Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen : Teil 1 : Definitionen und allgemeine Erklärungen

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 23

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857750

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 1: Definitionen und allgemeine Erklärungen[1)]

Der vorliegende 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. Nachfolgend werden die grundlegenden Mechanismen der Ferroresonanz erklärt und die häufigsten Schaltsituationen vorgestellt, in welchen Ferroresonanzen auftreten können. In einem zweiten Teil werden Beispiele aus der Praxis für ein- und dreiphasige Ferroresonanzschwingungen vorgestellt.

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

In den letzten Jahren traten bei einigen schweizerischen, europäischen und überseeischen Elektrizitätswerken bei Schalthandlungen in Unter- und Verteilstationen vermehrt stationäre, nicht lineare Schwingungen auf. Solche Schwingungen werden auch als Kippschwingungen bezeichnet. Der Vorgang wird in der Fachliteratur mit dem Ausdruck Ferroresonanz umschrieben.

Das häufigere Auftreten nicht linearer Ferroresonanzschwingungen hat verschiedene Gründe:

- Infolge des Preisdrucks auf die Betreiber von Schaltanlagen und auf die Hersteller von Komponenten (Messwandler, Transformatoren, Hochspannungskondensatoren, Steuerkondensatoren für Leistungsschalter und Freiluftisolierstützer) erfolgt eine «schleichende» wesentlich höhere Ausnutzung der Systeme und Komponenten.
- Für die Systeme erfolgt eine Verschiebung von der Nennspannung U_R in Richtung höchstzulässige dauernde Betriebsspannung U_m.
- Bei den Komponenten Transformator und induktiver Spannungswandler wird die Flussdichte $\vec{B}$ durch Verkleinerung des Kerns erhöht.
- Die Reduzierung der Anlagenkapazitäten durch den Einsatz von neuen Komponenten führt zu einer Erhöhung der erregenden Spannung.

Aus der Theorie der nicht linearen Schwingungen und der modernen Stabilitätstheorie [1] für nicht lineare Systeme folgt, dass stationäre Schwingungen für ihre Entstehung ein System benötigen, das aus einem äquivalenten Kondensator, einer Induktivität mit einem Eisenkern (nicht lineare Induktivität) und einer Wechselspannungsquelle für die Deckung der Verluste des Systems besteht. Das nicht lineare Element für ein solches System ist in diesem Fall die Hauptinduktivität des induktiven Spannungswandlers, das bei wachsender Spannung wegen der Sättigungscharakteristik der Flussdichte gemäss $\vec{B}(t) = f(\vec{H}(t))$ die nicht linearen Schwingungen hervorruft. Es handelt sich um ein nicht lineares, zeitinvariantes Übertragungsglied (Hysteresekurve des eingesetzten magnetischen Materials), gekennzeichnet durch die Begrenzungskennlinie [2].

Die Schwierigkeit für die Untersuchung, ob stationäre nicht lineare Schwingungen auftreten oder nicht, ist durch die Tatsache gegeben, dass über die Grösse und Anordnung der Kapazitäten und über die in der Schaltanlage aufgrund der Ableitströme der Porzellan- und Verbundisolatoren auftretenden Verluste meistens nur Schätzwerte vorliegen.

Es muss auf den grossen Unterschied zwischen dem kapazitiven Spannungswandler (Standard IEC 60044-5 [3]) und dem induktiven Spannungswandler hingewiesen werden: Beim kapazitiven Spannungswandler ist die Kapazität für den nicht linearen Schwingkreis der Kopplungskondensator mit Sekundärkondensator und nicht die Stationskapazität. Der kapazitive Spannungswandler ist also bereits ein nicht lineares, schwingungsfähiges System, das Ferroresonanzschwingungen ausführen kann.

Im Standard IEC 60044-5 sind Anforderungen an den Wandler zur Gewährleistung der Ferroresonanzfreiheit (stationäre nicht lineare Schwingungen) angegeben. Der Hersteller des Wandlers kann die Ferroresonanzfreiheit selbst überprüfen.

In der Arbeitsgruppe 1[2)] des Technischen Komitees 38 (TK 38) des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES) wurden in den Netzsystemen aufgetretene Ferroresonanzfälle behandelt. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind in zwei Teile aufgegliedert: Teil 1 liefert die Definition der Ferroresonanz und die Ersatzschaltbilder und Teil 2 zeigt Beispiele aus der Praxis für ein- und dreiphasige Ferroresonanzschwingungen. In Vorbereitung sind zudem weitere Teile zu den ausschlaggebenden Anlagenparametern, zu Methoden zur Untersuchung ein- und dreiphasiger Ferroresonanzschwingungen sowie zur Behebung von Ferroresonanzproblemen.

Es wurden auch die wirtschaftlichen Aspekte der Ferroresonanz diskutiert, und es muss festgehalten werden, dass bereits bei der Planung von Schaltanlagen mit induktiven Spannungswandlern eine Untersuchung erfolgen sollte, ob stationäre nicht lineare Schwingungen auftreten können oder nicht. Dies bedeutet eine Zusammenarbeit zwischen Anlagen- und Wandlerhersteller sowie Anlagenbetreiber [4]. Dieses Vorgehen stellt die wirtschaftlichste Lösung dar. Bewährt haben sich auch Ferroresonanzuntersuchungen an Musteranlagen. Wirtschaftlich aufwendi-

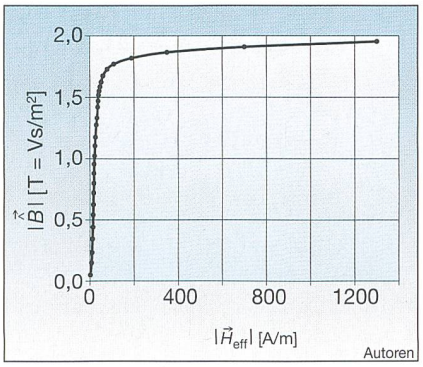

Bild 1 Beispiel einer typischen Magnetisierungskennlinie eines ferromagnetischen Kerns

Die Kurve gilt für kaltgewalztes Si-Eisen (Standard-Material)

$|\hat{\vec{B}}|$ Scheitelwert der Flussdichte im Eisenkern

$|\vec{H}_{eff}|$ Effektivwert der magnetischen Feldstärke im Kern

ger ist die Behebung der Ferroresonanz an bestehenden Anlagen, falls es durch Auswechslung von Komponenten – z.B. Steuerkondensatoren von Schaltern, Kopplungskondensatoren oder induktiven Spannungswandlern – zu stationären nicht linearen Schwingungen (Ferroresonanz) kommt.

Es ist das Ziel der Arbeitsgruppe 1 des TK 38, eine Basis für die Zusammenarbeit zwischen Anlagenhersteller, Hersteller der induktiven Spannungswandler und Anlagenbetreiber zu schaffen, um Schwierigkeiten beim Betrieb der Unterstation zu vermeiden.

Der existierende IEC-Standard 60044-2 [5] für induktive Spannungswandler enthält keine Definitionen oder Anforderungen zur Vermeidung von Ferroresonanzproblemen. Die Arbeitsgruppe 1 des TK 38 wird einen Antrag an das IEC/TC 38[3)] für einen «New work item proposal» mit dem Titel «Anforderungen an die Parameterangaben des Systems zur Auslegung von induktiven Spannungswandlern in Schaltanlagen im Hinblick auf Ferroresonanz» als Amendment für den Basisstandard 60044-2 stellen.

Die Definition der Ferroresonanz

Als Ferroresonanz werden unerwünschte nicht lineare Schwingungen verstanden, welche in Schaltanlagen zustande kommen können, wo induktive Komponenten mit ferromagnetischem Kern zusammen mit Kapazitäten und einer Wechselspannungsquelle ein schwingfähiges System bilden. Über Ferroresonanzvorgänge in Hochspannungsnetzen existierten bereits in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts zahlreiche Berichte und Publikationen. Eine klassische Darstellung der Vorgänge stammt von R. Rüdenberg [6]. Eine moderne didaktisch aufbereitete Einführung in Ferroresonanzprobleme findet man bei K. Heuck und K.-D. Dettmann [7]. Viel zitierte grundlegende Untersuchungen zur Vielfalt der Ferroresonanzschwingungen wurden von Bergmann [8, 9] beschrieben. Ein Review-Artikel über das Problem wurde an der Cigré-Konferenz 1975 präsentiert [10].

Alle ferromagnetischen Materialien lassen sich prinzipiell nur bis zu einer gewissen Sättigungsflussdichte $|\vec{B}_S|$ magnetisieren. Werden magnetische Spannungswandler über die Sättigungsflussdichte magnetisiert, durchfährt der Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke $|\vec{H}|$ und der magnetischen Flussdichte $|\vec{B}|$ eine stark nicht lineare Kennlinie (Bild 1). Schaltungstechnisch bedeutet dies, dass die Hauptinduktivität eines induktiven Spannungswandlers oberhalb der Sättigungsflussdichte auf einen kleinen Bruchteil zusammenbricht. Dieses Auftreten der Kernsättigung spielt bei Ferroresonanzvorgängen eine entscheidende Rolle.

Ferroresonanzschwingungen treten in Hochspannungsschaltanlagen oder in abgetrennten Teilen von Netzen nur in Schaltkonfigurationen auf, bei welchen die Hochspannungswicklung des Spannungswandlers in Serie mit einer Kapazität an der Wechselspannungsquelle liegt (Bild 2).

In der Praxis setzen sich die ferroresonanzgefährdeten Schaltkreise aus weiteren Anlagenkomponenten zusammen, welche die Voraussetzungen für das Auftreten von Ferroresonanzschwingungen mitbestimmen.

Da im Scheitelwert des Stroms bzw. bei maximaler Sättigung des Kerns die Ladung der externen Kapazität(en) wegen der kleinen Restinduktivität des gesättigten Wandlers sehr rasch auf die entgegengesetzte Polarität umschwingen kann, wird oft auch von einem «Umkippen» gesprochen und das Phänomen der Ferroresonanz auch als «Kippschwingung» bezeichnet.

Schwingungen infolge einer Anregung eines Resonanzkreises in Anlagenteilen

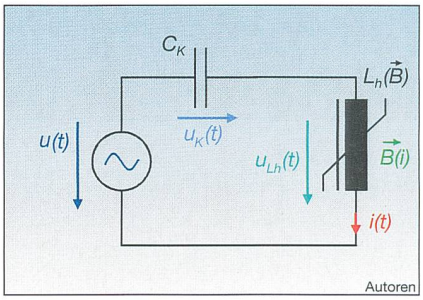

Bild 2 Ersatzschaltbild des einfachstmöglichen Ferroresonanzkreises

$u(t)$ Wechselspannungsquelle

$u_K(t)$ Spannung an der Kopplungskapazität

$u_{Lh}(t)$ Spannung am Spannungswandler (VT)

$i(t)$ Kreisstrom

C_K Kopplungskapazität

$L_h(\vec{B})$ Nicht lineare Hauptinduktivität des Spannungswandlers

treten auch ohne Sättigung von Wandlern auf. Solche lineare Schwingungen treten in der Regel bei Betriebsfrequenz auf und besitzen einen sinusförmigen Verlauf. Diese Effekte werden im Folgenden nicht betrachtet.

Unter dem Begriff Ferroresonanz unterscheidet man zwei unterschiedliche Schwingungsvorgänge, nämlich einphasige und dreiphasige Ferroresonanz, auf die beide weiter unten eingegangen wird.

Anregungsverhalten, stationäre und instationäre Ferroresonanzschwingungen

Eine Ferroresonanzschwingung kann durch eine kleine Störung aufgeschaukelt werden («weiche Anregung»). Bei weicher Erregung beginnen die Schwingungen mit kleiner Anfangsamplitude.

Ferroresonanz kann aber auch infolge einer Schalttransienten, durch welche der Kern in Sättigung gerät, ausgelöst bzw. «getriggert» werden («harte Anregung»). Bei harter Anregung werden die Schwingungen durch ein Ereignis ausgelöst, welches mit einer hohen Anfangsamplitude verbunden ist. Durch das auslösende kurzzeitige Zusammenbrechen der Induktivität findet in diesem Fall dann eine erste Kippschwingung, d.h. ein rasches Umladen der externen Kapazitäten statt.

Möglichkeiten der Ferroresonanzanregung	*Zeitliche Entwicklung*
Weiche Anregung Langsame Aufschwingung bei Erfüllung der Ferroresonanzbedingungen	**1a:** Stationäre Ferroresonanzschwingung **1b:** Instationär ansteigende Ferroresonanzschwingung
Harte Anregung z.B. durch plötzliche Sättigung des Wandlerkerns durch eine Schalthandlung oder durch einen intermittierenden Erdfehler usw.	**2a:** Stationäre Ferroresonanzschwingung **2b:** Instationär ansteigende Ferroresonanzschwingung **2c:** Instationär abklingende Ferroresonanzschwingung

Tabelle Anregungsarten und mögliche Entwicklungen von Ferroresonanzschwingungen

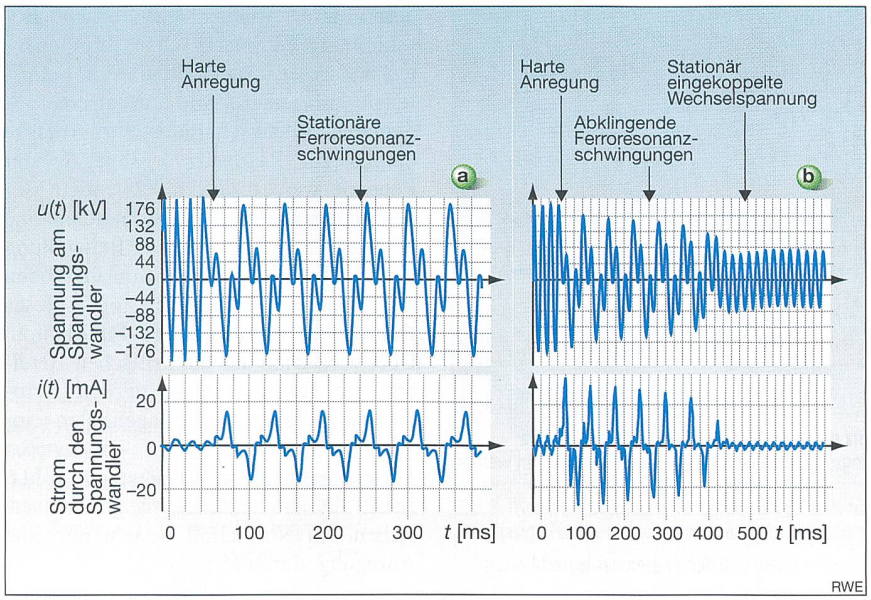

Bild 3 Beispiele von gemessenen einphasigen Ferroresonanzschwingung mit 16⅔-Hz-Schwingungen

Bild 3a Einphasige stationäre Ferroresonanzschwingung, Typ 2a entsprechend der Tabelle
Bild 3b Einphasige abklingende Ferroresonanzschwingung, Typ 2c gemäss Tabelle
Die Oszillogramme wurden von RWE Transportnetz Strom zur Verfügung gestellt

Ferroresonanzschwingungen können stationär werden oder instationär mit ansteigender oder abklingender Amplitude. Ansteigende Ferroresonanzschwingungen können zur dielektrischen Zerstörung oder zum Aussenüberschlag an Isolationsstrecken führen.

Die Tabelle zeigt eine Übersicht über die zwei Anregungsarten und die möglichen Entwicklungen von Ferroresonanzschwingungen.

Abklingende Ferroresonanzschwingungen führen nicht zu Schäden an Spannungswandlern. Die Gefährdung durch instationär ansteigende Schwingungen ist offensichtlich. Stationäre Schwingungen können durch erhöhte Ströme in der Wandlerprimärwicklung und schliesslich durch Überhitzung Schäden an Wandlern verursachen.

Oszillogramme der Strom- und Spannungsverläufe der Primärwicklung werden in Bild 3a für stationäre Ferroresonanz nach harter Anregung durch einen Schaltvorgang und in Bild 3b für instationär abklingende Ferroresonanz dargestellt.

Die Frage des Abklingens einer Ferroresonanzschwingung ist oft auch durch statistische Vorgänge geprägt: z.B. a) durch den Zeitpunkt des Schaltens oder b) durch Schwankungen der Frequenz der nicht linearen Schwingungen gegenüber der entsprechenden Subharmonischen der anregenden Netzfrequenz. In diesem Fall kann die Ferroresonanzschwingung unter Umständen ausser Tritt fallen, wonach sie abgedämpft wird. Sind dann die Bedingungen für eine erneute, «weiche» Anregung nicht erfüllt, so kommt sie zum definitiven Stillstand.

Einphasige Ferroresonanzschwingungen

Bei der einphasigen Ferroresonanz werden einzelne Phasen eines ausgeschalteten, nicht geerdeten Anlagenteils, welcher einen oder mehrere induktive Spannungswandler enthält, unabhängig voneinander über eine Kopplungskapazität (Reihenkapazität) von der Netzspannung zu Schwingungen angeregt. Einphasige Ferroresonanzen können auch in Anlagen mit nicht geerdetem Sternpunkt auftreten.

Anlagenkonfiguration

Ein Beispiel einer Schaltkonfiguration, in welcher eine einphasige Ferroresonanz auftreten kann, ist in Bild 4 dargestellt. Sie zeigt eine Phase eines freigeschalteten Abgangsfelds in einer Freiluftanlage. Die Ankopplung an die Netzspannung erfolgt in diesem Fall über Steuerkondensatoren des ausgeschalteten Leistungsschalters.

Eine weitere zu Ferroresonanzschwingungen neigende Konfiguration liegt bei einem ausgeschalteten Freileitungssystem L_{MV} vor, wenn es auf den gleichen Tragwerken mit einem eingeschalteten System einer höheren Spannungsebene L_{HV} geführt wird (Bild 5). Bleiben die Phasen des ausgeschalteten Systems ungeerdet und sind diese an einem oder beiden Enden mit Spannungswandlern verbunden, so erfolgt unter Umständen über die Kopplungskapazität zwischen den Leiterseilen der betriebenen und der ausgeschalteten Freileitung eine Anregung zu Ferroresonanzschwingungen. Dabei schwingen die einzelnen Phasen unabhängig voneinander.

Das Ersatzschaltbild

Zur theoretischen Analyse der Ferroresonanzschwingungen reichen die bisher behandelten groben Überlegungen und Schemata nicht aus. Simulationsmodelle, von denen erwartet wird, dass sie das Eintreten von Ferroresonanzschwingungen theoretisch vorhersagen können, erfor-

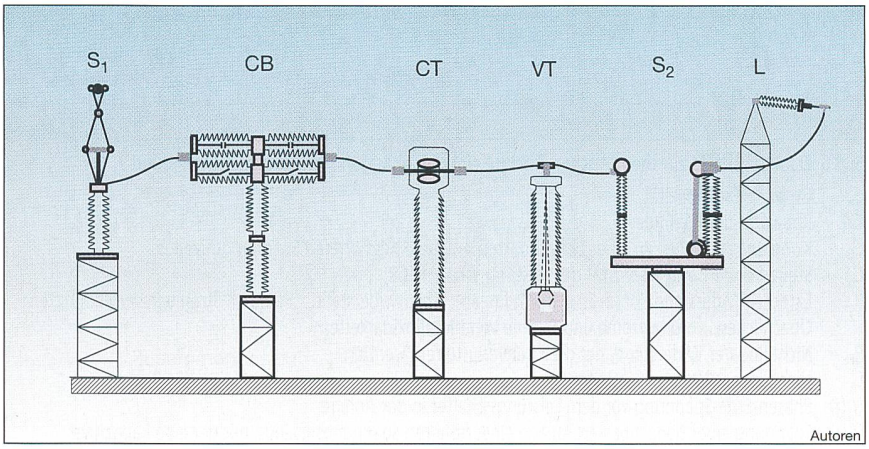

Bild 4 Schematische Darstellung eines freigeschalteten Abgangsfelds mit Spannungswandler als Beispiel eines Schaltzustands, in welchem einphasige Ferroresonanz möglich ist

S_1 Sammelschienentrennschalter, geschlossen
CB Leistungsschalter, geöffnet
CT Stromwandler
VT Spannungswandler
S_2 Abgangstrennschalter, geöffnet
L Abgehende Leitung

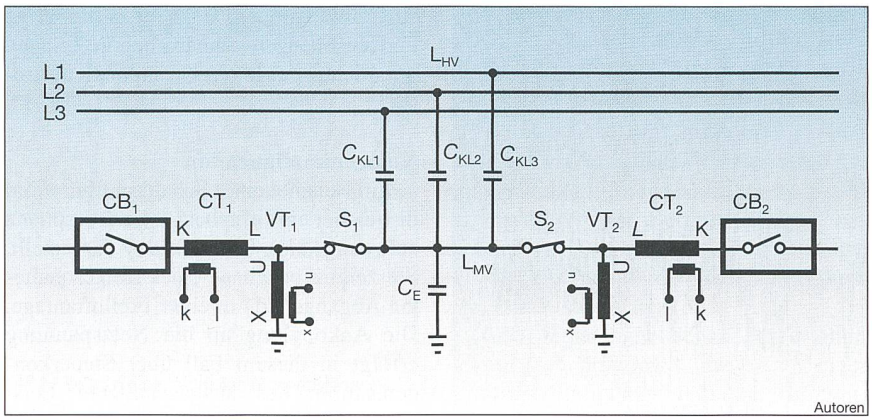

Bild 5 Ersatzschaltbild einer zur einphasigen Ferroresonanz neigenden Netzsituation, bei welcher die Schwingungen über die kapazitive Kopplung von Freileitungssystemen angeregt und aufrechterhalten werden können

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

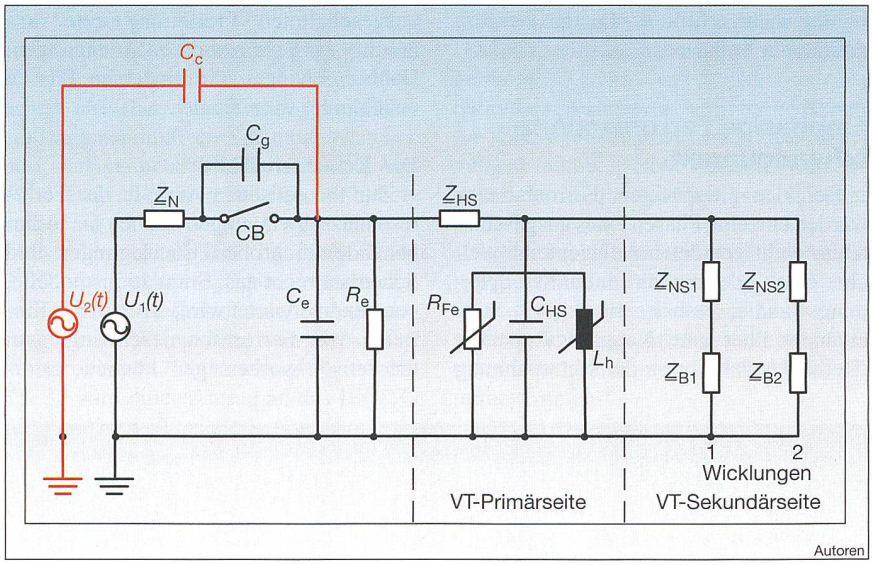

Bild 6 Ersatzschaltbild zur theoretischen Analyse einer einphasigen Ferroresonanzschwingung

C_e	Gesamte Erdkapazität
C_{HS}	Kapazität der HS-Spule
C_C	Kopplungskapazität zu einer benachbarten Anlage eines höheren Spannungsniveaus
C_g	Steuerkondensator-Kapazität des Leistungsschalters CB
R_e	Externer Widerstand Phase–Erde (nicht linearer Ableitwiderstand z.B.: durch Ströme in verschmutzten Oberflächen, Koronaströme und Ströme von Metalloxidableitern)
R_{Fe}	Nicht linearer Widerstand, der die Eisenverluste repräsentiert
L_h	Nicht lineare Hauptinduktivität
$U_1(t)$	Phasen-Erde-Spannung vor dem Leistungsschalter in der Anlage
$U_2(t)$	Spannung einer benachbarten Anlage eines höheren Spannungsniveaus, mit der eine kapazitive Kopplung besteht
VT	Spannungswandler
$\underline{Z}_{B1}$	Impedanz des Bürdenwiderstands der Sekundärwicklung 1 (Bürdenwiderstand und Induktivität)
$\underline{Z}_{B2}$	Impedanz des Bürdenwiderstands der Sekundärwicklung 2 (Bürdenwiderstand und Induktivität)
$\underline{Z}_{HS}$	Impedanz der HS-Wicklung (Widerstand und Streuinduktivität)
$\underline{Z}_N$	Netzimpedanz
$\underline{Z}_{NS1}$	Impedanz Sekundärwicklung 1 (Widerstand und Streuinduktivität)
$\underline{Z}_{NS2}$	Impedanz Sekundärwicklung 2 (Widerstand und Streuinduktivität)

dern eine detaillierte Definition und Beschreibung der elektrischen Komponenten und deren Charakteristika im betroffenen Anlagenteil. Bild 6 zeigt eine allgemeine Ersatzschaltung zur Analyse einphasiger Resonanzvorgänge. In der Legende werden später verwendete Bezeichnungen der Ersatzschaltelemente definiert. Eine eingehende Behandlung der Analyse und Simulationsmethoden mit Beispielen erfolgt als Teil 2 dieses Beitrags in einer späteren Publikation. Dort wird auch auf die kritischen Bereiche der Ersatzelemente in den ferroresonanzgefährdeten Anlagenteilen eingegangen.

Der rot eingezeichnete Zweig in Bild 6 ist als alternativer Anregungspfad zu verstehen. Im Normalfall besteht nur eine Anregung, durch U_1 oder U_2.

Kapazitive Spannungswandler

Konventionelle kapazitive Spannungswandler besitzen einen induktiven Zwischenwandler und eine Kompensationsdrossel. Zusammen mit der Primär- und Sekundärkapazität enthalten sie somit alle Komponenten zur Bildung eines Ferroresonanzkreises. Kapazitive Spannungswandler können deshalb auch ohne zusätzliche Reihenkapazität Ferroresonanzschwingungen ausführen (Bild 7). Sie müssen deshalb konstruktiv so ausgelegt werden, dass unter allen möglichen Betriebsbedingungen eine stationäre Ferroresonanzschwingung ausgeschlossen werden kann [3] (IEC 60044-5).

Unter anderem werden bei kapazitiven Spannungswandlern für die Dämpfung der nicht linearen Schwingungen an den Sekundärklemmen LC-Schwingkreise hoher Güte, die auf 16⅔ Hz und 10 Hz abgestimmt sind, mit Erfolg eingesetzt.

Dreiphasige Ferroresonanzschwingungen

Dreiphasige Ferroresonanzschwingungen (ggf. auch zweiphasige in Bahnstromnetzen) können nur in Anlagen oder Netzteilen mit einphasigen Spannungswandlern auftreten, bei welchen der Stern- bzw. der Systemmittelpunkt nicht starr geerdet ist.

Bild 8 zeigt eine für Ferroresonanz anfällige Konfiguration, wie sie in Netzen mit nicht starr geerdetem Sternpunkt entsteht, wenn die Spannungswandler gegen Erde geschaltet sind.

Wird ein Transformator hochspannungsseitig eingeschaltet, an welchem an der Unterspannungsseite Spannungswandler angeschlossen sind, so kann es bei nicht starr geerdetem Sternpunkt durch die Sättigung eines Wandlers zu

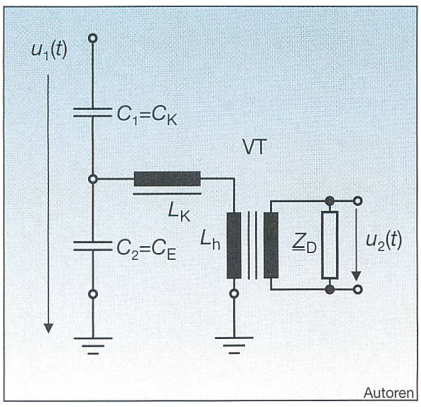

Bild 7 Prinzipschema eines kapazitiven Spannungswandlers

Der kapazitive Hochspannungsteiler bildet zusammen mit der Kompensationsdrossel und dem induktiven Zwischenwandler einen Schwingkreis

$u_1(t)$ Phasen-Erde-Spannung vor dem Leistungsschalter in der Anlage
$u_2(t)$ Sekundärspannung
$C_1=C_K$ Primärkapazität (entspricht Kopplungskapazität)
$C_2=C_E$ Sekundärkapazität (entspricht Erdkapazität)
VT Induktiver Zwischenspannungswandler
L_K Kompensationsdrossel
L_h Nicht lineare Hauptinduktivität des Zwischenwandlers
Z_D Dämpfungsbürde

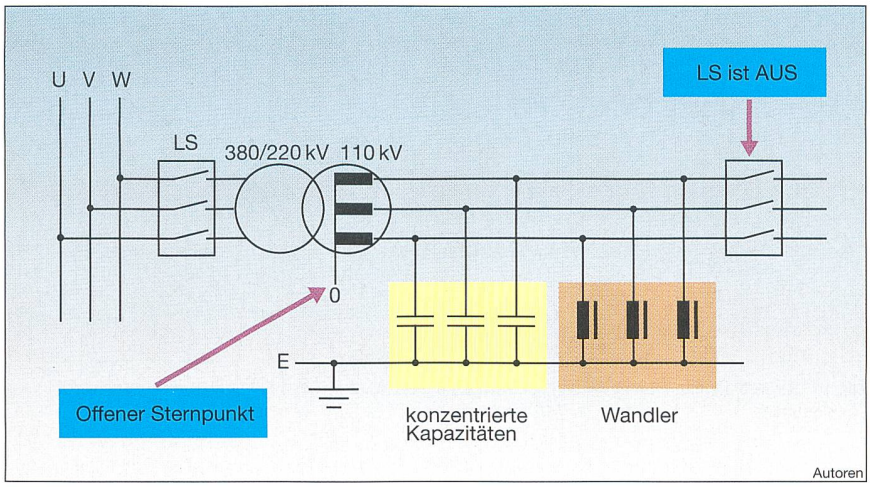

Bild 8 Isoliertes Mittelspannungsnetz als Beispiel für ein Prinzipschaltbild in einer Situation, in welcher eine dreiphasige Ferroresonanzschwingung auftreten kann

LS Leistungsschalter

Spannungsüberhöhungen an den anderen Phasen kommen. Der Sternpunkt verschiebt sich und führt schliesslich Schwingung aus, wobei die Spannungswandler der anderen Phasen im Wechsel in Sättigung getrieben werden. Diese Verschiebung des Sternpunkts tritt auch infolge eines verlöschenden Erdschlusses auf.

Infolge der Sättigung eines der Spannungswandler liegen die Erdkapazitäten der anderen beiden Phasen von den Netzspannungsquellen aus gesehen in Serie zu diesem Wandler und bilden vorübergehend ein schwingfähiges System. Die genannten Erdkapazitäten der anderen Phasen können sich über die gesättigte Induktivität rasch umladen, wonach ein Wandler einer anderen Phase in Sättigung gerät. Der Ferroresonanzvorgang ist in diesem Fall wesentlich komplexer, da sich die pendelnde Schwingungsenergie laufend zwischen den drei Phasen verlagert. Bild 9 zeigt den Stromfluss beim Umladen der Seriekapazitäten im Moment der Sättigung des Wandlers einer Phase.

Ob eine stationäre Ferroresonanzschwingung entsteht oder nicht, hängt von der Grösse dieser Erdkapazitäten ab. Sind die Erdkapazitäten relativ gross, kann sich der Sternpunkt nicht ausreichend schnell verlagern. Wenn der Wandler wieder aus der Sättigung kommt, beendet sich der Vorgang in diesem Fall von selbst. Sind dagegen die Erdkapazitäten relativ klein, so kann sich der Sternpunkt verlagern, bevor der Wandler wieder aus der Sättigung kommt.

Die Verlagerung des Sternpunkts von Phase zu Phase kann mit einer Torkelbewegung verglichen werden (siehe auch Zeigerdiagramme Bild 10). Diese Torkelbewegung erfolgt mit Schwingungen von 0,1 bis 7 Hz, die als Schwebung bezeichnet werden können. Ist dieser Vorgang einmal angeregt worden, so bleibt die Schwingung ohne Veränderungen in der Netzkonfiguration stationär.

Die beobachteten Schwingungen sind Subharmonische der Netzfrequenz. Für eine Netzfrequenz von 50 Hz treten Subharmonische der Ordnung 1, 2, 3, 4 usw. auf. Erklärungen zum Phänomen der dreiphasigen Ferroresonanz können insbesondere in [7, 10, 11] gefunden werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschreibt das unerwünschte Phänomen der Ferroresonanz in Hoch- und Mittelspannungsanlagen. Obschon das Phänomen häufig Probleme bereitet, wird es fast ausschliesslich nur in ausserordentlichen Schaltsituationen festgestellt. Ferroresonanzen treten in der Regel in einem kleinen, vom

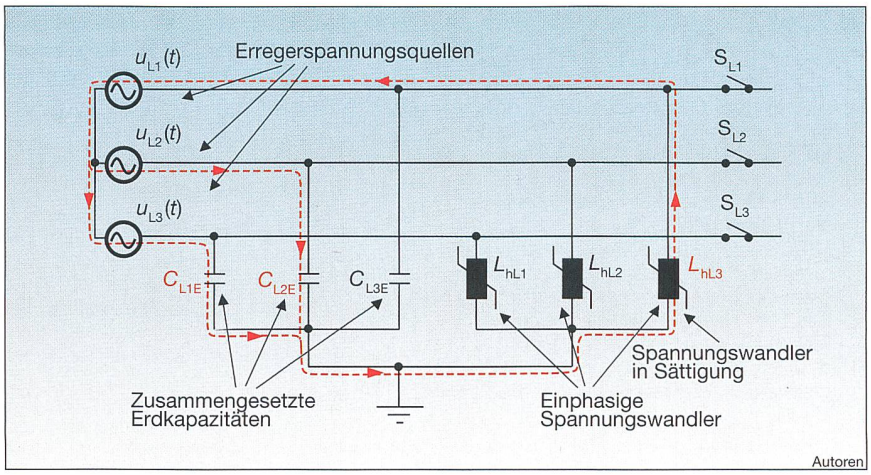

Bild 9 Vereinfachtes Schaltbild für eine Anlagenkonfiguration (leer laufendes Transformatorfeld), in welcher eine dreiphasige Ferroresonanz auftritt

$u_{L1}(t)$, $u_{L2}(t)$, $u_{L3}(t)$ Anregende Spannungen, z.B. Wicklungen eines speisenden Transformators
$C_{L1E}(t)$, $C_{L2E}(t)$, $C_{L3E}(t)$ Erdkapazitäten
$L_{hL1}(t)$, $L_{hL2}(t)$, $L_{hL3}(t)$ Hauptinduktivitäten einphasiger induktiver Spannungswandler
S_{L1}, S_{L2}, S_{L3} Offene Schalter oder Trennschalter zur Sammelschiene

Der gestrichelt eingezeichnete Strompfad gilt für eine Halbwelle, in welcher der Spannungswandler rechts aussen ($L_{h\,L3}$) in Sättigung gerät und die Erdkapazitäten der anderen beiden Phasen (C_{L1E}, C_{L2E}) umlädt.

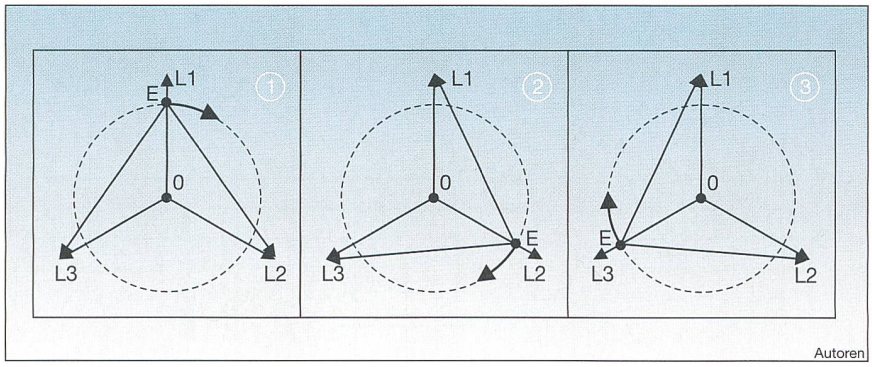

Bild 10 Zeigerdiagramme zur Erklärung der Schwebungserscheinung bei dreiphasigen Ferroresonanzschwingungen

Das System der drei verketteten Spannungen verlagert sich gegenüber dem Erdpotenzial so, dass sich der Punkt des Erdpotenzials (E) im Zeigerdiagramm etwa auf einer Kreisbahn von Phasenpotenzial zu Phasenpotenzial bewegt (Bildfolge 1, 2, 3)

übrigen Netz abgetrennten Teil einer Schaltanlage oder eines Netzes auf. Das Anlagenteil schliesst einen oder mehrere Spannungswandler, Kopplungskapazitäten und Erdkapazitäten ein, welche einen Schwingkreis bilden. Infolge kapazitiver Kopplung mit der Netzspannung kann unter Sättigung des Wandlerkerns eine Vielfalt komplexer, nicht linearer Schwingungen angeregt werden.

Referenzen

[1] DIN 19226, Teil 2, Paragraph 6, 1994
[2] DIN 19226 Teil 2, Paragraph 1, 1994
[3] IEC-Standard 60044-5, edition 1.0, 2004-4
[4] R. Minkner, N. Korponay: Analysis of the new IEC drafts for 185 (44-1) and 186 (44-2) Instrument Transformers in relation to the requirements of modern protection systems. S. 103–111, Paris, Frankreich: SEE 1989
[5] IEC-Standard 60044-2, edition 1.2, 2003-2
[6] R. Rüdenberg: Elektrische Schaltvorgänge in geschlossenen Stromkreisen von Starkstromanlagen. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 4. Auflage, 1953
[7] K. Heuck, K.-D. Dettmann: Elektrische Energieversorgung. Kapitel 11.2 bis 11.4 , Viehweg 2002
[8] C. Bergmann: Grundlegende Untersuchungen über Kippschwingungen in Drehstromnetzen. ETZ-A, Band 88 (1967), H. 12, S. 292–298
[9] Bergmann C.: Kippschwingungen in Drehstromnetzen. Dissertation D83, Fakultät Elektrotechnik, TU Berlin 1966
[10] M. Germay, S. Mastero, J. Vroman: Review of ferro-resonance phenomena in high-voltage power system and presentation of a voltage transformer model for predetermining them. Cigré-Session Paris, 21.–29. August 1974, Paper 22–18
[11] W. Andrä, R. Peiser: Kippschwingungen in Drehstromnetzen. ETZ-B, Band 18 (1966), H. 22, S. 825–832

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 einen ersten Teil eines Berichts Arbeitsgruppe 1 (Ferroresonanz) des TK 38 dar. Der zweite Teil wird in der Dezember-Ausgabe des Bulletins SEV/VSE publiziert.

Teil 2 dieses Beitrags erscheint in der nächsten Ausgabe

Im zweiten Teil dieses Beitrags werden einige Fallbeispiele für Ferroresonanzsituationen vorgestellt, wie sie in der Praxis auftreten. Die Möglichkeit der mathematischen Simulation dieser nicht linearen Ferroresonanzschwingungen sowie die Beurteilung der Anlagenkonfigurationen bezüglich Ferroresonanzgefährdung ist Thema späterer Beiträge im Bulletin SEV/VSE. Sie werden auch Abhilfemöglichkeiten bei Ferroresonanz behandeln und Empfehlungen zu Vorbeugungsmassnahmen geben, welche bereits bei der Planung von Schaltanlagen in Betracht gezogen werden sollten.

[2] Mitglieder der Arbeitsgruppe 1 (Ferroresonanz) des Technischen Komitees 38 (Messwandler): Dr. R. Bräunlich (FKH, CH), Dr. H. Däumling (Ritz Messwandler GmbH, D), Dipl.-Ing. M. Hofstetter (EWZ, CH), Dr. U. Prucker (Trench Germany, D), Dr. J. Schmid (Trench Switzerland AG, CH), Dipl.-Ing. H.W. Schlierf (RWE Transportnetz Strom GmbH, D), Dr. R. Minkner (Vorsitzender der AG1).

[3] IEC/TC: IEC ist die Abkürzung für International Electrotechnical Commission, TC diejenige für Technical Committee.

Résumé

Oscillations de résonance ferromagnétique dans les réseaux haute et moyenne tension

Première partie: Définitions et explications générales. Le présent article donne un aperçu du phénomène d'oscillations indésirables dues à la résonance ferromagnétique dans les réseaux à haute et moyenne tension à convertisseurs inductifs de tension. Les oscillations de ferrorésonance peuvent provoquer des dommages considérables. Et pourtant, étant donné les formes diverses sous lesquelles ils peuvent se présenter, les phénomènes ferromagnétiques ne sont pas toujours reconnus comme tels. L'article expose les mécanismes fondamentaux de ferrorésonance et présente les situations de commutation les plus fréquentes pouvant donner lieu à des oscillations ferromagnétiques. Dans une seconde partie, il sera présenté des exemples tirés de la pratique d'oscillations ferromagnétiques mono- et triphasées.