirkungen von Resonanzen sind:

- Mehrfache Nulldurchgänge der Spannung, Folge: Fehlfunktion von komplexen Industrieanlagen sowie elektronischen Steuerungen
- Überbelastung von EMV-Filtern, Dioden und Zwischenkreiskondensatoren der eingesetzten Frequenzrichter, Folge: Ausfallgefahr dieser (Produktionsstopp)
- Überspannungen (Spannungsanstiege) und dadurch Überschläge an Wicklungen von Motoren oder Transformatoren
- Zerstörung von Netzteilen
- „Surren“ bzw. „Dröhnen“ der elektrischen Betriebsmittel
- Einkopplungen von Störsignalen (Störspannungen) in Datenverbindungen (Datenleitungen). Folge: z. B. elektromagnetische Störungen des Firmenintranets
- Unkontrolliertes Ansprechen (Auslösen) von Schutzeinrichtungen (Sicherungen)
- „Aussteigen“ von Generatorreglern im Inselnetz.

Als besonders kritisch ist in diesem Zusammenhang auch der Einsatz von unverdrosselten Blindleistungskompensationsanlagen hervorzuheben. Die fehlende Drossel begünstigt eine Resonanzsituation, da sich bei irgendeiner Frequenz eine Parallelresonanz zwischen der Kompensationsanlage und dem speisenden Transformator einstellt (in Abhängigkeit der Transformatorgröße und der zugeschalteten Kompensationsleistung). Insofern ist, insbesondere in Netzen mit vorliegender Oberschwingungsbelastung (also inzwischen praktisch in beinahe allen Netzen), dringend vom Einsatz solcher Anlagen abzusehen. Durch die stetige Veränderung und Erweiterung der Versorgungsnetze können unverdrosselte Kompensationsanlagen, auch nach vielen Jahren des problemlosen Betriebes, plötzlich zu Quellen von Resonanzerscheinungen werden. Dies geschieht sowohl durch veränderte Konstellationen von induktiven und kapazitiven Elementen im Netz sowie durch das Auftreten anderer Oberschwingungsprofile. Dabei ist unerheblich, ob die Oberschwingungspegel selber erzeugt werden (sozusagen „hausgemacht“ sind) oder vom vorgelagerten Netz (der MS-Ebene) stammen. Letztendlich stellen unverdrosselte Kondensatoren ein potentielles Sicherheitsrisiko dar und müssen aufgrund dessen konsequent außer Betrieb gesetzt und wenn nötig durch verdrosselte Kondensatoren ersetzt werden. Bild 10 zeigt eine Resonanz, die durch eine unverdrosselte Kompensation hervorgerufen wurde.

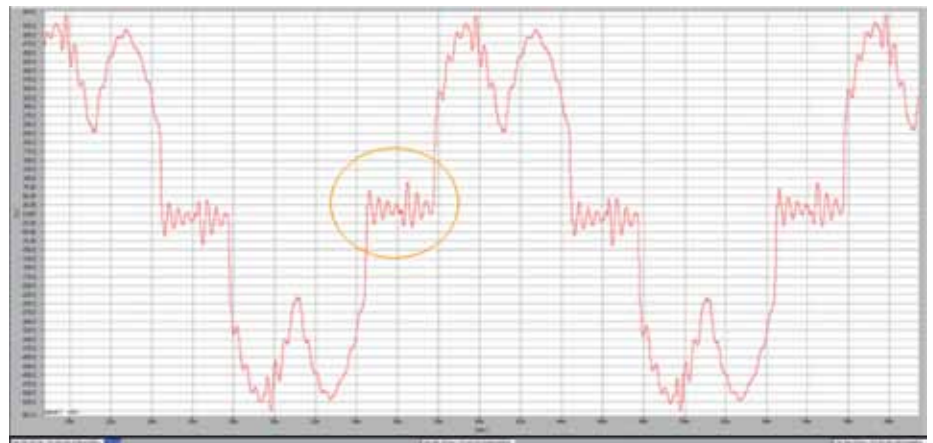
Dass diese Resonanz-Phänomene früher noch nicht so prägnant in Erscheinung getre-

ten sind, hängt vornehmlich damit zusammen, dass in den letzten Jahren in den Industrieunternehmen der Anteil nicht-linearer Verbraucher stark gestiegen ist. Es waren überwiegend (lineare) dämpfende Lasten, wie „starre“ Drehstromasynchronmotoren, Öfen oder auch Glühlampen in Betrieb. Bei diesen zuvor genannten Verbrauchern handelt es sich um vorwiegend ohmsch-induktive Lasten, die aufgrund ihrer Impedanzcharakteristik inhärent eine dämpfende Wirkung auf potentielle Resonanzen ausüben.

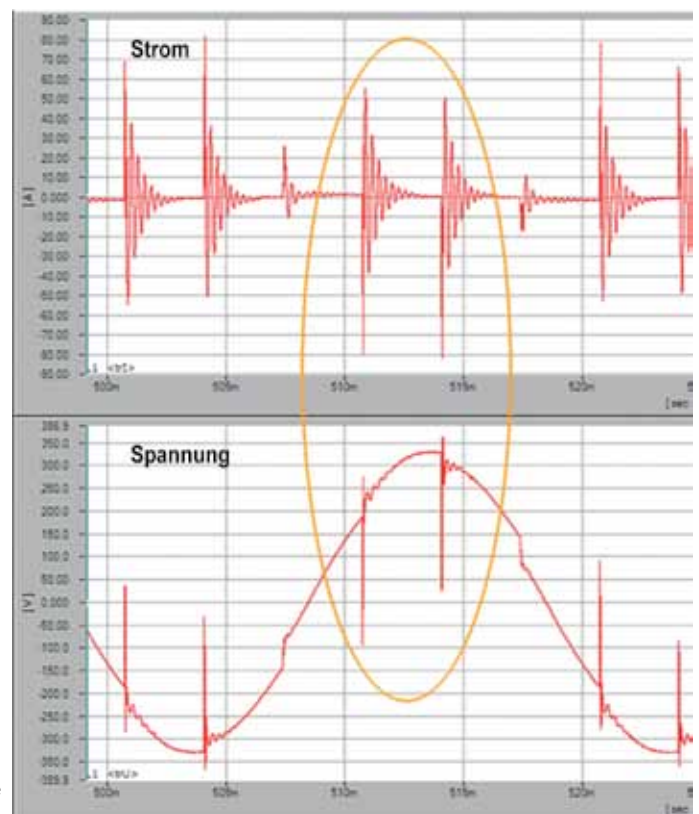
Diese dämpfenden Lasten wurden allerdings inzwischen sukzessive von leistungselektronisch-geregelten Betriebsmitteln verdrängt. Zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Prozessoptimierung (z. B. variable Motorreh-

zahl) wurden dabei sehr häufig bestehende Motoren um einen „vorgeschalteten“ Frequenzrichter ergänzt oder ganze Antriebssysteme vollständig ausgetauscht.

Gerade Frequenzrichter selber führen oftmals zu Resonanzsituationen im Netz. Denn Umrichter-Einheiten enthalten größtenteils EMV-Filter, die wiederum unbedämpfte und somit „resonanzbegünstigende“ Kondensatoren aufweisen (die zwischen den Außenleitern und gegen Erde/PE verschaltet sein können). Die EMV-Filter erfüllen den Zweck, geltende EMV-Richtlinien einzuhalten. Nur durch Einhaltung dieser darf ein Umrichter überhaupt im Kundennetz betrieben werden. Auf diese Weise werden der Taktfrequenz- bzw. Rippelstrom und zusätzlich störende Signale im



8 Beispielhafter Stromverlauf mit Resonanz (überlagerte höherfrequente Schwingungen)



9 Resonante Schwingungen angeregt durch regelmäßige transiente Spannungseinbrüche

MHz-Bereich gefiltert, die zwangsläufig beim Schalten/Takten des Umrichter-Wechselrichters entstehen. Demzufolge kann auch nicht so ohne Weiteres auf diese „kleinen“ Filter verzichtet werden.

Ferner wird sich, in einem spannungsgeführten Umrichter (U-Umrichter – „U“ bezieht sich auf einen kapazitiven Zwischenkreis), auch der Zwischenkreiskondensator (Energiespeicher zwischen Eingangs-Gleichrichter und Wechselrichter) als „Störenfried“ erweisen. Denn in Abhängigkeit der Auslegung des Zwischenkreiskondensators (Kapazität) und etwaigen Umrichter-Zusatzbeschaltungen, wie Drosseln auf der DC- (Zwischenkreis) und/oder AC-Seite (Netzseite), kann auch diese Kapazität zu einer Resonanzanlage beitragen. Der Zwischenkreiskondensator befindet sich zwar formal auf der Gleichspannungsseite des Umrichters, er ist aber immer wenn Dioden des Eingangs-Gleichrichters leiten direkt mit dem AC-Netz verbunden. Auf diese Weise ist es ihm möglich, auf das Versorgungsnetz Einfluss zu nehmen.

Darüber hinaus werden auch Transformatoren immer energieeffizienter (mit niedrigeren Verlusten und somit einem geringeren Wirkanteil), wodurch sich die Dämpfung im Netz weiter verringert und die Schwingungsneigung entsprechend erhöht.

Überschlagmäßige Bestimmung der Resonanzfrequenz

Über die resultierende kapazitive Leistung im Netz und den speisenden Transformator lässt sich näherungsweise ermitteln, bei welcher Frequenz sich das Impedanzmaximum – also die Resonanzstelle – ausbildet:

$$f_{\text{res.}} \approx f_N \cdot \sqrt{\frac{S_K}{Q_C}} \quad (2)$$

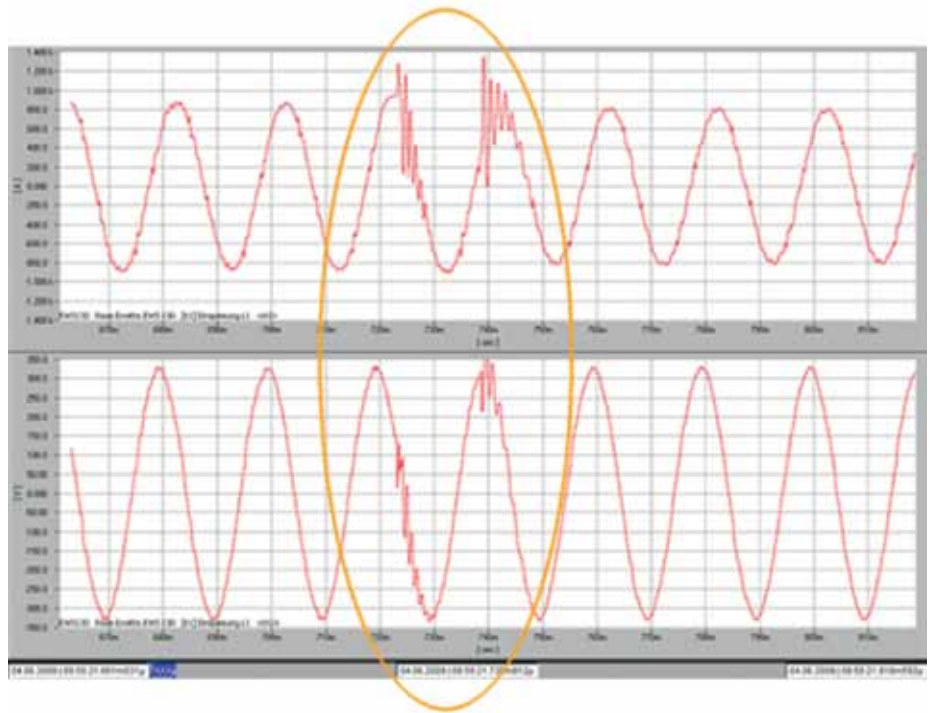
$f_{\text{res.}}$ Resonanzfrequenz in Hz

f_N Nennfrequenz in Hz (50 Hz)

S_K Kurzschlussleistung des Transformators in kVA

Q_C kapazitive Leistung (gesamt) in kvar

Typischerweise treten Resonanzstellen, wie bereits angedeutet, erst in einem Frequenzbereich über 1 000 Hz (20. Harmonische)



10 Resonanz im Strom (oben) und in der Spannung (unten) bedingt durch eine unverdrosselte Kompensationsanlage

auf. Eine Ausnahme können Inselnetze darstellen, wenn die angeschlossenen Verbraucher nur über einen dezentralen Generator mit Energie versorgt werden.

Aufgrund der bei einem Generator im Regelfall geringeren Kurzschlussleistung kann sich eine Polstelle in einem „reinen“ Inselnetz durchaus auch schon bei einer niedrigeren Frequenz als 1 000 Hz ausbilden. Es sei der Vollständigkeit halber erwähnt, dass auch im Transformatornetz (also bei normaler Netzverbindung) eine Resonanz unterhalb von 1 000 Hz auftreten kann, wenn beispielsweise eine enorme Anzahl an Umrichtern mit EMV-Filtern installiert ist. Denn dafür ist relativ viel kapazitive Leistung erforderlich.

Es gilt: Je schwächer das Netz ist, desto niedriger ist die Resonanzfrequenz (bei einer bestimmten/definierten kapazitiven Leistung).

Resonanzstellen im Netz absichern

Es gilt, Resonanzstellen von der Erstplanung, über die Errichtung bis hin zum allgemeinen Betrieb und etwaigen späteren Erweiterungen konsequent abzusichern. Idealerweise sollen

etwaige Resonanzstellen bereits in der Planungsphase eines neuen Netzes/Netzabschnittes durch entsprechende Berechnungen und Simulationen erkannt werden. Vergewenigt man sich jedoch hierbei, welche Konstellationen sich durch die Verteilung kapazitiver und induktiver Elemente in einem größeren Netz ergeben können, so ist es relativ schwierig, jede individuelle Resonanzstelle, die sich bilden kann, im Vorfeld zu erfassen. Im Besonderen können sich durch die nachträgliche Einbringung von Betriebsmitteln, die nicht Teil der ursprünglichen Planungsphase waren, ungünstige Schwingkreise bilden, die zuvor noch nicht vorlagen. In diesem Zusammenhang kann beispielsweise der Eingangskreis (EMV-Filter) eines neu angeschlossenen Umrichters dazu führen, dass eine unter Umständen bereits vorhandene Polstelle durch die zusätzliche Kapazität der EMV-Filter-Kondensatoren zu einer Frequenz verschoben wird, bei der ein Oberschwingungsstrom angeboten wird, der dann eine resonante Schwingung auslöst.

Auch ist es möglich, dass Polstellen zwar bereits im Vorfeld bekannt sind, diese aber als unkritisch angesehen werden, da sie bei-



Gebäudeautomation durchgängig planen mit der WSCAD SUITE X.

Gebäudeautomation, Elektroinstallation, Stromlaufplan, Schaltschranksaufbau, Fluid und P&ID

spielsweise im HF-Bereich liegen, in dem keine direkten Oberschwingungsströme zu erwarten sind. Wird der Netzbereich jedoch zu einem späteren Zeitpunkt mit Betriebsmitteln erweitert, die eben gerade in diesem zuvor als sicher eingestuftem Frequenzband höherfrequente Ströme verursachen/einspeisen (z. B. in Form von Umrichter-Taktfrequenzströmen), so werden kurz- oder langfristig ernsthafte Probleme durch die quasi plötzlich auftretende Resonanz entstehen. Es ist somit nur schwerlich zu gewährleisten, einen Netzbereich in Bezug auf mögliche Resonanzstellen von der Erstplanung über die Errichtung bis hin zum allgemeinen Betrieb und etwaigen späteren Erweiterungen konsequent abzusichern. Jedoch sollten, insbesondere hinsichtlich der Auslegung der eingesetzten Betriebsmittel, bereits gewisse Maßnahmen getroffen werden, um einer möglichen Resonanzbildung vorzubeugen, wie z. B. dem gezielten Einsatz von ordentlich applizierten Drosseln auf der Netz- und Zwischenkreisseite (DC-Seite) der Umrichter. Treten in einem Netzabschnitt Probleme auf, deren Ursache in einer unzureichenden Spannungsqualität begründet ist, so sollte im Allgemeinen zunächst eine umfassende Netzmessung durchgeführt werden. Anhand der aus den Messdaten gewonnenen Ergebnisse lassen sich entsprechende Filtermaßnahmen auslegen, um die vorhandenen Probleme auszuräumen oder die Verzerrung der Versorgungsspannung auf ein verträgliches Maß zu reduzieren.

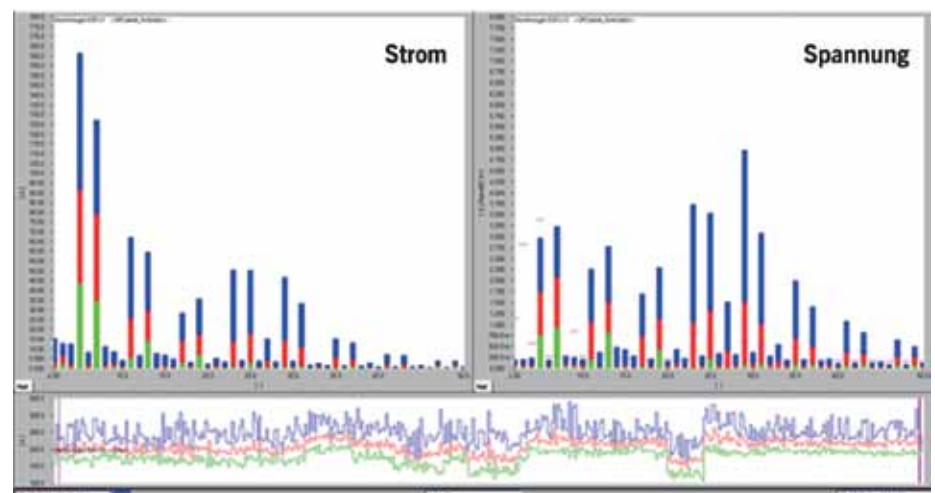
Um eine Pol- bzw. Resonanzstelle auch als eine solche identifizieren zu können, müssen besondere Kriterien herangezogen werden. Denn es ist seitens der Messdaten nicht immer direkt zu erkennen, ob es sich bei vorhandenen Störgrößen um unmittelbare last- oder resonanzbedingte Pegel handelt. Wichtige Indikatoren sind, erkennbar aus dem Messprotokoll, sichtbar erhöhte Strom- und Spannungspegel im höheren Frequenzbereich (Ordnungsbereich) der Spektren (Bild 11). Aufgrund dessen, dass beispielsweise taktfrequenzbedingte Ströme von Frequenzumrichtern ein zu einer Resonanz ähnliches Verteilungsprofil aufweisen, oder Umrichter mit sogenanntem schlanken Zwischenkreis im Frequenzbereich oberhalb von 1000 Hz (> 20. Ordnung) Oberschwingungsströme verursachen, müssen zur Bestimmung einer Netzresonanz weitere Kriterien hinzugezogen werden. So sollte insbesondere auch den sogenannten Interharmonischen, bzw. Zwischenharmonischen (nicht ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung) Strömen und Spannungspegeln im Bereich einer möglichen

Resonanzstelle, Beachtung beigemessen werden. Wenn Zwischenharmonische auftreten und diese ferner auch einen mehr oder minder quadratischen Funktionsverlauf aufweisen, deutet dieser Sachverhalt ebenfalls stark auf eine existierende Polstelle im Netz hin. Des Weiteren muss man immer den Kurvenverläufen (Momentanwertverläufe) von Strom und Spannung die nötige Aufmerksamkeit schenken, da eine Resonanz unter Umständen nur sporadisch zum Schwingen angeregt wird und dabei ggf. auch bereits nach wenigen Milli- oder Mikrosekunden schon wieder komplett abgeklungen (also nicht mehr sichtbar) ist. Als Konsequenz gibt sich die Polstelle im Spektrum leider nicht direkt zu erkennen. Die genannten Aspekte zeigen, dass es relativ aufwendig sein kann, eine Resonanz in einem Netz zu identifizieren. Es ist aber, mit der nötigen Erfahrung und etwas Gespür durchaus möglich.

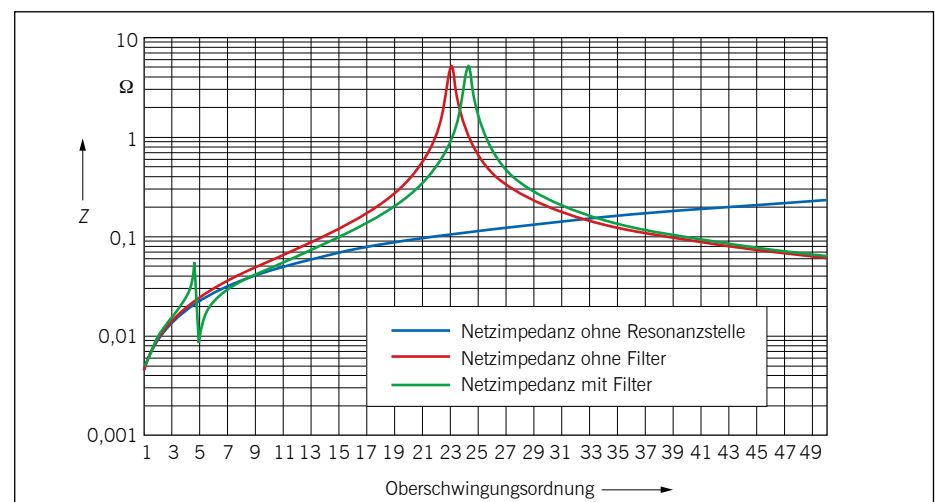
Effektive Bekämpfung von Resonanzen

Wird eine Resonanzstelle entdeckt, könnte man möglicherweise zunächst der Meinung sein, dass die Situation mit einem gewöhnlichen passiven Oberschwingungsfilter (LC-„Saugkreis“) ausgeräumt – also die Resonanz beseitigt – werden kann. Hierbei handelt es sich allerdings um einen Trugschluss. Die für die „klassische“ Oberschwingungsfilterung bewährte LC-Reihenschaltung würde die der Resonanz zugrundeliegende Polstelle nicht abschwächen bzw. eliminieren, sondern diese lediglich zu einer höheren Frequenz verschieben (Bild 12).

Die grundsätzlich kritische Polstelle im Netz besteht somit weiterhin, nur eben bei einer anderen, höheren Frequenz. Aber auch bei dieser „neuen“ Frequenz kann die Polstelle, durch einen entsprechenden Oberschwin-



11 Frequenzspektrum mit kritisch ausgeprägten Strom- (links) und Spannungspegel (rechts)



12 Impedanzverlaufskurve eines unbeeinflussten Netzes (blau) und eines Netzes mit ausgeprägter Polstelle (rot). Der interessante grüne Vektor zeigt das unwirksame Befiltern durch ein Passivfiltersystem. Die Polstelle selbst wird nur verschoben aber nicht eliminiert


gungsstrom oder einer Schalthandlung im Netz, zum Schwingen angeregt werden, so dass die grundlegende Problematik erneut vorliegt.

Auch mit einem herkömmlichen stromgeführten Aktivfilter lassen sich Resonanzstellen in der Regel nicht wirksam bekämpfen. Es sollte deren Einsatz genauestens geprüft werden, wenn angedacht ist, ein solches aktives Filter in einem resonanzbehafteten Netz einzusetzen. Denn praktisch jedes Aktivfilter enthält vergleichbar mit einem normalen Frequenzumrichter ein passives Ausgangsfilter (Taktfrequenzfilter), welches selbst zu einer Resonanzbildung im Netz beitragen kann. Das Ausgangsfilter ist nötig, um den Rippelstrom, der beim Takten des aktiven Gleichrichters entsteht, auf ein „gesundes“ Maß zu begrenzen. Darüber hinaus können Aktivfilter, bedingt durch deren technisches Funktionsprinzip, sozusagen „aktiv anregende Quellen“ für Resonanzschwingungen darstellen. Wie bereits zu Beginn dieses Beitrags kurz erläutert, handelt es sich bei einem Aktivfilter um eine variable Stromquelle, die einen zum gemessenen Laststrom um 180° phasenverschobenen Filterstrom ins Netz einspeist, um diesen am Filterverknüpfungspunkt im Idealfall komplett „auszulöschen“ (sodass er nicht mehr über den Transformator fließen und im Netz somit keinen Spannungsfall mehr hervorrufen kann). Wenn nun aber beispielsweise bei der 17. Harmonischen (850 Hz im 50-Hz-Netz) eine Polstelle vorliegt und das Aktivfilter genau bei dieser Ordnung einen Filterstrom ins Netz einspeist, wird die vorhandene Polstelle zum Schwingen angeregt oder eine womöglich bereits bestehende Resonanz, hinsichtlich der Störampplitude, noch verstärkt. Somit kann fatalerweise das Einbringen eines Systems zur Bekämpfung von Oberschwingungen genau zum entgegengesetzten Effekt führen. Der Regelalgorithmus bzw. das Schutzkonzept des Aktivfilters muss insofern unbedingt zulassen, dass Resonanzstellen zuverlässig erkannt werden und ggfs. bei der (den) entsprechenden Ordnung(en) vorsorglich keinen Oberschwingungsstrom ins Netzwerk einspeisen.

Aber dies bedeutet im Umkehrschluss auch, dass für einen relativ breiten Frequenzbereich unter Umständen keine Filterwirkung ausgehend vom Aktivfilter vorhanden ist. Folglich hat dann eine ausgeprägte Polstelle im Netz weiterhin Bestand.

Es sind mittlerweile auf dem Markt auch spezielle echtspannungsgeführte Aktivfilter verfügbar, mit denen sich durchaus auch Resonanzstellen dämpfen lassen. Derartige Systeme verhalten sich im Netz wie ein ohmscher Widerstand, woraus die erforderliche

dämpfende Wirkung resultiert. Allerdings decken sie nur einen begrenzten Frequenzbereich ab und sind darüber hinaus, was das Ergebnis angeht, nicht so effektiv wie passive DämpfungsfILTER. Des Weiteren ist natürlich auch mit dieser Art Aktivfilter Taktfrequenzstrom verbunden, der in gewisser Größenordnung (abhängig von der Auslegung des passiven Ausgangsfilters) ins Netz fließt und wiederum zu höherfrequenten Verzerrungen führen kann. Diese Betrachtungen zeigen folglich, dass mit aktiven Netzfiltern – insbesondere in Bezug auf das Thema Resonanzen – stets gewisse Einschränkungen einhergehen. Dies ist bei passiven Resonanz-DämpfungsfILTERn so nicht gegeben.

Betrachtet man die Resonanz einmal eher aus der klassischen physikalischen Sichtweise am Beispiel eines Pendels und somit einer mechanischen Schwingung, so lässt sich hieraus ein brauchbarer Lösungsansatz erarbeiten. Wird ein solches Pendel in Bewegung versetzt, so würde es unter idealen Umständen ohne den Einfluss äußerer Kräfte, kontinuierlich weiter-schwingen. Ein derartiger Vorgang ist in der Realität aber nicht gegeben, da die Schwingung aufgrund vorhandener Reibungskräfte allmählich abklingt – jedenfalls unter der Prämisse, dass von außen keine weitere Energie zugeführt wird. Man spricht in diesem Fall auch von einer gedämpften Schwingung. Hieraus lässt sich ableiten, dass sich jedes schwingende System, durch das Einbringen einer „geeigneten“ Dämpfung, entweder zum Abklingen oder aber zumindest zur Verminderung des „Aus-schlags“ (der Amplitude) bringen lässt. So auch, wenn ein solches System durch eine Frequenz angeregt wird, die dessen Eigenfrequenz entspricht, womit einhergehen würde, dass die Amplitude der Schwingung ihren Maximalwert annimmt. In diesem Kontext ist ebenso von Resonanzfrequenz die Rede, die wiederum durch das Einbringen eines Dämpfungselementes vermindert bzw. gänzlich unterdrückt werden kann. Überträgt man dieses Prinzip von einem mechanisch auf ein elektrisch schwingungsfähiges System, so lässt sich ein solches Dämpfungsglied durch ein bedämpftes Hochpassfilter realisieren. Dieses verschiebt die Polstelle nicht lediglich im Frequenzbereich (wie ein abgestimmter „Saugkreis“), sondern bedämpft die Resonanzstelle – je nach Auslegung – relativ stark. Wie im Bild  zu erkennen, sind nach der Bedämpfung in der Impedanzkennlinie keine kritischen Erhöhungen mehr vorhanden. Immer noch vorhandene Oberschwingungsströme haben aufgrund der weitaus geringeren Impedanz in dem Frequenzbereich, in dem die Polstelle auftritt, keine stark erhöhten Spannungspegel mehr zur Folge. Gerade unter



Innovativer Blitz- und Überspannungsschutz

Lösungen für MSR- und Automationstechnik

- **Optimaler Schutz für Anwendungen der Mess-, Schalt- und Regeltechnik**
- **Für den Einsatz in Steuerungs- und Automationsanlagen**
- **Gewährleistet Ausfallfreiheit und Verfügbarkeit**
- **Erfüllt die Norm IEC 61643-21**



Besuchen Sie uns in Hannover
vom 01. - 05. April 2019
Halle 13 / Stand D52

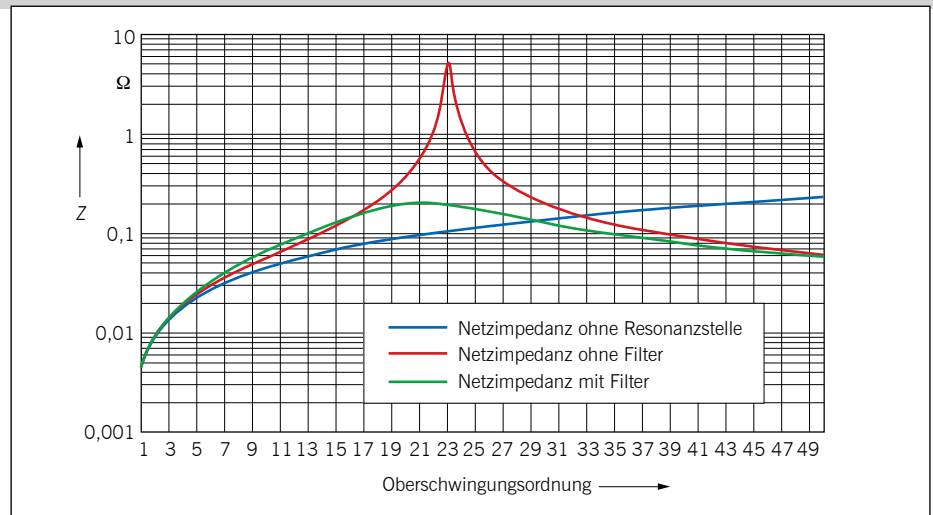
Citel Electronics GmbH
www.citel.de

diesem Gesichtspunkt erweist sich ein passives Resonanzfilter, im Vergleich zu einem aktiven Netzfilter, als vorteilhaft. Durch dessen Wirkungsweise werden keine Resonanzen angeregt und eine breitbandige sowie lückenlose Filterung ist gewährleistet. Gerade im höheren kHz-Bereich werden vorliegende Resonanzstellen zuverlässig ausgeräumt. Letztlich wird dabei im Dämpfungswiderstand des Hochpass-Gebildes die elektromagnetische Schwingungsenergie der Resonanz in Wärme umgesetzt, was zur Dämpfung selbiger entscheidend beiträgt. Die Kunst besteht darin, den Hochpass-Widerstand so auszulegen, dass bei möglichst geringen Grundschwingungsverlusten (Verluste sind mit Wärme verbunden, die vom Aufstellungsort abgeführt werden muss und durch die auch Kosten entstehen) eine hinreichend hohe Dämpfung vorliegt, die letztlich dafür sorgt, dass das System nicht mehr ins „unkontrollierte“ Schwingen geraten kann. Zumeist ist dafür auch nicht allzu viel Filterleistung notwendig, da die anregenden Ströme wesentlich geringere Amplituden aufweisen, als die daraus resultierenden Resonanzströme selbst (die ein Vielfaches des Stroms betragen, der sie ausgelöst hat). Es reicht somit häufig ein „kleines“ (etwas leistungsschwächeres) Filter aus, um hohe Störpegel signifikant zu reduzieren und das Netz deutlich zu beruhigen.

Abschaltung aller unverdrosselten Kompensationsanlagen

Netzresonanzen und die daraus resultierenden Probleme im Netz (mit angeschlossenen Verbrauchern) werden nach wie vor größtenteils „sträflich“ unterschätzt und häufig auch erst gar nicht erkannt. Die jüngste Vergangenheit zeigt faktisch, dass heutzutage, bedingt durch den vermehrten Einsatz moderner leistungselektronisch-geregelter Lasten, in praktisch jedem Netz – mindestens – eine Polstelle (Resonanzstelle) vorhanden ist. Ein darüber hinaus oftmals unbedachter Einsatz unverdrosselter Kompensationsanlagen, sowie die Anregung zuvor unbekannter Resonanzstellen durch aktive Filtersysteme, können plötzlich, in einem problemlos betriebenen Netzabschnitt, zum Teil schwerwiegende Auswirkungen haben. Angefangen bei der Störung einzelner Prozesse bis hin zur Beschädigung von Betriebsmitteln.

Um das Risiko von Resonanzen zu senken, dürfen daher nur noch verdrosselte Kompensationsanlagen installiert werden. Dieser Grundsatz gilt generell. Selbst wenn die im Netzbereich vorhandenen Betriebsmittel keine kapazitiven Elemente aufweisen und/oder



B Impedanzverlaufskurve eines unbeeinflussten Netzes (blau) und eines Netzes mit ausgeprägter Polstelle (rot). Der grüne Vektor zeigt die wirksame Bedämpfung der Polstelle mit Hilfe eines „Resonanz-Dämpfungsfilters“

keine erhöhten Oberschwingungsbelastungen vorliegen. Wie zuvor beschrieben, können Resonanzen auch erst zu viel späteren Zeitpunkten auftreten, wenn beispielsweise durch die Einbringung zusätzlicher elektrischer Betriebsmittel die kapazitiven bzw. induktiven Eigenschaften des Netzbereiches verändert werden. Des Weiteren kann durch den Ausbau des Netzes und die Zuschaltung weiterer nichtlinearer Verbraucher (Oberschwingungserzeuger) plötzlich bei kritischen Oberschwingungsordnungen ein resonanzanregender Strom fließen, der zuvor in der Form nicht gegeben war. Oder eine bereits bestehende resonante Schwingung tritt dann prägnanter (mit höherer Amplitude) in Erscheinung, weil bei dedizierten Ordnungen einfach mehr Oberschwingungsstrom zum Fließen kommt, woraus dann zwangsläufig auch höhere Spannungspegel resultieren. Sollten sich bereits unverdrosselte Kompensationsanlagen im jeweiligen Netzabschnitt befinden, so sind diese unverzüglich abzuschalten und entweder nachträglich (wenn nötig und möglich) zu verdrosseln oder durch eine entsprechend verdrosselte Neuanlage auszutauschen.

Fazit

Unabhängig davon, ob Kompensationsanlagen im Netzbereich vorhanden sind, sollte als vorbeugende Maßnahme ein Dämpfungsfiler installiert werden, beispielsweise als eine Transformatorfestkompensation. Diese kann dann, neben der Resonanzdämpfung, den induktiven Leistungsbedarf des Transformators bereitstellen. Zum einen können damit bereits vorhandene aber noch nicht erkannte Resonanzstellen eliminiert werden. Zum anderen wird so ein Schutz vor der möglichen Entstehung zukünftiger Resonanzen gewährleistet.

Aufgrund der oftmals schwierigen und langwierigen Ursachenforschung von Netzresonanzen und deren Auswirkungen dürfen neben den damit direkt verbundenen Produktionsstillstands- und Betriebsausfallkosten keinesfalls die zusätzlichen finanziellen Belastungen für Messungen, Spannungsanalysen und Auswertungen vernachlässigt werden. Von daher kann die Investition in ein Dämpfungsglied zur frühzeitigen Vermeidung von Resonanzen als durchaus sinnvoll angesehen werden. Insbesondere wenn man sich die Kosten vergegenwärtigt, die ansonsten ein im Laufe der Zeit immer wahrscheinlicher werdender Resonanzfall mit sich bringen kann. Sollte sich bereits eine verdrosselte Kompensationsanlage im Netzbereich befinden oder eine neue installiert werden, so kann hier bereits das Dämpfungselement als einfache Erweiterung mit in die Anlage integriert werden. Auf diese Weise werden zusätzliche Kosten sowie der Installationsaufwand minimiert.

Besteht der Verdacht auf eine Resonanz, – aber auch bei generellen Problemen, die möglicherweise auf eine unzureichende Spannungsqualität zurückzuführen sind – sollte als erste Maßnahme eine umfassende Netzqualitätsanalyse durchgeführt werden. Anhand dieser lassen sich potentielle Resonanzstellen bestimmen. Darüber hinaus kann auf Basis der Messdaten – in Kombination mit wichtigen Parametern das Netz betreffend, wie Netzaufbau, Netzkurzschlussleistung und ggf. weiterer Randbedingungen (z. B. Platzangebot bauseits) – ein passives Dämpfungsfiler für das entsprechende Netz ordnungsgemäß ausgelegt werden. Ein solches passives Filter ist praktisch die einzige effektive Möglichkeit, eine Resonanzstelle uneingeschränkt (breitbandig) zu bekämpfen, ungeachtet dessen, bei welcher Frequenz sie sich letztlich ausprägen würde. ■