

Ferroresonanz an 220/420-kV-Spannungswandlern bei Schalthandlungen

Reinhold Bräunlich • Holger Däumling • Martin Hofstetter • Udo Prucker • Joachim Schmid • Ruthard Minkner • Hans-Werner Schlierf

Der Beitrag liefert eine Übersicht über das in Hoch- und Mittelspannungsnetzen unerwünschte Phänomen der Ferroresonanzschwingungen im Zusammenhang mit induktiven Spannungswandlern. Durch Ferroresonanzen können erhebliche Schäden entstehen. Allerdings werden wegen der unterschiedlichen Auftretensformen Ferroresonanzerscheinungen nicht immer als solche erkannt. Ferroresonanzen treten in der Regel in einem kleinen, vom übrigen Netz abgetrennten Teil einer Schaltanlage oder eines Netzes auf. Der betroffene Anlagenteil schließt einen oder mehrere Spannungswandler, Kopplungs- und Erdkapazitäten ein, welche einen Schwingkreis bilden. Infolge der kapazitiven Kopplung mit der Netzspannung kann bei Sättigung des Wandlerkerns eine Vielfalt komplexer, nicht linearer Schwingungen angeregt werden. In diesem Beitrag wird ein komplexer dreiphasiger Ferroresonanzvorgang beschrieben, analysiert und die Abhilfemaßnahme dargestellt.

sige und dreiphasige Ferroresonanzschwingungen,

- Ersatzschaltbilder,
- Anforderungen an Systeme und induktive Spannungswandler,
- Prüfungen,
- Dämpfungsmaßnahmen bei vorhandenen Ferroresonanzschwingungen,
- rechnerische Überprüfung,
- Beurteilungen von Systemen.

Dieser Inhalt soll sich auf Veröffentlichungen in der etz Elektrotechnik + Automation [5] und Bulletin SEV/VSE (Electrosuisse) [6] abstützen. Die genannten Themen beziehen sich auf gemessene und analysierte Vorgänge von tatsächlich aufgetretenen Ferroresonanzschwingungen in Umspan- und Schaltstationen.

Bei einigen deutschen, europäischen und überseeischen Versorgungsunternehmen traten bei Schalthandlungen in Umspan- und Schaltstationen, ausgerüstet mit induktiven Spannungswandlern, vermehrt stationäre nicht lineare Schwingungen auf – ein in der Praxis auch als Ferroresonanz bezeichneter Vorgang. In den zugehörigen IEC/CENELEC-Standards für induktive Spannungswandler IEC 60044-2 [1] bzw. DIN EN 60044-2 (VDE 0414-2) [2] oder kombinierte Strom- und Spannungswandler IEC 60044-3 [3] bzw. DIN EN 60044-3 (VDE 0414-44-3) [4] sind keine Hinweise für die Anforderungen bezüglich der Ferroresonanz an die induktiven Spannungswandler und Systeme vorhanden. Die Anforderungen sind von den Parametern der Stationen und Betriebsmitteln abhängig und können nur von den Anlagebauern und Betreibern geliefert werden.

Um diese Lücke in den Standards [1] und [3] zu schließen, wurde von dem Vorsitzenden der TK38-CH eine internationale Arbeitsgruppe AG1 der TK38-CH zur Erarbeitung von Vorschlägen für ein „New Work Item Proposal: Ferroresonanz in Substation“ an das internationale IEC/TC38 für Messwandler zusammengerufen. Die Aufgabe des NWP ist, einen Anhang für den IEC-Standard

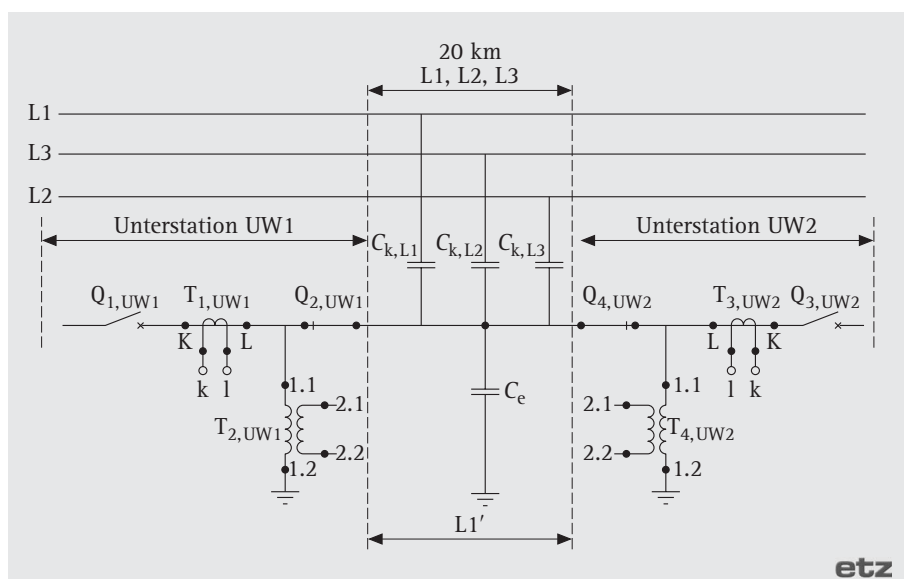


Bild 1. Ersatzschaltbild eines Leitungs-Stationen-Systems. System, das zu einphasigen Ferroresonanzschwingungen in beiden Unterstationen UW1 und UW2 führen kann. L1, L2, L3 Freileitungssystem in Betrieb; L1' ausgewählter Leiter der Freileitung; $C_{k,L1}$, $C_{k,L2}$, $C_{k,L3}$ Kopplungskapazitäten zwischen dem betrachteten Leiter L1' und L1, L2, L3; $T_{1,UW1}$, $T_{3,UW2}$ Stromwandler; $T_{2,UW1}$, $T_{4,UW2}$ Spannungswandler; C_e Erdkapazität von L1' gegen Erde und die Erdkapazitäten von $T_{1,UW1}$, $T_{2,UW1}$, $T_{3,UW2}$, $T_{4,UW2}$; $Q_{1,UW1}$, $Q_{3,UW2}$ Leistungsschalter, geöffnet; $Q_{2,UW1}$, $Q_{4,UW2}$ Leitungs-Trenner, geschlossen

TC38/60044-2 [1]/60044-3 [2] mit folgendem Inhalt zu erarbeiten:

- Einführung,
- Definitionen,
- physikalische Erklärungen für einpha-

Die AG1 setzt sich aus Ingenieuren von zwei Anlagenbetreibern, RWE Transportnetz Strom [7] und Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz, [8]), von drei induktiven Spannungswandler-Herstellern Ritz

[9], Trench-Germany [10] und Trench Switzerland AG [11], von einem der Fachkommission für Hochspannungsfragen [12] und dem Vorsitzenden der nationalen TK38-CH zusammen.

Bisher wurden zwei Arbeiten der AG1, Teil 1 „Definitionen und allgemeine Erklärungen“ [13] und Teil 2 „Fallbeispiele“ [14], Ende 2006 veröffentlicht. In der vorliegenden Veröffentlichung der AG1 wird ein Ferroresonanzvorgang, hervorgerufen durch die kapazitive Einkopplung von Energie aus einem in Betrieb befindlichen Leitungssystem in einen parallel verlaufenden, nicht geerdeten, abge-

schalteten Leitungsabschnitt mit zwei Umspannstationen, behandelt (Bild 1).

Das Ersatzschaltbild des Netzsystems

Dargestellt ist in Bild 1 ein dreiphasiges „in Betrieb“ stehendes Leitungssystem mit den Leitern L1, L2, L3 und von dem „nicht in Betrieb“ befindlichem Drei-Leitersystem einer niedrigen Spannungsebene L1', L2', L3' „stellvertretend für alle drei Leiter“ nur der Leiter L1'. Die Ersatzschaltbilder der Leiter L2' und L3' wurden nicht dargestellt, da sie für die Betrachtung nicht benötigt werden.

Zwischen den Unterstationen UW1 und UW2 laufen die beiden Freileitungssysteme L1, L2, L3 und L1', L2', L3' längs der Strecke l parallel (Bild 2). Das Freileitungssystem L1'', L2'', L3'' wird vernachlässigt. Unterstation UW1 weist aufgrund des Spannungswandlers $T_{2,UW1}$ die Induktivität L_{UW1} auf, Unterstation UW2 bildet aus dem Spannungswandler $T_{4,UW2}$ die Induktivität L_{UW2} . Die möglicherweise auftretenden nicht linearen Schwingungen, sprich „die Ferroresonanz“, werden gebildet durch

- die beiden Schwingkreise Unterstation UW1 mit L_{UW1} und Unterstation UW2 mit L_{UW2} ,

- der Erdkapazität C_e und
- dem erregendem Spannungssystem L1, L2, L3 mit den entsprechenden Kopplungskapazität $C_{k,L1}$, $C_{k,L2}$ und $C_{k,L3}$.

Die Höhe der erregenden Spannung wird im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Koppelkapazitäten und die Höhe der Spannungen L1, L2 und L3 bestimmt. Das Verständnis, welchen Einfluss die verschiedenen Kopplungskapazitäten und die erregenden Spannungen auf die Ferroresonanzschwingungen haben, folgt aus Bild 2 mit den Freileitungsanordnungen der Leiter L1, L2, L3 und L1', L2', L3' gemäß dem zugehörigen Mastbild.

In dem beschriebenen Netzsystem von Bild 1 u. 2 von RWE Transportnetz kam es zu Ferroresonanzschwingungen, die zu einer Zerstörung von zwei Spannungswandlern $T_{2,UW1}$ (L1') und $T_{2,UW1}$ (L2') in Unterstation UW1 führte.

Der Störungsablauf

Der zeitliche Ablauf der Störung ist aus der Störschreiber-Aufzeichnung in Bild 3 ersichtlich. Für Prüfarbeiten im Netz wurde um 11.12 Uhr die 110-kV-Leitung Nr. 3 zuerst in der Unterstation UW1 und anschließend in der Unterstation UW2 mit den Leistungsschaltern $Q_{1,UW1}$ und $Q_{3,UW2}$ abgeschaltet. Die beiden Leitungstrenner $Q_{2,UW1}$ und $Q_{4,UW2}$ blieben eingeschaltet. Nach Beendigung der Prüfarbeiten wurde das 110-kV-Leitungssystem

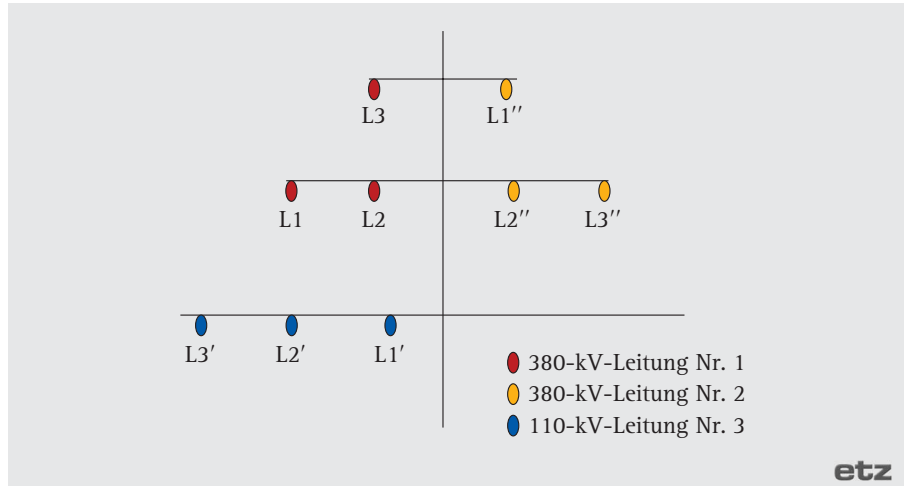


Bild 2. Anordnung der drei Freileitungssysteme im Mastbild zwischen Unterstation UW1 und UW2 auf der gemeinsamen Trasse

Nr. 3 (L1', L2', L3') mit dem Leistungsschalter $Q_{1,UW1}$ um 11.21 Uhr in Unterstation UW1 eingeschaltet.

Der Leistungsschalter $Q_{3,UW2}$ in Unterstation UW2 war noch ausgeschaltet. Nach dem Zuschalten in Unterstation UW1 wurden die Wandler $T_{2,UW1}$ in den Leitern L1' und L2' in Unterstation UW1 nach ca. 5 s zerstört und der Wandler in Leiter L3' beschädigt.

Nach Auswerten der durchgeführten Öl-Gasanalysen der Wandler $T_{4,UW2}$ in der Unterstation UW2 musste dieser Wandlersatz ersetzt werden.

In Bild 3 ist zunächst die eingekoppelte Spannung (1) zu erkennen. etwa 5 s nach Wiedereinschaltung (2) geht die aufgezeichnete Netzspannung L2' auf Null und die Spannung in Leiter L1' steigt auf den verketteten Wert und fällt auf Null. Bei der Zerstörung der beiden induktiven Spannungswandler $T_{2,UW1}$ (L2') und $T_{2,UW1}$ (L1') wird ein transienter Vorgang (4) und (5) registriert.

Zusammenfassung des Zerstörungshergangs

Zum Zeitpunkt 1 (vgl. Bild 3) findet sich folgende Situation: Die Leitung zwischen den Unterstationen UW1 und UW2 ist mit den Leistungsschaltern $Q_{1,UW1}$ und $Q_{3,UW2}$ abgeschaltet, aber mit den Leitungstrennern $Q_{2,UW1}$ und $Q_{4,UW2}$ mit den Unterstationen UW1 und UW2 verbunden. Zum Zeitpunkt 2 liegt die eingekoppelte 50-Hz-Wechselspannung an den Leitern L1', L2', L3'. Im Leiter L3' ist die eingekoppelte Spannung am kleinsten. Zeitpunkt 3 dokumentiert das Wiedereinschalten der Leitung L1', L2', L3' in der Unterstation UW1 nach 9 min mit dem Leistungsschalter $Q_{1,UW1}$. Zeitpunkt 4 zeigt die Zerstörung der Spannungswandler $T_{2,UW1}$ (L1') und $T_{2,UW1}$ (L2') und mechanische Beschädigung des Wandlers $T_{2,UW1}$ (L3') in Unterstation UW1. Die Wandler $T_{4,UW2}$ (L1') und $T_{4,UW2}$ (L2') in Unterstation UW2 wurden vorbeschädigt. Der Wandler $T_{4,UW2}$ (L3') wurde nicht beschädigt.

Die Störungsursache

Nach der Abschaltung der 110-kV-Leitung Nr. 3 mit dem Leistungsschalter $Q_{1,UW1}$ in der Unterstation UW1 – der Leistungsschalter $Q_{3,UW2}$ in Unterstation UW2 war ausgeschaltet – kam es zum

Dr. sc. techn. Reinhold Bräunlich ist seit 17 Jahren bei der Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) tätig, bei welcher er seit 2000 die Geschäftsleitung besorgt. Er ist Mitglied verschiedener Fachgremien und vertritt die Schweiz im Cigré-Studienkomitee C4 „Power Systems Performance“. E-Mail: braenlich@fkh.ch

Dr.-Ing. Holger Däumling studierte Elektrotechnik an der TU München und wurde an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg promoviert. Seit 1987 ist er bei der Firma Ritz Messwandler im Bereich Entwicklung, Qualitätsmanagement und Prüffelder tätig und ist seit 2007 einer der Geschäftsführer bei der Ritz Instrument Transformers in Hamburg. Er ist Mitglied in verschiedenen Arbeitsgruppen der IEC. E-Mail: holger.daeumling@ritz-international.de

Dipl. El.-Ing. Martin Hofstetter arbeitet seit 2002 beim Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ) in der Abteilung Projektierung und Bau Unterwerke als Gesamtprojektleiter.

Dr. rer. nat. Udo Prucker studierte Physik an der Universität Erlangen-Nürnberg, wo er auch promoviert wurde. Seit 1999 ist er in der Hochspannungstechnik tätig. Als Leiter Product Support und F+E der Trench-Germany GmbH beschäftigt er sich u. a. mit dem Thema Ferroresonanzen und deren Simulation. E-Mail: udo.prucker@trench-group.com

Dr.-Ing. Joachim Schmid ist seit 1991 in verschiedenen Positionen in der Entwicklung bei Trench (früher Haefely) tätig. Seit 2003 leitet er die in Basel/Schweiz ansässige Technologiegruppe, welche für technologische Fragen der weltweiten Trenchgruppe zuständig ist. Er ist Mitglied in verschiedenen Arbeitsgruppen der IEC und der Cigré. E-Mail: joachim.schmid@trench-group.com

Dipl.-Ing. Hans-Werner Schlierf ist seit 1975 beim RWE Transportnetz Strom GmbH in der Abteilung für Hochspannungsbetriebsmittel tätig. Sein Aufgabengebiet umfasst im Speziellen die Hochspannungsmesswandler. Seit 2002 ist er auch in Arbeitskreisen bei DKE tätig. E-Mail: hans-werner.schlierf@rwe.com

Dr.-Ing. Ruthard Minkner war von 1957 bis 1971 Entwicklungsingenieur im Gebiet Hochspannungstechnik und von 1972 bis 1988 Direktor für Hochspannungskomponenten bei der Emil Haefely AG. Von 1999 bis heute ist er Berater bei der Haefely AG und der Trench AG und bis 2001 Dozent an der Hochschule für Technik und Informatik in Burgdorf/Schweiz. Er ist seit 1974 Vorsitzender der Technischen Kommission TK 38 für Messwandler in der Schweiz, Vorsitzender mehrerer IEC-Arbeitsgruppen und Vorsitzender der AG1 der TK38-CH Ferroresonanzen. 1999 war er Gastprofessor an der „Washington State University in Pullman“, Wash./USA. E-Mail: minkner.ruthard@trench-ts.com

Zeitpunkt 11.12 Uhr über den Zeitraum von ca. 9 min (Bild 3, erster Abschnitt) zu Ferroresonanzschwingungen in den Systemen induktiver Spannungswandler $T_{2,UW1}$ mit der Induktivität L_{UW1} , induktiver Spannungswandler $T_{4,UW2}$ mit der Induktivität L_{UW2} , Erdkapazität C_e und dem erregenden Spannungs- und Koppelkapazitätensystem, da die Leitungs-Trenner $Q_{2,UW1}$ und $Q_{4,UW2}$ geschlossen waren und die beiden Leistungsschalter $Q_{1,UW1}$ und $Q_{3,UW2}$ geöffnet waren (Bild 1). Durch diese Schaltkonfiguration, in Bild 1 als Ersatzschaltbild dargestellt, konnten sich unbemerkt stationäre einphasige Ferroresonanzschwingungen in den zwei Leitern $L1'$ und $L2'$ entwickeln. Beim Leiter $L3'$ reichte die Spannung für eine Anregung einer Ferroresonanzschwingung

kums der Messwandler und die Eisenverluste der Spannungswandler gegeben.

Anmerkung 1: Da es sich um ein Differenzialgleichungssystem mit mehreren konzentrierten Elementen, Kapazitäten C und nicht linearen Induktivitäten L_{UW1} und L_{UW2} handelt, sind auch stationäre und nicht stationäre Schwingungen von mehreren Frequenzen möglich. Anmerkung 2: Die Kapazitäten $C_{k,L1'}$ für Leiter $L1'$, $C_{k,L2'}$ für Leiter $L2'$ und $C_{k,L3'}$ für Leiter $L3'$ haben unterschiedliche Werte durch die unsymmetrische Anordnung der Leitung auf dem Freileitungsmast (Bild 2).

Die Ursache der Ferroresonanzschwingungen ist die unsymmetrische Anordnung der Stromkreise auf den Masten und damit auch der Koppelkapazitäten

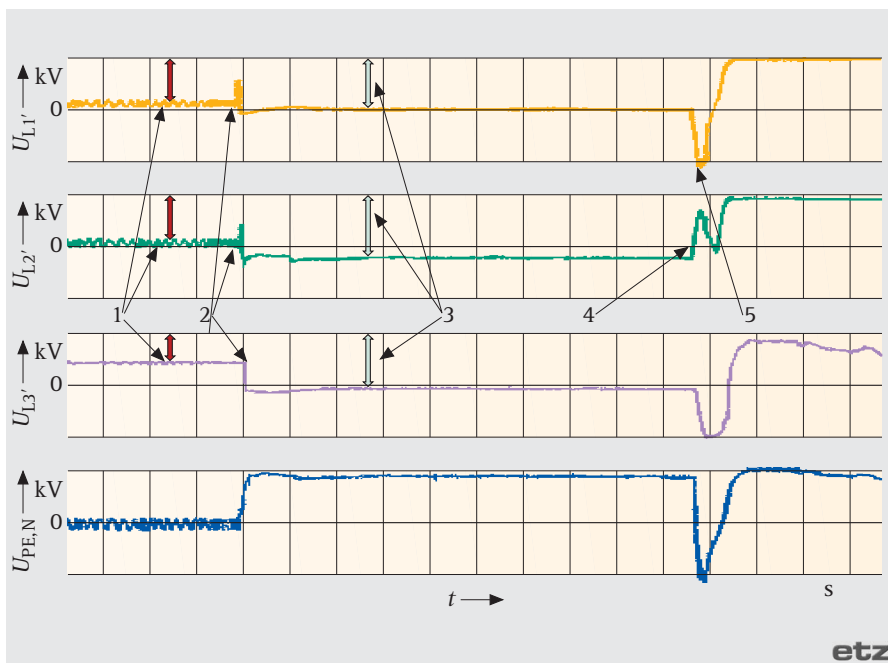


Bild 3. Störschreiberaufzeichnung (Quelle: RWE Transportnetz Strom). 1 In Leitung eingekoppelte Spannungen (Effektivwerte); 2 Einschaltung des Leistungsschalters in Unterstation UW1; 3 Netzspannung nach der Ein-Schaltung (Effektivwerte); 4, 5 Transiente Vorgänge beider Wandler in Leiter $L1'$ und $L2'$

nicht aus. Das Ersatzschaltbild der Ferroresonanzsysteme ist in Bild 4 dargestellt.

Die Induktivitäten L_{UW1} von $T_{2,UW1}$ und L_{UW2} von $T_{4,UW2}$ sind durch die Magnetisierungskurve der Spannungswandlerkerne nicht lineare Glieder der beiden Schwingkreise. Die Erdkapazität C_e enthält die Leitungskapazität von $L1'$, die Spannungs- und Stromwandlerkapazitäten und die Stationskapazitäten von UW1 und UW2 gegen Erde. Die Dämpfungswiderstände R_{UW1} und R_{UW2} sind durch die Oberflächenwiderstände der Isolatoren, die Isolationsverluste des Dielektri-

$C_{k,L1'}$, $C_{k,L2'}$, $C_{k,L3'}$ zwischen den beiden parallelen Freileitungssystemen $L1$, $L2$, $L3$ und $L1'$, $L2'$, $L3'$, die eine eingekoppelte Spannung auf das abgeschaltete System 2 hervorruft.

Die eingekoppelte Energie ist dafür verantwortlich, dass die Schwingkreise des freigeschalteten Stromkreises, ange regert durch die Schaltüberspannung beim Ausschalten des Leistungsschalters $Q_{1,UW1}$ – Leistungsschalter $Q_{3,UW2}$ ist bereits offen – auch nach dem Abschalten weiterhin schwingungsfähig bleiben.

Die Spannungswandler $T_{2,UW1}$ und $T_{4,UW2}$ der Leiter $L1'$ und $L2'$ wurden

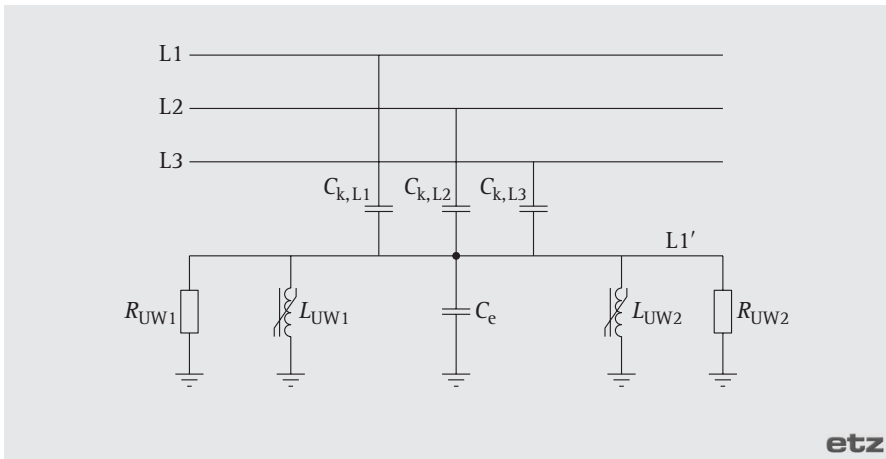


Bild 4. Ersatzschaltbild einer einphasigen Ferroresonanzanordnung mit einer dreiphasigen Erregung durch ein paralleles Netz

durch die hohen fließenden Magnetisierungsströme bei der Ferroresonanzschwingung mit der Frequenz von 10 Hz beschädigt.

Aus dem zeitlichen Ablauf des Vorgangs muss davon ausgegangen werden, dass die eingekoppelte Energie von dem System L1, L2, L3 über die Kopplungskondensatoren $C_{k,L1}$, $C_{k,L2}$, $C_{k,L3}$ nicht ausreicht, die durch die Ferroresonanz vorgeschädigten Wandler dielektrisch zu zerstören. Erst durch Einschalten des Leitungssystems L1', L2', L3' durch den Leistungsschalter $Q_{1,UW1}$ – Leistungsschalter $Q_{3,UW2}$ war geöffnet – erfolgte die Zerstörung der Wandler, die zur Unterstation UW1 gehörten. Induktive Spannungswandler, wie sie in den Unterstationen UW1 und UW2 in Betrieb standen, neigen aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften und den im Netz

vorhandenen Erd- und Koppelkapazitäten zu einphasigen Ferroresonanzschwingungen.

Störfallbehebung und Überprüfung der Maßnahmen

Nach der Störung in den Unterstationen UW1 und UW2 wurden in den betroffenen Feldern induktive Spannungswandler mit abgeänderten, spezifizierten magnetischen Eigenschaften eingesetzt. Da für diese modifizierten Spannungswandler noch keine Betriebserfahrungen bezüglich ihrem Verhalten gegenüber einphasiger Ferroresonanz vorlagen, musste für diese Geräte durch Messung sichergestellt werden, dass im vorliegenden Fall Ferroresonanzschwingungen ausgeschlossen werden können. Die Untersuchung erfolgte in der Unterstation UW1. Es wurden die gleichen Schaltungen

durchgeführt, die vorher zur Störung führten (Schaltungszustände: 1. Leistungsschalter $Q_{1,UW1}$, offen; 2. Leistungsschalter $Q_{3,UW2}$, offen; 3. Leitungstrenner $Q_{2,UW1}$, geschlossen; 4. Leitungstrenner $Q_{4,UW2}$, geschlossen).

Bild 5 zeigt die eingekoppelte 50-Hz-Spannung, die sekundärseitig über 43 V erreichte. Das bedeutet, eine Primärspannung von ca. 47 kV wird aus den parallelen 380-kV-Systemen in den 110-kV-Stromkreis (Leitung Nr. 3) eingekoppelt. Diese Spannung entspricht 80 % der Betriebsspannung.

Die Spannungsamplitude der eingekoppelten Spannung wird durch die Erdkapazitäten der Leitungen und den Koppelkapazitäten mit den zugehörigen Spannungen bestimmt. Die Kurvenverläufe in Bild 5 zeigen folgendes Resultat: Amplitude $L3' < \text{Amplitude } L2' < \text{Amplitude } L1'$. Die Spannungsamplitude $L3'$ reichte nicht aus, um eine Ferroresonanz auszulösen.

Interessant ist auch die Phasenverschiebung zwischen den eingekoppelten Spannungen. Wird Leiter $L3'$ als Nullmarke benutzt, so beträgt die Phasenverschiebung zum Leiter $L2'$ nur $\Delta t = 1,2$ ms, entsprechend $21,6^\circ$. Durch die kreuzenden Koppelkapazitäten wird die Phasendifferenz zwischen $L3'$ und $L2'$ kleiner. Ähnliche Überlegungen gelten auch für die Phasendifferenz zwischen $L1'$ und $L2'$ von 1,5 ms, entsprechend 27° . Eine exakte Berechnung der gemessenen Phasendifferenz zwischen den eingekoppelten Spannungen lässt sich nur durch die kapazitätsbestimmenden Abstände der Freileitungen untereinander und gegen Erde geben.

L1', L2', L3' nach Ausschalten des Leistungsschalters UW1 und bei offenem Leistungsschalter UW2

Bild 6 zeigt die gemessenen Sekundärspannungen an den induktiven Spannungswandlern, die sich nach dem der Leistungsschalter $Q_{1,UW1}$ in der Unterstation UW1 ausgeschaltet wurde, ergeben. Der Leitungstrenner $Q_{2,UW1}$ war geschlossen, in der Unterstation UW2 war der Leistungsschalter $Q_{3,UW2}$ ausgeschaltet und der Leitungstrenner $Q_{4,UW2}$ eingeschaltet.

Es zeigt sich, dass die Spannung des Leiters $L1'$ anfänglich schwingt. Aus dem Kurvenverlauf folgt, dass die Ferroresonanzschwingungen schwach durch die Dämpfungswiderstände R_{UW1} und R_{UW2} gedämpft sind und sich nach einigen Sekunden die eingekoppelte 50-Hz-Schwingung einstellt. Es traten jedoch keine

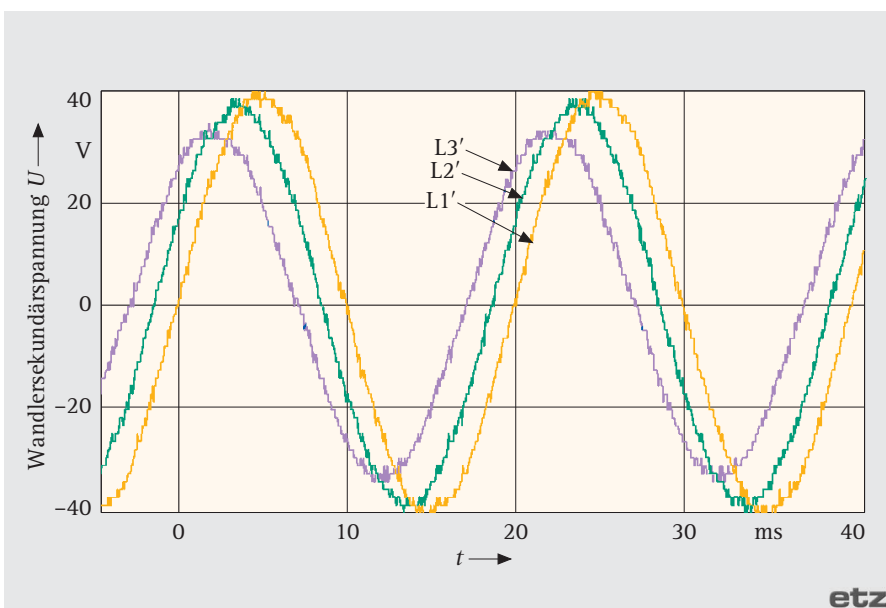


Bild 5. Einkoppelte Spannungen aus den 380-kV-Stromkreisen

stationären Ferroresonanzschwingungen auf. Das unterschiedliche Abklingverhalten der einzelnen Leiter ist durch die ungleichen Erregungen und Dämpfungen gegeben.

Die Frequenzanalyse

Eine Frequenzanalyse der Spannung des Leiters L1' zeigt, dass die subharmonischen Anteile im Bereich von 10 Hz mit erheblichen Spannungen von ca. 35 V vorhanden sind. Diese niederfrequenten Spannungsanteile sind energiereich und überlasten thermisch den Wandler.

Ausblick

Aufgrund der durchgeführten Messungen ist festzustellen, dass die vorher im

Literatur

- [1] IEC 60044-2:2003-02 Instrument transformers – Part 2: Inductive voltage transformers. Genf/Schweiz: Bureau de la Commission Electrotechnique Internationale (ISBN 2-8318-6837-8)
- [2] DIN EN 60044-2 (VDE 0414-44-2):2003-12 Messwandler – Teil 2: Induktive Spannungswandler. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [3] IEC 60044-3:2002-12 Instrument transformers – Part 3: Combined transformers. Genf/Schweiz: Bureau de la Commission Electrotechnique Internationale (ISBN 2-8318-6762-2)
- [4] DIN EN 60044-3 (VDE 0414-44-3):2003-12 Messwandler – Teil 3: Kombinierte Wandler. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [5] etz Elektrotechnik + Automation. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG (ISSN 0948-7387)
- [6] Bulletin SEV/VSE. Fehraltorf/Schweiz: Elektrosuisse (ISSN 0375-8605)
- [7] RWE Transportnetz Strom GmbH, Dortmund: www.rwetransportnetzstrom.com

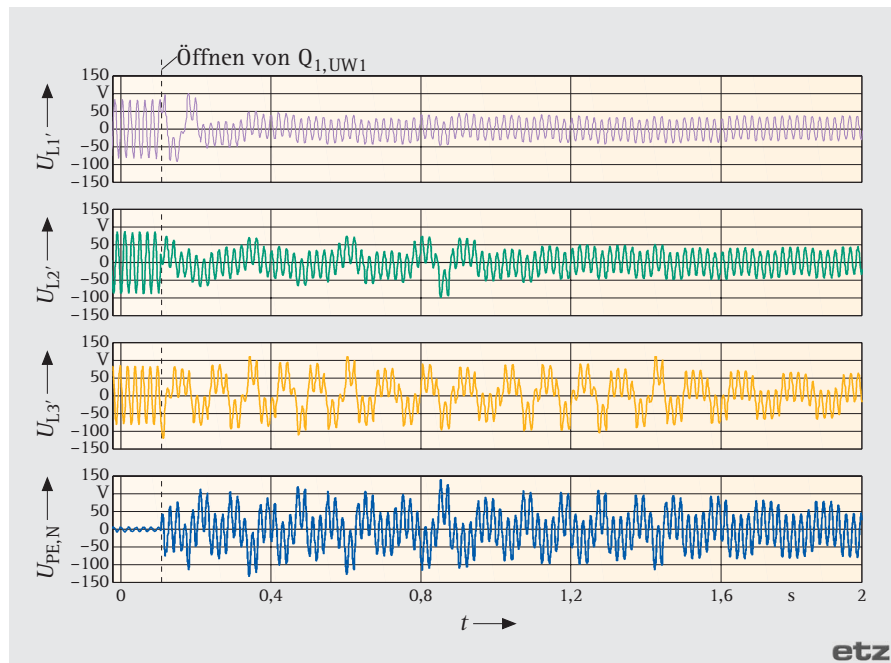


Bild 6. Spannungsverlauf im Leitungsabschnitt L1', L2', L3' nach Ausschalten von Q_{1,UW1}

Feld eingesetzten induktiven Spannungswandler durch ihre gegebene magnetische Auslegung thermisch durch die hohen niederfrequenten Ferroresonanzschwingungen erheblich überlastet wurden.

Die nach der Störung eingesetzten Spannungswandler mit neu spezifizierter magnetischer Charakteristik erfüllten nur teilweise die Anforderungen, da weiterhin langsam abklingende Ferroresonanzschwingungen erregt werden können. Eine Gegenüberstellung der Kurvenverläufe in Bild 5 u. 6 zeigt, dass der Leiter L1' mit der stärksten Anregung die längste Abklingzeit der Ferroresonanzschwingung aufweist und Leiter L3' mit der geringsten Anregung am schnellsten aus-schwingt.

- [8] Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz), Zürich/Schweiz: www.stadt-zuerich.ch/internet/ewz
- [9] Ritz Instrument Transformers, Hamburg: www.ritz-international.de
- [10] Trench Germany GmbH, Bamberg: www.trench.de
- [11] Trench Switzerland AG, Basel/Schweiz: www.trench-group.com
- [12] Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH), Zürich/Schweiz: www.fkh.ch
- [13] Bräunlich, R.; Däumling, H.; Hofstetter, M.; Prucker, U.; Schmid, J.; Schlierf, H.-W.; Minkner, R.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen – Teil 1: Definitionen und allgemeine Erklärungen. Bulletin SEV/VSE 97 (2006), H. 23, S. 17–22 (ISSN 0375-8605)
- [14] Bräunlich, R.; Däumling, H.; Hofstetter, M.; Prucker, U.; Schmid, J.; Schlierf, H.-W.; Minkner, R.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen – Teil 2: Fallbeispiele. Bulletin SEV/VSE 97 (2006) H. 24/25 06, S. 27–30 (ISSN 0375-8605)