Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen : Teil 2 : Fallbeispiele

Autor(en): **Bräunlich, R. / Däumling, H. / Hofstetter, M.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **97 (2006)**

Heft 24-25

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857755

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen

Teil 2: Fallbeispiele[1)]

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. Im ersten Teil [1] dieses Beitrags wurde das unerwünschte Phänomen der einphasigen und der dreiphasigen Ferroresonanz in Hoch- und Mittelspannungsanlagen beschrieben. Der nun vorliegende zweite Teil gibt mit drei typischen Fallbeispielen einen Überblick über die aus der Praxis gut bekannten Ferroresonanzsituationen.

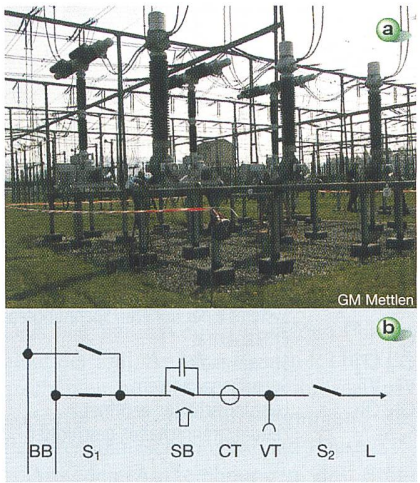


Bild 1 Schaltfelder in der 245-kV-Schaltanlage

Bild 1a: die 245-kV-Schaltanlage des Unterwerks Mettlen; Bild 1b: Schaltbild der beschriebenen Schaltkonfiguration, in welcher einphasige Ferroresonanzen vorkommen

BB	Sammelschiene
S_1	Sammelschienentrennschalter, geschlossen
SB	Leistungsschalter, auslösendes Ereignis ist das Öffnen des Schalters
CT	Stromwandler
VT	Spannungswandler
S_2	Leitungstrennschalter, geöffnet
L	Abgehende Leitung

Der erste Teil dieses Beitrags, der im Bulletin SEV/VSE Nr. 23/2006 publiziert wurde, beschäftigte sich mit Definitionen und den allgemeinen Beschreibungen des Phänomens Ferroresonanz in Zusammenhang mit induktiven Spannungswandlern. Diese Erklärungen zu den Grundlagen werden nun im zweiten Teil mit zwei Fallbeispielen von einphasiger Ferroresonanz im Hochspannungsnetz und einem Fallbeispiel für dreiphasige Ferroresonanz in einer Mittelspannungsschaltanlage ergänzt.

R. Bräunlich, H. Däumling, M. Hofstetter, U. Prucker, J. Schmid, H. W. Schlierf, R. Minkner

Einphasige Ferroresonanz

Leitungsfeld in einer 245-kV-Freiluftschaltanlage

Dieses erste Beispiel zeigt eine häufig auftretende Situation in Freiluftleitungsfeldern, bei welcher es in der Praxis bei Testschaltungen und Inbetriebsetzungen – jedoch nicht im Normalbetrieb – zu einphasigen Ferroresonanzen kommen kann (Bild 1). In Abhängigkeit der Magnetisierungskennlinie des Spannungswandlers und der wirksamen Kapazitäten im Leitungsfeld (Steuerkapazität des Leistungsschalters und Erdkapazität) kann es beim Öffnen des Leistungsschalters zu Ferroresonanzschwingungen kommen, wenn der Leitungstrennschalter bereits offen ist und damit nur noch eine kleine Erdkapazität vorhanden ist (Bild 1b). In diesem Fall ist der Spannungswandler nur

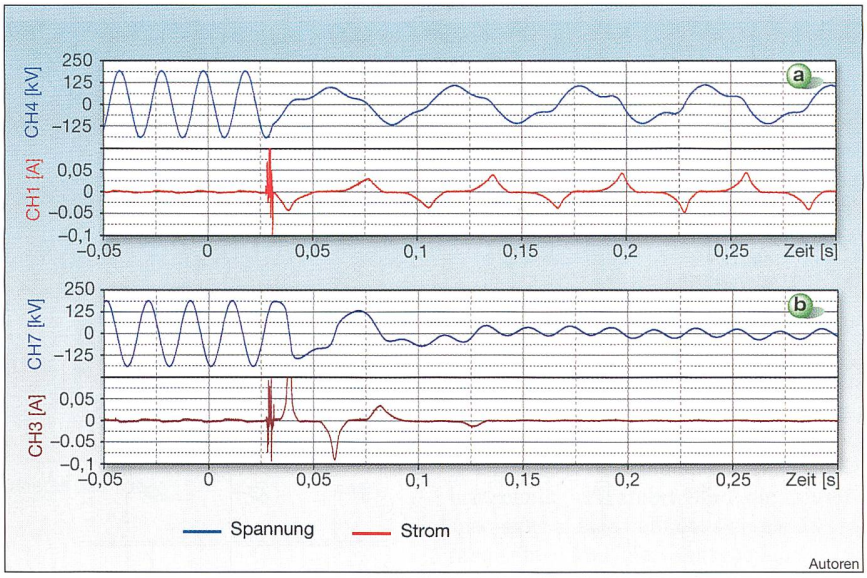


Bild 2 Beispiele von Oszillogrammen einphasiger Ferroresonanz beim Ausschalten des Leistungsschalters in Bild 1b (Ausschaltzeitpunkt: 0,03 s)

Bild 2a: Stationäre Ferroresonanzschwingung, Frequenz 16⅔ Hz; Bild 2b: Nicht stationär abklingende Ferroresonanzschwingung.

Die obere Kurve (blau) zeigt die Spannung an der Spannungswandlersekundärwicklung, die untere Kurve (rot) den Strom in der Spannungswandlerprimärwicklung.

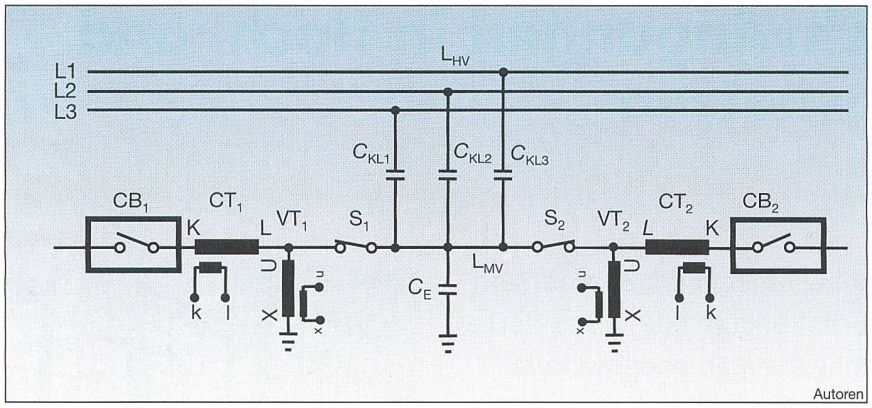


Bild 3 Ersatzschaltbild einer zur einphasigen Ferroresonanz neigenden Netzsituation, bei welcher die Schwingungen über die kapazitive Kopplung von Freileitungssystemen angeregt und aufrechterhalten werden können

L_{MV}	Betroffene Phase der Freileitung
L_{HV}	Freileitungssystem einer höheren Spannungsebene
C_{KL1}, C_{KL2}, C_{KL3}	Kopplungskapazitäten zwischen der betrachteten Phase und den Phasen des benachbarten Systems einer höheren Spannungsebene
C_E	Erdkapazität
CT_1, CT_2	Stromwandler
VT_1, VT_2	Spannungswandler
CB_1, CB_2	Leistungsschalter, geöffnet
S_1, S_2	Leitungstrennschalter, geschlossen

über die Steuerkapazität des Leistungsschalters mit der Betriebsspannung der Sammelschiene verbunden und bildet einen Ferroresonanzkreis.

Bild 2 zeigt für den vorliegenden Fall Oszillogramme der gemessenen Spannungswandler-Sekundärspannungen und der Ströme durch die Wandlerhochspannungswicklung einer Phase nach Öffnen des Leistungsschalters. Im ersten Fall (Bild 2a) tritt eine stationäre Ferroresonanzschwingung auf. Im zweiten Fall (Bild 2b) klingt die Ferroresonanzschwingung ab.

Für die Frage, ob eine stationäre Schwingung auftritt oder nicht, sind meist nicht nur die Kreisparameter (Magnetisierungskennlinie des Spannungswandlers, Kapazitäten usw.) allein entscheidend, sondern auch der Zeitpunkt der Ausschaltung innerhalb einer Periode der Netzfrequenz.

Ferroresonanzschwingung auf einer 60-kV-Leitung

Ein weiterer hier wiedergegebener Ferroresonanzfall entspricht der in Bild 3 dargestellten Situation der Kopplung über parallel geführte Freileitungen. Im 60-kV-Netz des EWZ traten Ferroresonanzschwingungen an einer ausgeschalteten Freileitungsphase auf, an welcher beidseitig Spannungswandler angeschlossen waren.

Das Unterwerk 3 (UW 3 in Bild 4, 1-phasiges Übersichtsschema) ist über die Dreiphasenleitung Nr. 12 (Stichleitung) via Unterwerk 2 (UW 2) und der Dreiphasenleitung Nr. 5 mit dem Unterwerk 1 (UW 1) verbunden. Diese Stichleitung war zu diesem Zeitpunkt nur über den eingezeichneten Transformator im UW 3 mit dem Verbundnetz gekoppelt.

Die Mastbelegung der betroffenen Leitung Nr. 5 zwischen dem UW 1 und dem UW 2 ist in Bild 5 dargestellt.

Die Leitung Nr. 12 wurde ordnungsgemäss wegen Wartungsarbeiten in den UW 2 und 3 ausgeschaltet und geerdet. Dadurch war der Transformator im UW 3 unbelastet. Er wurde für dringende Arbeiten über das Transformatorfeld ebenfalls ausgeschaltet.

Die nun an beiden Enden eingeschaltete, jedoch leer laufende Leitung Nr. 5 begann in diesem Zustand auf der Phase L1 mit einer Frequenz von 16⅔ Hz zu

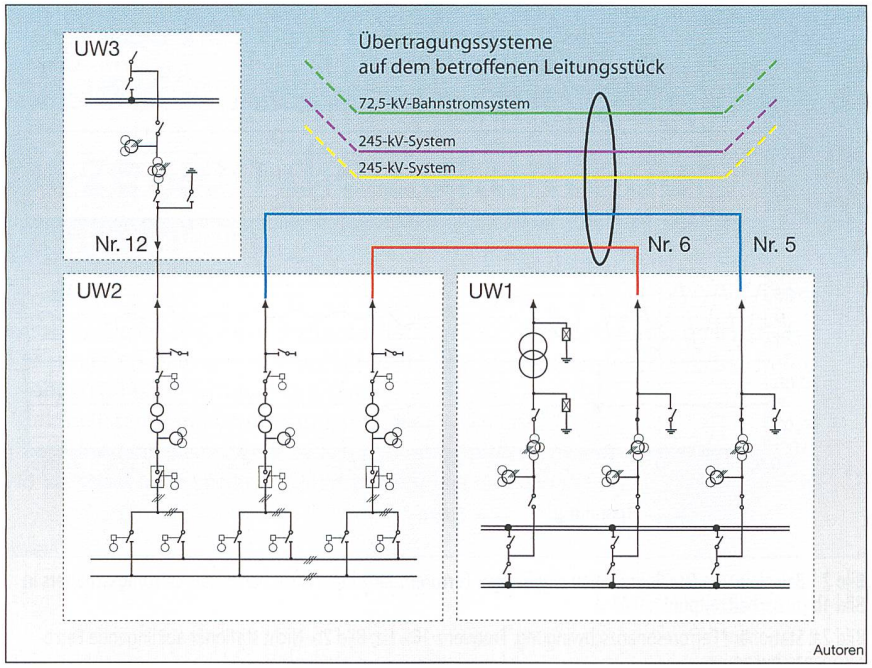


Bild 4 Einphasiges Schema der Netzsituation auf der Spannungsebene 60 kV im Bereich der Unterwerke UW 1, UW 2 und UW 3

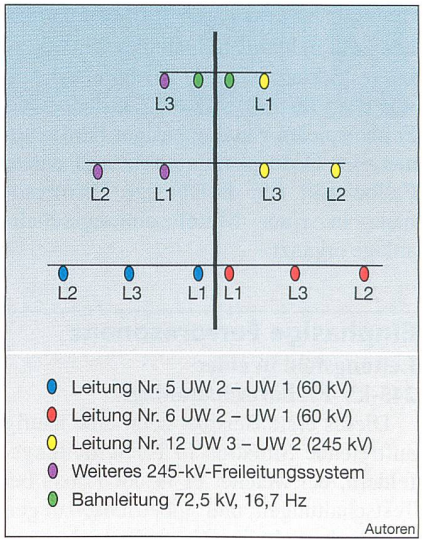


Bild 5 Mastbild auf der von den Freileitungen zwischen UW 1 und 2 gemeinsam benutzten Strecke

Die 60-kV-Leitungen Nr. 5 und Nr. 6 befinden sich auf dem abgebildeten Mastbild parallel zu zwei 245-kV-Leitungen und einem 72,5-kV-Bahnstromsystem (16,7 Hz), welches im vorliegenden Fall kaum eine Rolle spielen dürfte

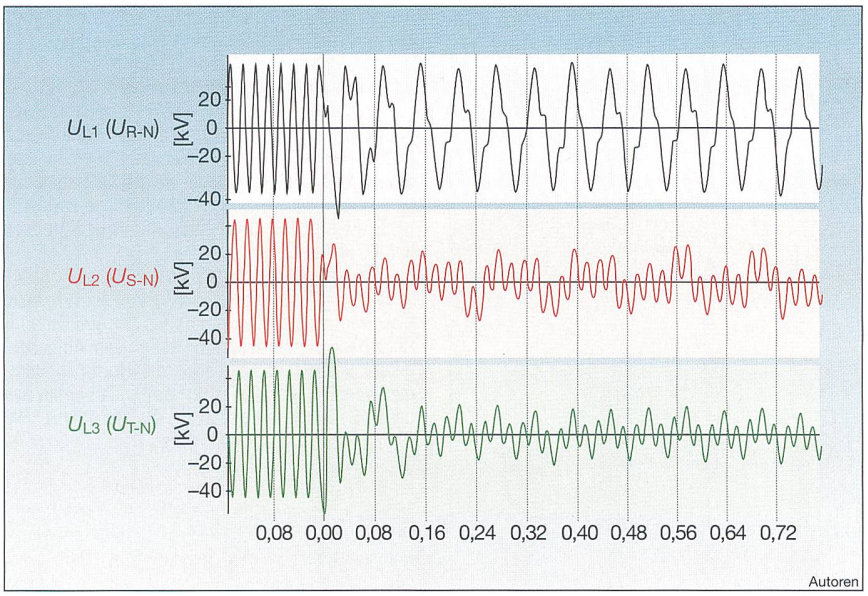


Bild 6 Im Unterwerk 2 aufgezeichnete Ferroresonanzschwingungen an der Leitung Nr. 5

Die Spannung an der Phase L1 zeigt eine deutliche Ferroresonanzschwingung bei einer Frequenz von 16⅔ Hz. Die Spannungen der Phasen L2 und L3 zeigen kapazitive Einkopplungen mit 50 Hz und mit subharmonischen Frequenzen.

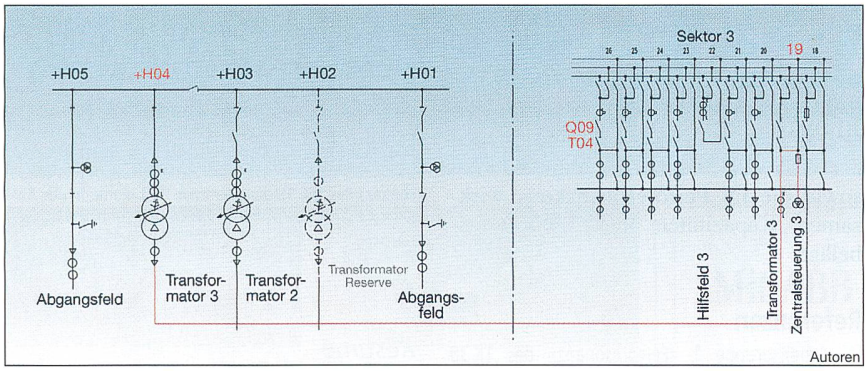


Bild 7 Einphasiges Schema der 170-kV-Schaltanlage (links) und der 12-kV-Schaltanlage (rechts)

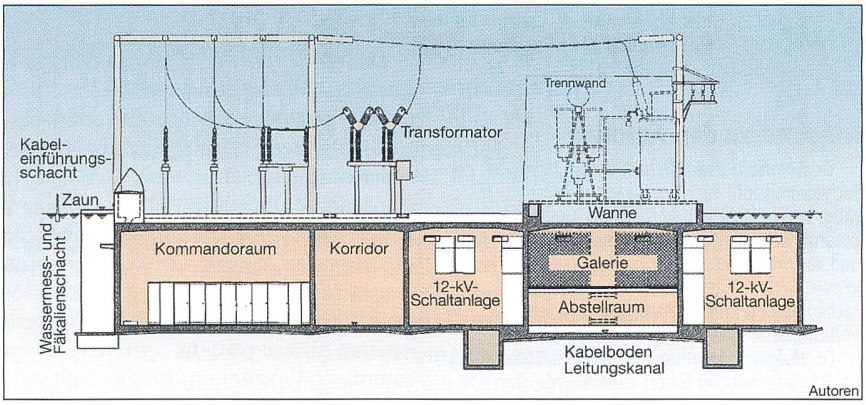


Bild 8 Aufriss des Unterwerks mit Schnitt durch das unterirdische Gebäude

schwingen. Leitung Nr. 6 blieb in Betrieb und war deshalb nicht von den Ferroresonanzschwingungen betroffen. Bild 6 zeigt ein entsprechendes Oszillogramm der drei Phasen von Leitung Nr. 5. Auf allen drei Phasen sind die 50-Hz-Einkopplungen vom darüberliegenden 245-kV-System zu erkennen. Bei der Phase L1 lagen offenbar Kopplungs- und Erdkapazitäten vor, welche zusammen mit der magnetischen Charakteristik der Spannungswandler die Bedingungen für Ferroresonanzschwingungen erfüllten. Dies war bei den anderen beiden Phasen nicht der Fall. Auf den Phasen L2 und L3 erscheinen mit kleiner Amplitude eingekoppelte 16⅔-Hz-Schwingungen der Ferroresonanzschwingung auf Phase L1.

Aus den Aufzeichnungen des Störschreibers wurde das Vorliegen von Ferroresonanzschwingungen auf der Leitung Nr. 5 zwischen UW 1 und 2 festgestellt. Die Leitung wurde unverzüglich geerdet, sodass ein Schaden an den Spannungswandlern und an den Bürden vermieden werden konnte.

Über einen ähnlich gelagerten Ferroresonanzfall infolge kapazitiver Kopplung auf eine ausgeschaltete Freileitung, der 1993 an einer Grenzleitung Deutschland–Schweiz zu erheblichen Folgeschäden führte, wurde in [2] berichtet.

Weitere Arbeiten zum Thema Ferroresonanz

In der Arbeitsgruppe 1[1)] des TK 38 werden die kritischen Parameter, welche über das Auftreten von Ferroresonanz entscheiden, diskutiert. Darüber soll zu späteren Zeitpunkten im Bulletin SEV/VSE berichtet werden. Vorgesehen sind aber auch Publikationen im Bulletin SEV/VSE über die Möglichkeit zur mathematischen Simulation der nicht linearen Ferroresonanzschwingungen und über Abhilfemöglichkeiten bei Ferroresonanzproblemen.

Dreiphasige Ferroresonanzschwingungen

Im Jahre 1996 ereignete sich in einem Unterwerk ein Schadenfall, welcher durch eine dreiphasige Ferroresonanzschwingung ausgelöst wurde. Dieser Fall soll im Folgenden näher beschrieben werden.

Im betrachteten Unterwerk findet eine Transformation von der Ebene des Hochspannungsnetzes (Betriebsspannung 170 kV) auf die Verteilspannungsebenen (12 kV und 24 kV) des Mittelspannungsnetzes statt (Bilder 7 und 8).

Die 170-kV-Schaltanlage ist in Freilufttechnik ausgeführt, und die Mittelspannungsanlage befindet sich als Innenraumanlage im Unterwerksgebäude.

Im 12-kV-Transformatorfeld +M19 (Einspeisung von Transformator 3) wurde ein Störschreiber in Betrieb genommen. Zur Inbetriebnahme des Schreibers wurde das 170-kV-Transformatorfeld +H04 eingeschaltet, welches den Sektor 3 über das

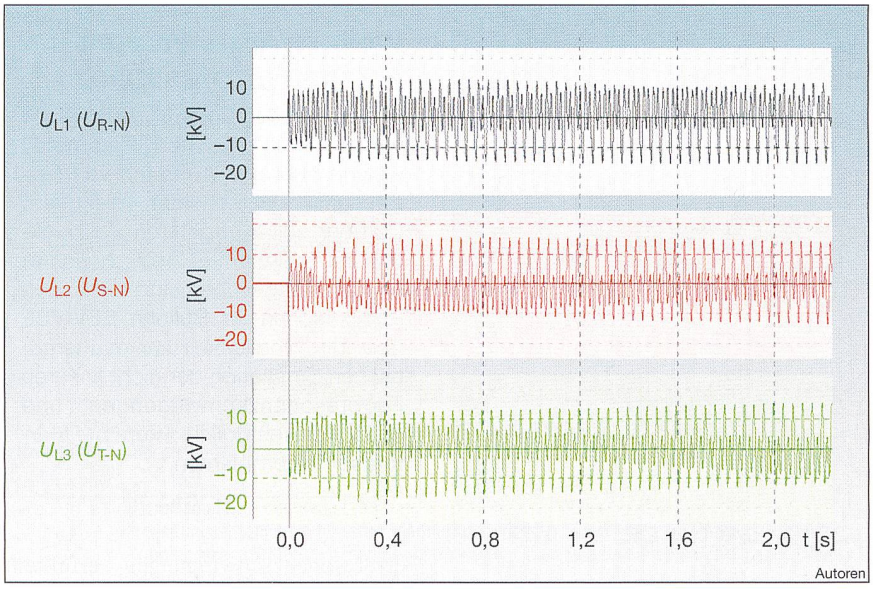


Bild 9 Oszillogramme der drei Phasenspannungen am Spannungswandler T04 (Bild 7)

Die Grundfrequenz der Ferroresonanzschwingung liegt nahe an der zweiten Netzsubharmonischen von 25 Hz, welche mit 50-Hz-Einkopplungen überlagert wird. Die Abweichung der Ferroresonanzschwingung von 25 Hz (zweite Subharmonische von 50 Hz) führt zu einer Schwebungserscheinung mit dieser Frequenzdifferenz (siehe hierzu Teil 1 [1], Abschnitt «Dreiphasige Ferroresonanzschwingungen»).

Transformatorfeld +M19 speist. Der Leistungsschalter Q09 im Feld +M19 blieb ausgeschaltet, und der Spannungswandler T04 zeichnete über den Störschreiber die in Bild 9 dargestellten Schwingungsformen auf, die als Ferroresonanzerscheinung identifiziert wurden.

Durch den Ferroresonanzvorgang wurden die Spannungswandler aufgrund der erhöhten Ströme in den Primärwicklungen thermisch überlastet. Die beschädigten Wandler wurden ersetzt. Zur Vermeidung zukünftiger dreiphasiger Ferroresonanzschwingungen wurde zur Dämpfung des schwingfähigen Systems in die im Dreieck zusammengeschalteten Erdschlusswicklungen eine Dämpfungsimpedanz eingefügt.

Schlussfolgerungen

Die besprochenen Fälle machen deutlich, dass die Ursachen für Ferroresonanz sehr unterschiedlich sein können und dass deshalb die Anfälligkeit einer Schaltkonfiguration für solche nicht linearen Schwingungen in der Praxis nicht immer im Voraus erkannt wird. Das Feststellen einer ferroresonanzgefährdeten Netzsituation erfordert in der Regel eine detaillierte Analyse der möglicherweise betroffenen Netz- oder Anlagenteile. Eine besondere Schwierigkeit bei der Beurteilung einer Ferroresonanzsituation ist die Tatsache, dass nicht nur die Netz- und Schaltkonfiguration, sondern auch die Grössenordnung der Anlagenparameter ausschlaggebend für das Auftreten von Ferroresonanzen sind. Die entscheidenden Grössen sind dabei die Magnetisierungskennlinie der Wandler-Hauptinduktivität sowie die im Ferroresonanzkreis wirksamen Kapazitäten und Dämpfungsbeläge.

Referenzen

[1] Arbeitsgruppe 1 «Ferroresonanz» des TK 38 «Messwandler»: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen Teil 1: Definitionen und allgemeine Erklärungen. Bulletin SEV/VSE, Ausgabe 23/2006.

[2] G. Köppl, S. Läderach, E. Lüke, A. Umlauf: Ferroresonanz – ein weiterhin aktuelles Problem. Bulletin SEV/VSE, Ausgabe 19/1995, S. 19–23.

Angaben zu den Autoren

Dr. **Reinhold Bräunlich** ist seit 16 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».
Fachkommission für Hochspannungsfragen, Voltastrasse 9, 8044 Zürich, braeunlich@fkh.ch

Dr. **Holger Däumling** ist Leiter der Entwicklung bei Ritz Messwandler GmbH in Hamburg.
holger.daeumling@ritz-international.de

Dipl.-Ing. **Martin Hofstetter** arbeitet seit 2002 beim Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ) in der Abteilung Projektierung und Bau Unterwerke als Gesamtprojektleiter.
martin.hofstetter@ewz.stzh.ch

Dr. **Udo Prucker** studierte und promovierte in Physik an der Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 1999 ist er in der Hochspannungstechnik tätig. Als Leiter Product Support und F+E der Trench-Germany GmbH beschäftigt er sich unter anderem intensiv mit dem Thema Ferroresonanzen, insbesondere mit deren Simulation. Die Trench-Germany GmbH stellt SF6-isolierte Hochspannungsmesswandler her.
Trench-Germany GmbH, D-96050 Bamberg, udo.prucker@trench-group.com

Dr. **Joachim Schmid** ist seit 1991 in verschiedenen Positionen in der Entwicklung bei der Firma Trench (früher Haefely) tätig. Seit 2003 leitet er die in Basel ansässige Technologiegruppe, welche für technologische Fragen der weltweiten Trenchgruppe zuständig ist. Er ist Mitglied in verschiedenen Arbeitsgruppen der IEC und des Cigré.
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 (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik) tätig.
hans-werner.schlierf@rwe.com

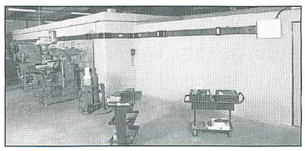
Dr.-Ing. **Ruthard Minkner** war von 1957 bis 1971 Entwicklungsingenieur im Gebiet Hochspannungstechnik und von 1972 bis 1988 Direktor für Hochspannungskomponenten bei der Emil Haefely AG. Von 1999 bis heute ist er Berater bei der Haefely AG und der Trench AG und bis 2001 Dozent an der Hochschule für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

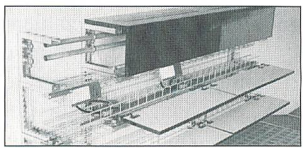
[1] Das Technische Komitee 38 (TK 38, Messwandler) des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES) setzt sich seit dem Jahr 2003 mit dem Thema Ferroresonanz auseinander. Der vorliegende Beitrag stellt den zweiten Teil eines Berichts Arbeitsgruppe 1 (Ferroresonanz) des TK 38 dar. Der erste Teil wurde in der Ausgabe 23/2006 des Bulletins SEV/VSE publiziert.

Résumé

Oscillations de résonance ferromagnétique dans les réseaux haute et moyenne tension

Deuxième partie: Exemples de cas. Les résonances ferromagnétiques se produisent généralement dans une petite partie d'un poste de couplage ou d'un réseau, séparée du reste du réseau. Cette partie d'installation englobe un ou plusieurs convertisseurs de tension, capacités de couplage ou de terre qui constituent un circuit oscillant. Du fait du couplage capacitif avec la tension du réseau, on peut assister, si le noyau du convertisseur est saturé, à l'excitation d'une multitude d'oscillations complexes non linéaires. La première partie [1] de l'article a décrit le phénomène indésirable de la résonance ferromagnétique monophasée et triphasée dans les installations à haute et moyenne tension. Cette seconde partie donne, sous la forme de trois exemples typiques, un aperçu des situations de résonance ferromagnétique bien connues dans la pratique.





Welche LANZ-Produkte für Neubauten und Nachinstallationen?

Zur Verbindung Trafo-Hauptverteilung:
→ **LANZ HE-Stromschienen** 400 A – 6000 A 1000 V

Zum el. Anschluss der Maschinen und Anlagen:
→ **LANZ EAE-Stromschienen** 25 A – 4000 A 600 V

Zur Führung der Strom- und Datenkabel:
→ **LANZ G-Kanäle, Gitterbahnen, LANZ Multibahnen, LANZ Weitspann-Mb 6 m lang. Steigleitungen.**

Zur Zuführung von Strom-, Daten- und Telefonleitungen zu den Arbeitsplätzen in Büro und Betrieb:
→ **Brüstungskanäle, Brüstungskanal-Stromschienen, Doppelboden-Anschlussdosen und -Durchführungen.**

ISO 9001, CE- und IEC-konforme **Stromschienen, Kabelbahnen und Kabelzuführungen** sind die **Kernkompetenz von LANZ.** Beratung, Offerte, rasche preisgünstige **Lieferung weltweit** von **lanz oensingen ag CH-4702 Oensingen**

☐ **Mich interessieren** .....
..... Bitte senden Sie Unterlagen.

☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name / Adresse / Tel. _____

A4

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen
Telefon 062 388 21 21
www.lanz-oens.com
Südringstrasse 2
Fax 062 388 24 24
info@lanz-oens-com

Mit ABB verlieren Sie keine Zeit!

Neues Leitsystem in nur drei Tagen migriert.

Die Kehrichtverbrennungsanlage Limmattal verarbeitet 10 Tonnen Abfall pro Stunde. 365 Tage pro Jahr. Bei soviel Müll ist klar, dass bei einer Erneuerung des Leitsystems keine Zeit verloren werden darf. ABB verlor keine Zeit: Nach nur drei Tagen Stillstandzeit nahm die Anlage ihren Betrieb wieder auf. „Aber nicht nur die Migration verlief zackig", erzählt Urs Freundorfer, Betriebsmeister KVA Limmattal. „Auch beim Lokalisieren von Fehlern verlieren wir mit dem neuen System keine Zeit mehr", so Freundorfer. www.abb.ch

Urs Freundorfer, Betriebsmeister KVA Limmattal
Peter Hochstrasser, ABB Schweiz, nehmen das neue Leitsystem in Betrieb.

© Copyright 2006 ABB.

Power and productivity for a better world™ ABB