

Versorgungsqualität in Mittelspannungsverteilungsnetzen

Kompensator begrenzt Erdschlussreststrom und Spannungsverzerrung

Die Ansprüche an die Versorgungsqualität mit Elektroenergie sind in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Das gilt vor allem für die Stromversorgung hochproduktiver industrieller Anlagen, aber auch für Haushalt und Gewerbe und bezieht sich sowohl auf eine qualitätsgerechte Versorgung mit Elektroenergie als auch auf eine hohe Zuverlässigkeit bei der unterbrechungsfreien Bereitstellung. Demgegenüber stellen jedoch die Netzbetreiber fest, dass die die Elektroenergiequalität mindernden Abnehmer-Netzzrückwirkungen in einem Umfang zugenommen haben, der den gewohnten sicheren Netzbetrieb gefährden kann.

Dem Anliegen einer hohen Qualität und Zuverlässigkeit der Elektroenergieversorgung werden mit Resonanzsternpunktterdung betriebene öffentliche Mittelspannungsnetze unter Beachtung wirtschaftlicher und technischer Aspekte sehr gerecht, weil bei dem am häufigsten auftretenden Netzfehler, dem einpoligen Erdschluss, keine unmittelbare Unterbrechung der Stromversorgung erforderlich ist. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass der Erdschlussreststrom nicht zu unzulässig hohen Berührungsspannungen im Netz führt. Für 20-kV-Netze bedeutet das, dass der Erdschlussreststrom den zulässigen Wert von $I_{\text{Res,zul}} = 60 \text{ A}$ nicht überschreitet und damit der Personenschutz sichergestellt ist. Aus eigenen Untersuchungen [1] ist ersichtlich, dass in öffentlichen Mittelspannungsnetzen mit einer Verstimmung $v \leq 2 \%$ und einer Dämpfung $d \leq 4 \%$ schon eine Überschreitung von $I_{\text{Res,zul}}$ infolge der unvermeidbaren Verzerrung der Versorgungsspannung zu erwarten ist. Diese Gefahr besteht selbst in den Mittelspannungsnetzen, bei denen Grenzwerte für den THDU und u_{h} nach [2] nicht überschritten werden. Der Oberschwingungsanteil im Erdschlussreststrom wird von der fünften Harmonischen dominiert. An dieser Situation wird sich aus jetziger Sicht auch nichts dadurch ändern, dass moderne TV-Geräte mit Flachbildschirm (LED-, LCD- oder Plasmageräte) eine stark reduzierte

fünfte Stromharmonische im Netzstrom aufweisen, was sicherlich durch den zu erwartenden massenhaften Einsatz von Energiesparlampen im Leistungsbereich von 10 bis 20 W, als einer weiteren typischen Belastungsgruppe öffentlicher Mittelspannungsnetze, weitgehend »ausgeglichen« wird. Vor allem die Reduzierung des Oberschwingungsanteils im Erdschlussreststrom durch Kompensationsmaßnahmen ist daher in vielen Netzen unumgänglich.

In welchen Verteilungsnetzen sind begrenzen Maßnahmen erforderlich?

Die Kenntnis der Größe des Erdschlussstroms und vor allem der maximalen Pegel der fünften Harmonischen in der Versorgungsspannung des Netzes ermöglicht in vielen Fällen eine Vorausberechnung des Oberschwingungsanteils im Erdschlussreststrom $I_{\text{Res,OS}}$ mit ausreichender Genauigkeit für Entscheidungen bei der Netzbetriebsführung. Unter Nutzung der in [1] vorgenommenen Systematisierung der Netzstruktur und grundsätzlicher Erkenntnisse aus der Analyse der Oberschwingungsverhältnisse in öffentlichen 20-kV-Mittelspannungsnetzen ($u_{\text{h}=5}$ bestimmt den THDU) kann der Oberschwingungsreststrom nunmehr nach Gl. (1) berechnet werden.

Unter Nutzung typischer Parameter für die Ersatzgrößen der elektrischen Betriebsmittel ($X_{\text{L,ers,h}}$, $X_{\text{C,ers,h}}$ und $R_{\text{ers,h}}$) des Netzes wie Transformatoren und Leitungen sowie unter Beachtung ihrer Frequenzabhängigkeit liefert die numerische Auswertung der Gleichung (1) eine einfache Berechnung der Oberschwingungsrestströme:

$$I_{\text{Res,OS}} = u_{\text{h}=5} \cdot a \quad (2)$$

In Gleichung (2) ist der Erdschlussfaktor a eine Funktion der Erdkapazität und wurde in Bild 1 für typisch gestaltete 20-kV-Verteilungsnetze [1] und einen Erdschluss sowohl im

Prof. Dr.-Ing. habil. **Dietrich Stade**, VDE, Consulting Engineer der H. Kleinknecht GmbH & Co. KG, Ilmenau.

An den Untersuchungen haben mitgewirkt: Eon Edis AG, Fürstenwalde (Spree), Kema IEV – Ingenieurunternehmen für Energieversorgung GmbH, Dresden, und H. Kleinknecht GmbH & Co. KG, Ilmenau.



Gleichungen

$$I_{\text{Res,OS}} = \frac{200 \cdot \sqrt{3} \cdot u_{\text{h}=5}}{\sqrt{(3X_{\text{L,ers,h}=5} - X_{\text{C,ers,h}=5})^2 + 3^2 R_{\text{ers,h}=5}^2}} \quad (1)$$

Erdschlussfaktor

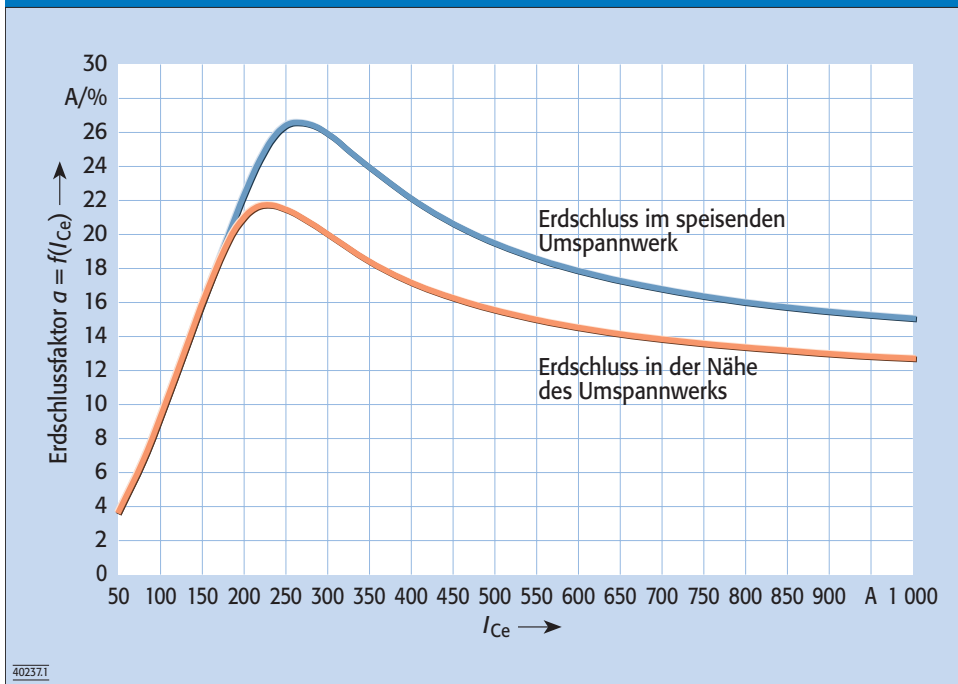


Bild 1. Erdschlussfaktor a

speisenden Umspannwerk als auch für einen umspannungswerknahen Fehlerfall dargestellt. Für den Fall, dass im Netz die Pegel der Versorgungsspannung $u_{h=7}/u_{h=5} \leq 0,22$ und $u_{h=3}/u_{h=5} \leq 0,33$ ($u_{h=3}$ -Werte für das Mit- und Gegensystem) sind, ist es ausreichend, den Oberschwingungsanteil des Reststroms $I_{\text{Res,OS}}$ entsprechend Gleichung (2) ausschließlich mit dem maximalen Pegel der fünften Harmonischen (10-min-Mittelwert), der im Netz auftreten kann, zu berechnen. Wie schon in [1] ausgeführt, entsteht im Bereich des I_{Ce} von rd. 150 bis 250 A – relativ »kleine« Netze, die z. B. im Zwei-Transformatorbetrieb gebildet werden – im Erdfehlerfall u. U. ein resonanter Zustand für die fünfte Stromharmonische im Erdschlussreststrom. In solch einem Netz ist es sinnvoll, die Eigenfrequenz des Netzes f_e , die für die Resonanz im Erdschlussfall maßgeblich ist, messtechnisch zu ermitteln oder zu berechnen.

Für die Spannungen der nicht vom Erdfehler betroffenen Leiter gilt in guter Näherung nach Fehlereintritt:

$$\hat{u} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{3L_{\text{ers}} C_e}} \quad (3)$$

Bei der numerischen Berechnung von f_e kann für die Ersatzinduktivität L_{ers} der Wert der Längsinduktivi-

tät des das Mittelspannungsnetz speisenden Transformators verwendet werden.

Für den Fall, dass $f_e \approx 250$ Hz wird, ist mit einem hohen $I_{\text{Res,OS}}$ zu rechnen, da der Oberschwingungsanteil im Erdschlussreststrom vor allem nur durch $R_{\text{ers,h=5}}$ begrenzt wird. Im »Schwachlastfall« des Netzes (der 110/20-kV-Transformator ist nur 10 bis 15 % ausgelastet) kann der Erdfehlerfaktor a Werte von rd. 40 A/% annehmen. Schwachlastfall im öffentlichen 20-kV-Netz bedeutet aber auch, dass der Pegel $u_{h=5}$ im Bereich von nur 1 % liegen wird und somit u. U. kritische Erdschlussrestströme bei $v < 2$ % und $d \leq 4$ % vielfach nicht erreicht werden.

Wenn der Pegel der fünften Spannungsharmonischen in einem 20-kV-Mittelspannungsnetz mit einem $I_{\text{Ce}} > 500$ A und der maximale Pegel der fünften Harmonischen in der Versorgungsspannung

$$u_{h=5} > \frac{I_{\text{Ce}}}{200 \text{ A/\%}} \quad (4)$$

mit $u_{h=5}$ in % und I_{Ce} in A, wird, ist eine sorgfältige Netzanalyse unumgänglich. Für diesen Fall ist es ratsam und vorteilhaft, die Berechnungen der Oberschwingungsanteile im Erdschlussreststrom beispielsweise mit dem Berechnungsprogramm Boses [3] vorzunehmen.

Kompensator Respect erfüllt Begrenzungsanforderungen auf Stromrichterbasis

Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, dass bei Erdfehlern in öffentlichen Mittelspannungsnetzen mit Resonanzsternpunktterdung durch die vom Netzbetreiber ohne bereits vorhandene Kompensationseinrichtungen nicht beeinflussbare Verzerrung der Versorgungsspannung zunehmend häufiger mit einer Überschreitung einzuhaltender Restströme im Erdschlussfall zu rechnen ist. Da der Oberschwingungsanteil im Erdschlussreststrom, wie in [1] gezeigt wurde, im Wesentlichen eine bisymmetrische Netzbelastung darstellt und der Ort des Erdfehlers nicht im Voraus festliegt, sind kompensatorische Maßnahmen durch eine aktive Filterung vorteilhaft und nur über das Drehstromsystem (mit- und gegenläufig) wirkungsvoll realisierbar. Der somit mindestens erforderliche dreiphasige Kompensator auf Basis eines sechspulsigen Stromrichters am Drehstromsystem schließt natürlich bei Nutzung geeigneter Algorithmen für Regelung und Steuerung des Stromrichters auch die Möglichkeit ein, im erdfehlerfreien Netz den Kompensator zur Verminderung der Verzerrung der Versorgungsspannung auf angestrebte oder erforderliche Werte – Einhaltung zulässiger Grenzwerte entsprechend [2] – im Bedarfsfall zu nutzen.

Die gleichstromseitige Kopplung des dreiphasigen Kompensationsstromrichters über einen zweipulsigen geregelten Wechselrichter mit wechselstromseitigem Anschluss parallel zur Erdschlussdrosselspule schafft optimal die Möglichkeit, auch die 50-Hz-Wirk- und Blindkomponente des Erdschlussreststroms auf »gewollte« Werte einzustellen. Darüber hinaus kann dieser Anschluss im Nullsystem des Netzes beispielsweise zur Messung der frequenzabhängigen Nulladmittanz und für Zwecke der Erdfehlerortung genutzt werden (Bild 2).

Über die komplette Stromrichterschaltung sowie die Anforderungen an ihre Regelalgorithmen und das notwendige Equipment zur Netzintegration und -erprobung wurde in [4] ausführlich berichtet. Ein Funktionsmuster des so entstandenen fünfphasigen aktiven Filters wurde

in einem Mittelspannungsverteilungsnetz in einer mehrmonatigen Testphase erprobt.

Ausgerüstet mit einer intelligenten Software und dem Know-how für die Erfordernisse des Netzbetriebs ist ein Kompensator Respect im Rahmen einer Produktfamilie entstanden, der in allen resonanzsternpunktgeerdeten Mittelspannungsnetzen – auch im industriellen Bereich – universell einsetzbar ist. Über ausgewählte erste Betriebserfahrungen mit einem Funktionsmuster des Respect sowie über sein elektrisches Betriebsverhalten sowohl im erdfehlerfreien als auch im erdfehlerbehafteten Netz wird im Weiteren berichtet.

Intelligente Software des Kompensators regelt die Begrenzungsvorgänge

Im erdschlussfreien Netz begrenzt der Kompensator Respect die Verzerrung der Versorgungsspannung auf vorgebbare Werte. Wenn er einen einpoligen Erdschluss in dem ihm zugeordneten Netz erkannt hat, besteht nunmehr mit der Drehstromeinheit (Bild 2) die Möglichkeit, nach Abklingen der mit dem Erdschlusseintritt verbundenen Ausgleichsvorgänge die Oberschwingungsanteile für $h = 3, 5$ und 7 im Erdschlussreststrom auf den durch den Personenschutz vorgegebenen Wert zu begrenzen (in 20-kV-Netzen: $I_{Res} < 60$ A), um den vom Erdfehler betroffenen Abgang nicht unmittelbar nach Fehlereintritt ausschalten zu müssen. In Bild 3 ist der Begrenzungsvorgang beispielhaft für die fünfte Stromharmonische in einem 20-kV-Netz dargestellt. Im vorliegenden Fall wurde im erdschlussbehafteten Netz ein Mittelwert $\bar{I}_{Res,h=5}$ von 5,5 A ermittelt, von dem aufgrund der »Vorgeschichte« im dargestellten Zeitabschnitt (ab $t = 10$ s bis $t = 50$ s) ausgegangen werden kann, dass dieser Mittelwert auch einem mittleren prospektiven Erdschlussreststrom $\bar{I}_{Res,h=5}$ prospektiv ungefähr der gleichen Größe entspricht, wenn keine Strombegrenzung durch Respect stattfinden würde.

Im bereits erdschlussbehafteten Netz wurde im Rahmen des Testprogramms nun der Kompensator bei rd. $t = 6$ s manuell eingeschaltet. Mit einem Mittelwert des Kompensationsstroms $\bar{I}_{K,h=5}$ von 6 A wird die Vorgabe, den Mittelwert auf ei-

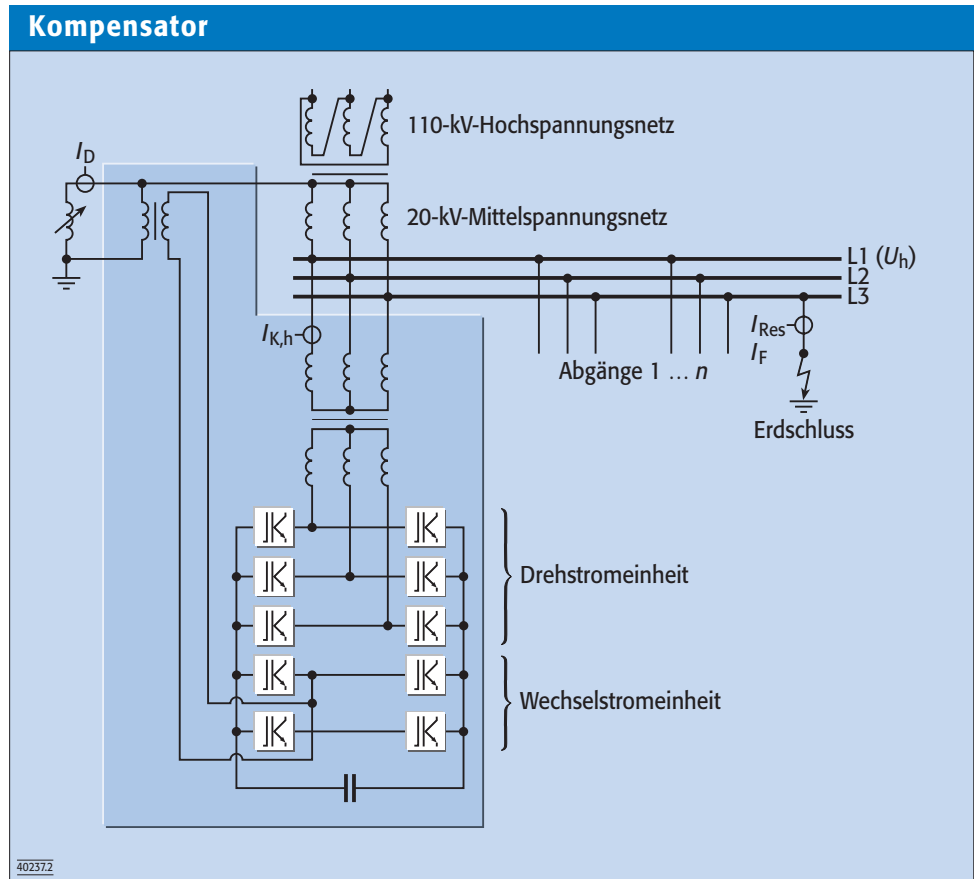


Bild 2. Fünfphasiger aktiver Kompensator Respect mit Anschluss am Speisepunkt des Mittelspannungsnetzes

nen Wert kleiner 3 A (hier wurden 2,7 A erreicht) zu begrenzen, sicher erreicht. Die »Überkompensation« $\bar{I}_{K,h=5} > \bar{I}_{Res,h=5}$ prospektiv ergibt sich naturgemäß daraus, dass sich am Anschlusspunkt des Kompensators (Respect) an der UW-Sammelschiene der unsymmetrische Kompensatorstrom, bestehend aus einer Mit- und Gegenkomponente, auf die Erdfehlerstelle sowie auf die 20-kV-Abzweige und den HS-MS-Transformator entsprechend der Stromteilerregel aufteilt.

Die Drehstromeinheit des Kompensators Respect kann im erdfehlerfreien Netz zweckmäßig zur Begrenzung der Spannungsverzerrung, verursacht durch die dritte, fünfte und/oder siebente Harmonische, auf erforderliche (entsprechend EN 50160 [2]) oder vorgegebene Werte eingesetzt werden. Der Begrenzungsvorgang für die fünfte Harmonische ist beispielhaft in Bild 4 zu sehen. Zum Zeitpunkt $t = 7$ s wurde die »THD-Regelung« der Drehstromeinheit des Kompensators aktiviert. Rund 1 s später beginnt der Begrenzungsvorgang. Die fünfte

Harmonische wird innerhalb von 2 bis 3 s auf rd. 0,5 p. u. (50 %) reduziert. Der Kompensatorstrom $I_{K,h=5}$ erreicht seinen eingestellten Endwert $I_{K,E,h=5}$. Eine kurzzeitige Ausschaltung (rd. 0,1 bis 0,2 s) des Kompensators nach rd. 10 s (bei $t = 18$ s) wird genutzt, um die Phasenlagen der zu kompensierenden »Störströme«, die Ursache der Spannungsverzerrung sind, zu bestimmen, um nach Wiedereinschaltung des Kompensators und nach abgeschlossenem Phasenabgleich mit einem Kompensatorstrom von rd. 0,7 p. u. das Kompensationsziel $U_{h=5}/\bar{U}_{h=5} < 0,2$ p. u. zu erreichen. Da davon auszugehen ist, dass Phasenlage und Höhe der »Störströme« zeitlichen Änderungen unterliegen, wird der geschilderte Aus-Ein-Vorgang in regelmäßigen Zeitabständen wiederholt.

Die fünfphasige Ausführung des Kompensators Respect mit einer frequenzvariablen Wechselstromeinheit ermöglicht darüber hinaus u. a. die Reduzierung der 50-Hz-Blindkomponente im Erdschlussreststrom, was in Bild 5 zu sehen ist.

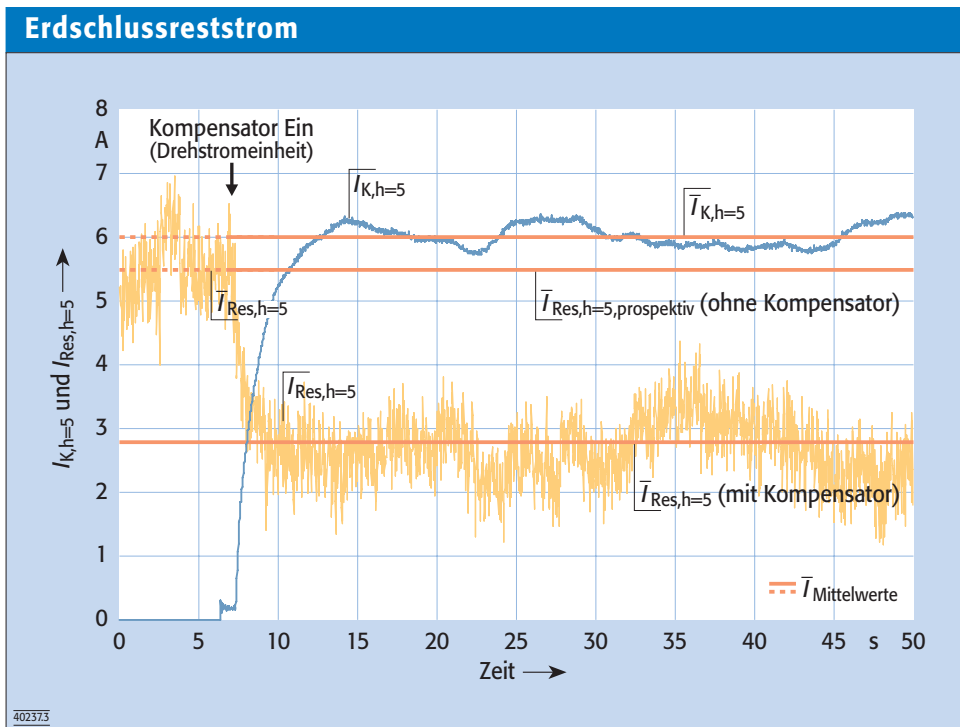


Bild 3. Begrenzung des Erdschlussreststroms für $h = 5$

Zur Bewertung des elektrischen Betriebsverhaltens des Kompensators Respect bei Veränderungen der Verstimmung ν im Falle eines einpoligen Erdschlusses wurde während des stationären Erdschlusses im Netz die Verstimmung mit Erdschlussdrosselspule von 0 auf -8% und dann auf $+8\%$ verändert. Im dargestellten Zeitabschnitt bleibt der Effektivwert des Wirkreststroms $I_{Res,wirk}$ annähernd konstant, der Betrag des Effektivwerts des Blindreststroms $I_{Res,blind}$ folgt dem zeitlich veränderlichem Strom der Erdschlussdrosselspule I_D bis zu einem Zeitpunkt von $t \approx 42\text{ s}$ (Bild 5), an dem die Wechselstromeinheit des Kompensators für die Kompensationsaufgabe, nämlich Reduzierung des induktiven Blindreststroms (50-Hz-Wert) auf einen vorgegebenen Wert von 20 A aktiviert wird. Die Wechselstromeinheit regelt somit auf einen kapazitiven Kompensationsstrom von 20 A (50-Hz-Wert). Zu einem weiteren Zeitpunkt (bei $t \approx 65\text{ s}$), an dem die Verstimmung ν den Wert Null annimmt, wird der Blindreststrom $I_{Res,blind}$ ebenfalls null, um bei positiver Verstimmung von $+8\%$ schließlich dem kapazitiven Kompensatorstrom (50-Hz-Komponente) von 20 A zu entsprechen.

Werden in einem Mittelspannungsnetz im Erdfehlerfall »Eingrenzungsschaltungen« zur Fehlerortung vorgenommen, verändert sich mit jeder Ein- oder Ausschaltung eines beliebigen Leitungsabgangs der 50-Hz-Blindstromanteil im Erdschlussreststrom, der prinzipbedingt nur sehr zeitverzögert durch Verstellen der Erdschlussdrosselspule kompensiert werden kann. Der Kompensator erkennt in diesem Fall eine mit dem Schaltvorgang verbundene Änderung des 50-Hz-Erdschlussreststroms und wird den Grundschwingungsblindanteil im Erdschlussreststrom durch die Wechselstromeinheit um den in solchen Fällen benötigten Kompensationsstrom von 20 bis 30 A verzögerungsfrei reduzieren bzw. erhöhen (Bild 6).

Netzbetrieb des Funktionsmusters Respect bestätigt Einsatztauglichkeit und Funktionalität

Im Rahmen des mehrmonatigen Betriebs eines Funktionsmusters in einem 20-kV-Verteilungsnetz der öffentlichen Stromversorgung mit Resonanzsternpunktterdung wurde die Praxistauglichkeit der Hard- und Softwarekomponenten des Kompensators Respect bestätigt. Erfolgreich konnte nachgewiesen

werden, dass ausgewählte Spannungsharmonische ($h = 3, 5$ und 7) in der Versorgungsspannung des erdschlussfreien Netzes auf vorgegebene Werte sicher begrenzt wurden. Die Pegel der Stromharmonischen ($h = 3, 5$ und 7) im Erdschlussreststrom bei einpoligem Erdfehler wurden so kompensiert, dass normative Vorgaben aus der Sicht des Personenschutzes – $I_{Res} = 60\text{ A}$ in 20-kV-Netzen beim Betreiben des erdschlussbehafteten Netzes nicht zu überschreiten – immer eingehalten wurden.

Es hat sich als sehr zweckmäßig herausgestellt, dass im Gesamtkonzept von Respect davon ausgegangen wurde, Erdschlusswischer nicht zu erfassen, intermittierende Erdschlüsse wie »stationäre« bei der Reststrombegrenzung zu behandeln und vorerst mit dem Kompensator nicht das Ziel zu verfolgen, eine Verbesserung des Erdfehlerlöschung zwangsläufig anzustreben. In welchem Umfange die Löschbedingung eines Erdschlusslichtbogens sich durch die mit dem Kompensator vorgenommene Reststrombegrenzung verändern oder verbessern, wurde bisher auch nicht näher untersucht. Der Netzbetrieb des Funktionsmusters und vorausgegangene Untersuchungen mit dem Funktionsmuster des Respect in einem 400-V-Netz lassen nunmehr den Schluss zu, dass Erdfehlerort und -widerstand, die Erdfehlerart (metallische Erdverbindung, Lichtbogenerschluss stabil oder intermittierend), die Verstimmung ν des Netzes, alle betriebsmäßig üblichen Schalthandlungen im Netz sowie die im Netz vorhandene Primär- und Sekundärtechnik die korrekte Funktionsweise von Respect nicht beeinträchtigt haben. Weiterhin hat es sich als vorteilhaft, effektiv und funktionstüchtig erwiesen, dass der Kompensator Respect das ihm zugewiesene Netz zwar kontinuierlich auf einen Erdfehler überwacht, aber erst nach einer vom Netzbetreiber vorgegebenen Zeit kompensierend in das Fehlergeschehen eingreift. Damit wird den im speisenden Umspannwerk vorhandenen konventionellen Schutz- und Regeleinrichtungen die Möglichkeit gegeben, unter den für ihr ordnungsgemäßes Arbeiten »gewohnten Netzreaktionen« zu reagieren.

Andererseits wurde auch der Nachweis erbracht, dass der Kompensator zum Einsatz in Mittel-

Spannungsverzerrung

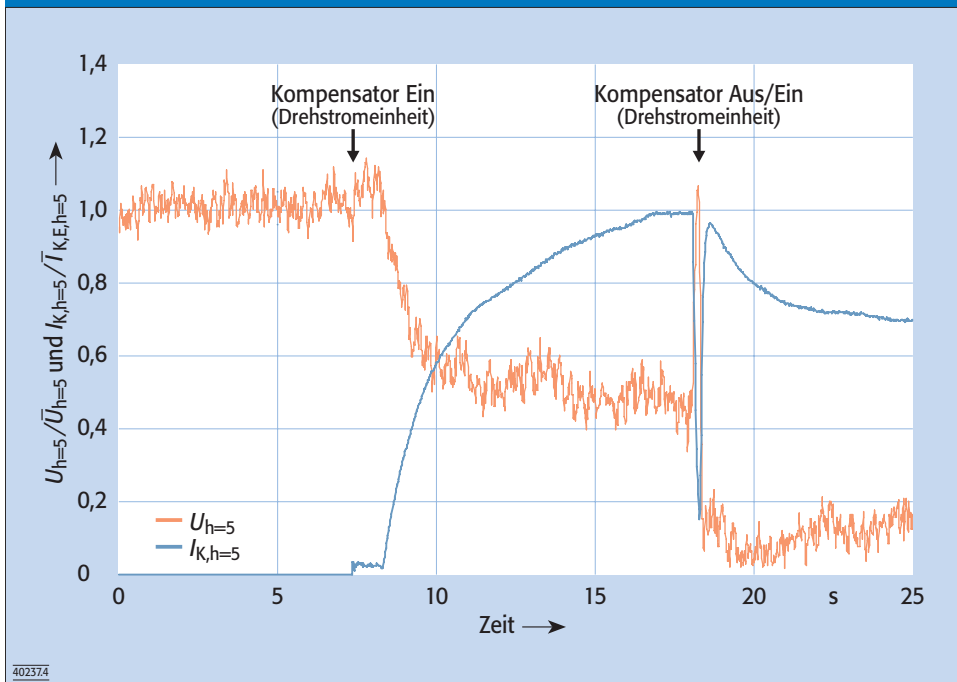


Bild 4. Begrenzung der Verzerrung der Versorgungsspannung im erdfehlerfreien 20-kV-Netz (Darstellung für $h = 5$)

spannungsverteilungsnetzen mit Versorgungsspannungen von 6 kV bis 24 kV geeignet ist und keine Einschränkungen in der üblichen Betriebsweise dieser Netze erforderlich werden. Sein modularer Aufbau ermöglicht eine wirtschaftliche Leistungsanpassung an die jeweiligen Netzerfordernisse. Ein Parallelbetrieb mehrerer Kompensatoren im gleichen Netz ist möglich.

Zusammenfassung

Der Einsatz des Respeact-Kompensators in einem Mittelspannungsnetz der öffentlichen Stromversorgung

- garantiert die erforderliche Spannungsqualität von Mittelspannungsnetzen im Normalbetrieb,
 - begrenzt den stationären Erdschlussreststrom auf für den Personenschutz zulässige Werte, um ein Weiterbetreiben des Netzes mit Erdschluss im Bedarfsfall zu ermöglichen,
 - erfordert keine kostenintensive Netzumstellung (z. B. auf niederohmige Sternpunktterdung),
 - reduziert Versorgungsunterbrechungen durch eine mögliche Umstellung von niederohmiger Sternpunktterdung auf Resonanzsternpunktterdung und
 - verursacht keine Einschränkungen im bisherigen Netzbetrieb bzgl. Fahrweise, Schutz, Schalthandlungen und Fehlerortungen.
- Sein modularer Aufbau ermöglicht eine optimale Anpassung an die Netzerfordernisse, und er ist im Inland und europäischen Ausland patentrechtlich geschützt.

Erdschlussreststrom

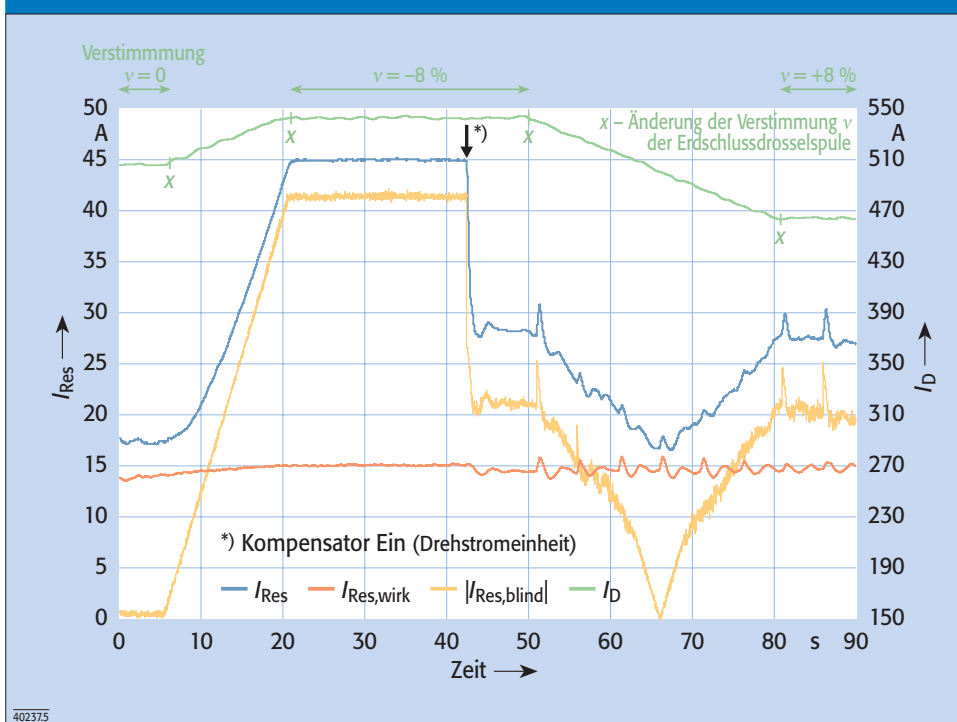
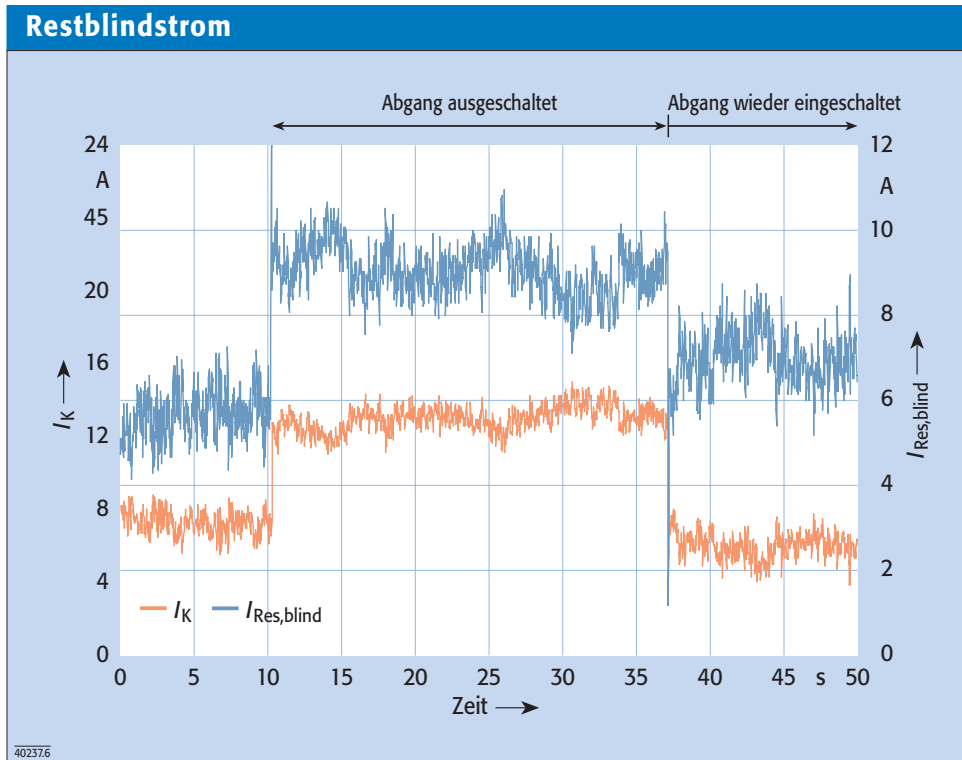


Bild 5. Kompensator begrenzt Erdschlussreststrom (50-Hz-Blindanteil)

LITERATUR

- [1] *Stade, D.*: Erdschlussströme in MS-Netzen mit Resonanzsternpunktterdung, etz 11/2007.
- [2] DIN EN 50160:2000-03: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsnetzen. Berlin, Beuth.
- [3] *Stade, D.*: Programm Boses zur Berechnung überschwingungsbehafteter Erdschlussrestströme. ew Jg. 107 (2008), H. 5, S. 38 – 43.
- [4] *Groß, G.; Dorendorf, St.; Ulrich, P.*: Technische Lösungen zur Kompensation der Oberschwingungen im Erdschlussreststrom. Vorträge der ETG-Fachtagung vom 27. – 28. Januar 2009 in Dresden, Tagungsband 116, S. 47 – 52.
- [5] *Ulrich, P.*: Begrenzung der Erdschlussrestströme mit aktiver Filterung – Erprobung eines Funktionsmusters. Technikveranstaltung des VDE-Bezirksverein Thüringen e.V., 21. Oktober 2010, Erfurt.



(40237)

Bild 6. Kompensator (Wechselstromeinheit) begrenzt den Restblindstrom ($I_{Res,blind}$) während eines ausgeschalteten Abgangs (Eingrenzungsschaltung) auf $I_{Res,blind} \approx 10\text{ A}$; ohne Begrenzung wäre $I_{Res,blind} \approx 17\text{ A}$

Tafel 1

a	Erdschlussfaktor
C_e	Erdkapazität
d	Dämpfung (50-Hz-Wert)
f_e	Eigenfrequenz
f_h	Frequenz der Harmonischen h
h	Ordnungszahl einer Harmonischen (Frequenzverhältnis $h = f_h/50\text{ Hz}$)
L_{ers}	Ersatzinduktivität
I	Strom (Effektivwert)
I_{Ce}	kapazitiver Erdschlussstrom (Effektivwert)
I_D	Strom der Erdschlussdrosselspule (Effektivwert)
I_F	Fehlerstrom (Effektivwert)
I_h	Strom der Harmonischen (Effektivwert)
I_K	Kompensatorstrom (Effektivwert)
$I_{K,h}$	Kompensatorstrom der Harmonischen h (Effektivwert)
$\bar{I}_{K,h}$	10-min-Mittelwert des $I_{K,h}$
$I_{K,E,h}$	Kompensatorstromendwert der Harmonischen h
I_{Res}	Erdschlussreststrom (Effektivwert)
$I_{Res,blind}$	Blindkomponenten von I_{Res} (Effektivwert)
$I_{Res,wirk}$	Wirkkomponenten von I_{Res} (Effektivwert)
$I_{Res,zul}$	zulässiger Erdschlussreststrom (Effektivwert)
$I_{Res,h}$	Erdschlussreststrom der Harmonischen h (Effektivwert)
$\bar{I}_{Res,h}$	10-min-Mittelwert von $I_{Res,h}$
$\bar{I}_{Res,h,prospektiv}$	prospektiver 10-min-Mittelwert von $I_{Res,h}$
$I_{Res,OS}$	Erdschlussreststrom Oberschwingungsanteil (Effektivwert)
ν	Verstimmung
$R_{ers,h}$	Ersatzresistenz bei der Frequenz der Harmonischen h
t	Zeit
$THDU$	Verzerrungsfaktor der Spannung (%-Wert)
U_h	Spannung der Harmonischen h (Effektivwert)
\bar{U}_h	10-min-Mittelwert von U_h
u_h	Spannung der Harmonischen h (p.-u.-Wert, %-Wert)
$X_{L,ers,h}$	Ersatzresistenz (induktiv) bei der Frequenz der Harmonischen h
$X_{C,ers,h}$	Ersatzresistenz (kapazitiv) bei der Frequenz der Harmonischen h

helge.schaefer@kleinknecht.de

dietrich.stade@kleinknecht.de

stefan.dorendorf@eon-edis.com

Tafel 1. Formelzeichen