Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen : Teil 3 : Parameter von Ferroresonanzkreisen und Methoden zur Untersuchung

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

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **99 (2008)**

Heft 22-23

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-855911

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 3: Parameter von Ferroresonanzkreisen und Methoden zur Untersuchung

Unter dem Begriff Ferroresonanz werden nicht lineare Schwingungen verstanden, die in Hochspannungsnetzen in gewissen Konfigurationen bzw. Schaltzuständen auftreten können, wobei induktive Apparate und Kapazitäten beteiligt sind. Sind induktive Spannungswandler installiert, können diese durch Ferroresonanzschwingungen infolge thermischer Überlastung zerstört werden. Allerdings wird das Phänomen wegen seiner unterschiedlichen Auftretensformen nicht immer als solches erkannt. Der Beitrag stellt einen dritten Teil einer Serie von 4 Beiträgen über das Problem der Ferroresonanz im Hoch- und Mittelspannungsnetz dar. Der vorliegende Teil geht auf die Kriterien für die Gefährdung durch Ferroresonanzschwingungen ein und erklärt, wie ein Auftreten der Schwingungen erkannt werden kann.

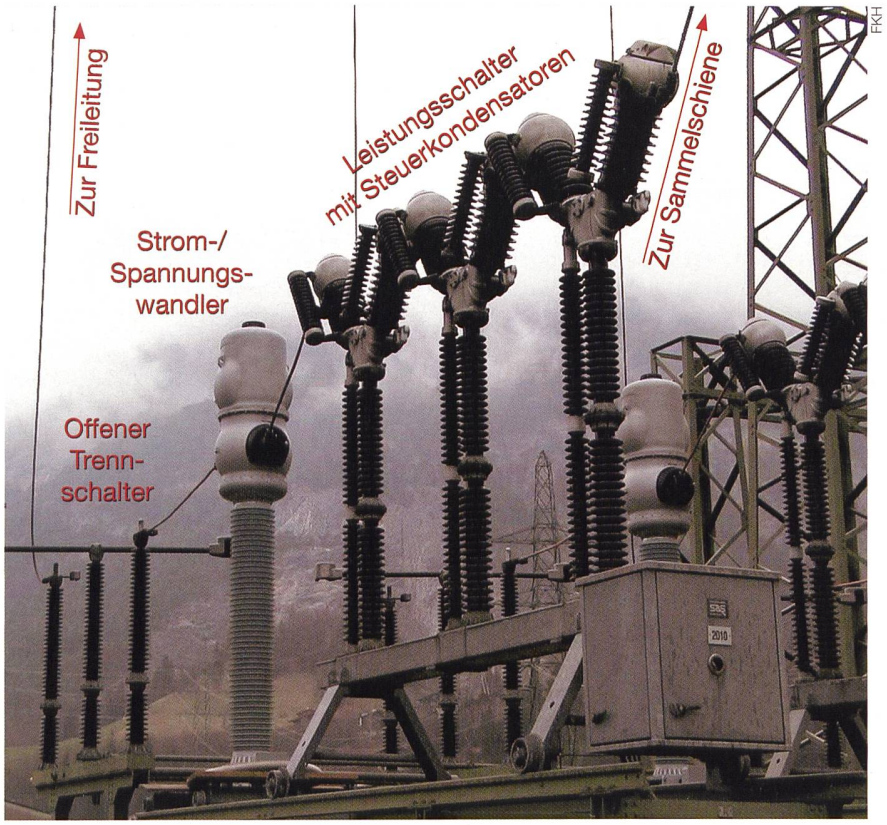


Bild 1 Leitungsfeld mit Messgruppe und kapazitiv gesteuerten Leistungsschaltern.

Die Arbeitsgruppe 1, Ferroresonanz[1)], des TK 38 (Messwandler) setzt sich seit dem Jahr 2004 mit diesem Thema auseinander [1]. Im ersten Artikel (Teil 1) wurde das unerwünschte Phänomen der 1-phasigen und der 3-phasigen Ferroresonanz in

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

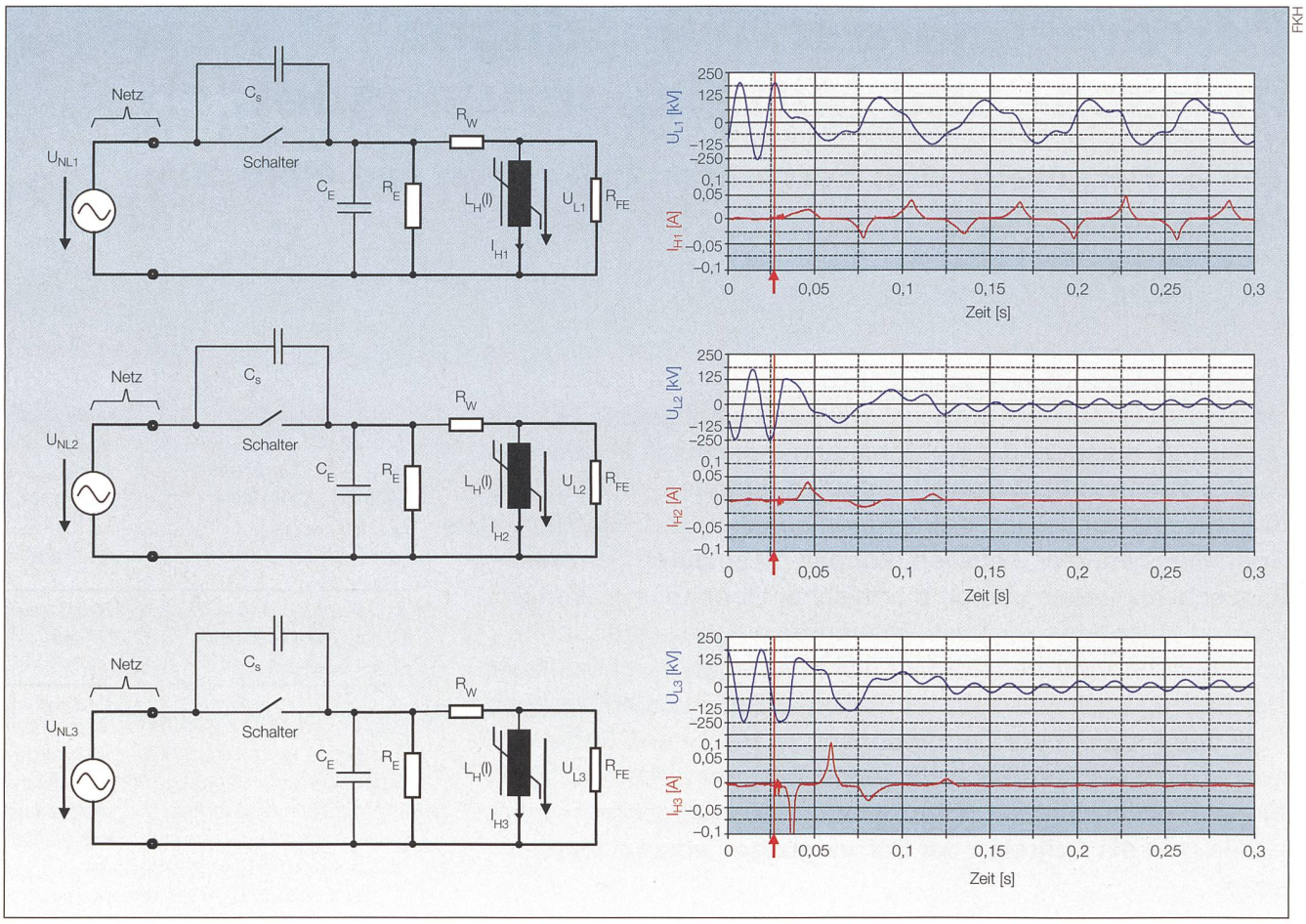
Hoch- und Mittelspannungsanlagen beschrieben. Im zweiten Artikel [2] wurden Fallbeispiele von 1-phasiger Ferroresonanz im Hochspannungsnetz und ein Fallbeispiel für 3-phasige Ferroresonanz in einer Mittelspannungsschaltanlage aufgezeigt.

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 Parameter der beteiligten Komponenten ausschlaggebend sind. Es ist das Ziel der Arbeitsgruppe, eine Basis für die Zusammenarbeit der Schaltanlagenhersteller, der Hersteller induktiver Spannungswandler und der Anlagenbetreiber zu schaffen, um Beeinträchtigungen des Betriebs der Unterstation zu vermeiden.

Beobachtungen von Ferroresonanzerscheinungen haben in den letzten Jahren zugenommen. Gründe sind in der höheren magnetischen Ausnutzung neuer Spannungswandler, aber auch in reduzierten Verlusten moderner Anlagenkomponenten zu suchen, die parasitäre Schwingungen nur gering dämpfen. Gleichermassen fördern geringere Erdkapazitäten der Komponenten (insb. Strom- und Spannungswandler) das Auftreten von Ferroresonanzschwingungen.

Ferroresonanzgefährdete Anlagen

Die Bilder 1 bis 4 beschreiben Anlagenkonfigurationen, bei denen unter be-



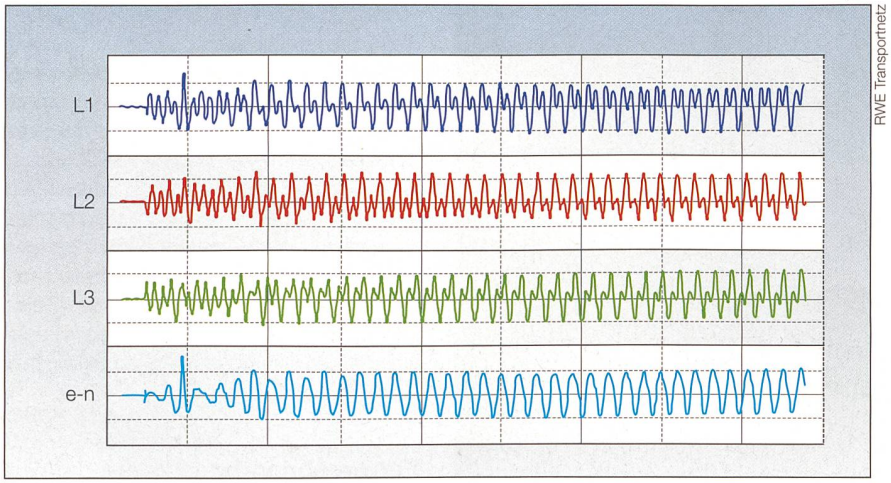
FKH

Bild 2 Vereinfachtes Ersatzschaltbild für ein Abgangsfeld, in dem 1-phasige Ferroresonanzschwingungen möglich sind.
Die rechte Seite zeigt Oszillogramme, die typische Verläufe der Spannungen über den Wandlern und der Ströme durch die Wandlerhauptinduktivitäten enthalten. Der Schalter wird zum Zeitpunkt 0,025 s geöffnet (siehe Zeitmarke). Die erste Periode vor dem Schaltmoment zeigt den Verlauf der Phasenspannungen im Netz (U_{NL1} bis U_{NL3}). Eine stationäre Ferroresonanz mit der dritten Subharmonischen ($16^2/_3$ Hz) tritt im vorliegenden Schaltbeispiel nur in der Phase L1 auf (Messung durchgeführt in einer 220-kV-Schaltanlage durch die FKH).

stimmten Voraussetzungen Ferroresonanzschwingungen angeregt werden können. Bild 1 zeigt ein Abgangsfeld in einer Freiluftschaltanlage und Bild 2 das zugehörige Ersatzschaltbild für eine Anlagenkonfiguration, in der 1-phasige Ferroresonanzschwingungen auftreten können. Die Oszillogramme in Bild 2 zeigen ein typisches Beispiel von Ferroresonanz, in dem ein Leitungsfeld ausgeschaltet wird, das von der Leitung getrennt ist und von der Sammelschiene her unter Spannung steht. Die Praxis hat gezeigt, dass nach einer solchen Abschaltung in der Regel 1 bis 2 Phasen gleichzeitig zu Ferroresonanzschwingungen angeregt werden können.

Ein detaillierteres Ersatzschaltbild eines Abgangsfelds ist in Bild 9 dargestellt. Bei 3-phasiger Ferroresonanz sind alle 3 Phasen an den Schwingungen beteiligt. Sie treten bei nicht geerdetem Sternpunkt im betroffenen Anlagenteil auf. Die Anregung kann durch Zuschaltung des Transformators oder auch durch wiederverlöschende Erdschlüsse erfolgen.

Mehrere Einflüsse spielen bei der Anregung von 3-phasigen Ferroresonanzschwingungen eine wichtige Rolle: Einerseits die Behandlung des Sternpunkts, andererseits die Höhe der Erdkapazität: Bei hohen Erdkapazitäten, z.B. bei Beteiligung von Kabelstrecken, ist im Allgemeinen die Gefahr einer Ferroresonanzschwingung kleiner. In diesen Fällen laden sich die Ka-



RWE Transportnetz

Bild 3 Störschreiberaufzeichnung einer 3-phasigen Ferroresonanzschwingung.
Dargestellt sind die 3 Phasenspannungen L1 bis L3 sowie die Sternpunktspannung e-n. Die Schwingung weicht leicht von der zweiten Subharmonischen 25 Hz ab und verlagert sich deshalb ähnlich einer Schwebung von Phase zu Phase.

pazitäten nach der Zuschaltung mit einer aperiodisch gedämpften Schwingung über die Primärwicklung des Spannungswandlers um (Kabelumladung). Berücksichtigt werden muss auch das Löschverhalten von Erdschlüssen in nicht starr geerdeten Netzen (insbesondere bei intermittierenden Erdschlüssen).

Die ferroresonanzbestimmenden Anlagenparameter sind in der Tabelle zusammengestellt. Die darin aufgeführten Grössen bestimmen das Risiko für das Auftreten von Ferroresonanzschwingungen und müssen deshalb zur Beurteilung der Gefährdung, aber auch zur Bildung von Berechnungsmodellen und zur Evaluation von Abhilfemassnahmen herangezogen werden, die im noch folgenden Teil 4 der Publikationsreihe behandelt werden.

Sind die Spannungswandler mit Freileitungs- oder Kabelstrecken verbunden, müssen die Leitungskapazitäten mitberücksichtigt werden. Typische Werte der Betriebskapazitäten betragen bei Freileitungen 10 bis 15 pF/m und bei Kabelstrecken 150 bis 300 pF/m. Die Hauptinduktivität des Messwandlers wird bestimmt durch die Auslegung und Ausnutzung des magnetischen Kreises. Die Eisenverluste werden durch die Qualität des Kernmaterials, durch das Eisengewicht und die magnetische Ausnutzung bestimmt. Die Hauptinduktivität und die Kernverluste können deshalb in einem weiten Bereich variieren und hängen von der aktuellen Aussteuerung der Magnetisierungskennlinie ab.

Maximale Netzspannung U_m		*123–145 kV*	*245 kV*	*420–550 kV*
Erdkapazitäten induktive Spannungswandler C_{HS}	Öl	250–300 pF	400–450 pF	200 pF
	SF_6	80 pF	100–200 pF	200–250 pF
Erdkapazitäten induktive Stromwandler C_{HS}	Öl	600–1300 pF	600–1300 pF	
	SF_6	150 pF	250 pF	230–290pF
Erdkapazitäten kombinierte Wandler C_{HS}	Öl	1000–1700 pF	1000–1700 pF	
	SF_6	190 pF	250–350 pF	270–380 pF
Kapazität kapazitive Spannungswandler C_{HS}	Öl	4000–10000 pF	3000–6000 pF	2000–4000 pF
Erdkapazitäten induktive Spannungswandler für GIS C_{HS}	SF_6	70 pF	80 pF	100 pF
Kapazität R-C-Spannungswandler C_{HS}	Öl		700–5000 pF	
Erdkapazität der Anlage ohne Messwandler C_e			200–3000 pF	
Hauptinduktivitäten von Spannungswandlern im Arbeitspunkt L_h		Grössenordnung 1–1000 kH, Angaben vom Hersteller		
Eisenverluste der induktiven Spannungswandler P_{FE}		Angaben vom Hersteller		
Verlustwiderstände zwischen Hochspannung und Erde R_e		Isolationswiderstände gegen Erde: Grössenordnung 1 MΩ bis 10 GΩ. Sie variieren stark je nach Art der Isolation, Feuchtigkeit und Verschmutzungsgrad.		
Typische Werte der Kapazität von Steuerkondensatoren für Leistungsschalter C_s		Europa: 200–1000 pF USA: 200–1500 pF Moderne Hochspannungsschalter besitzen oft keine Steuerkondensatoren. Die Schaltstreckenkapazität liegt dann in der Grössenordnung von 10 pF.		

Tabelle Für Ferroresonanz ausschlaggebende Anlagenparameter.
Eigenkapazität und Verlustwiderstand der Messwandler zwischen Hochspannung und Erde, Hauptinduktivität von Spannungswandlern, Kapazität der Steuerkondensatoren für Hochspannungsleistungsschalter. Die Erdkapazität des induktiven Spannungswandlers beinhaltet die Spulenkapazität (C_{HS}, siehe Bild 9) sowie auch eine allfällige Durchführungskapazität.

Erkennen von Ferroresonanzen im Netz

Um im Netz auftretende Ferroresonanzen (Kippschwingungen) als solche zu erkennen, wurden im vorangehenden Abschnitt die gefährdeten Netz- bzw. Anlagenkonfigurationen aufgezeigt. Dabei wurden 1- und 3-phasige Ferroresonanzschwingungen getrennt beschrieben, da sie in unterschiedlichen Anlagen bzw. Schaltzuständen auftreten. Im Folgenden werden für die potenziell betroffenen Konfigurationen im Einzelnen die zugehörigen Erkennungskriterien bei Vorliegen von Ferroresonanzschwingungen diskutiert.

Da Ferroresonanzanzeigen beziehungsweise -meldungen wenig verbreitet sind und das Erkennen von Ferroresonanzen nur aus einer Kombination von Messgrössen möglich ist, werden diese oft erst nach Zerstörung eines Wandlers festgestellt.

1-phasige Ferroresonanz

1-phasige Ferroresonanzschwingungen werden in der Regel durch Schutzeinrichtungen nicht angezeigt. Es erfolgt deshalb keine Alarmierung. Im Allgemeinen kann vor Ort das Vorliegen von Ferroresonanzschwingungen nur durch eine Kontrolle der Spannungen und Frequenzen erfolgen.

Je nach Registriereinrichtungen kann im Kontrollraum eine 1-phasige Ferroresonanzschwingung durch folgende 3 Beobachtungen erkannt werden: Bei Überwachung der Nullpunktspannung kann die Meldung «Unsymmetrie der Spannungen» vorliegen. Dabei kann allerdings fälsch-

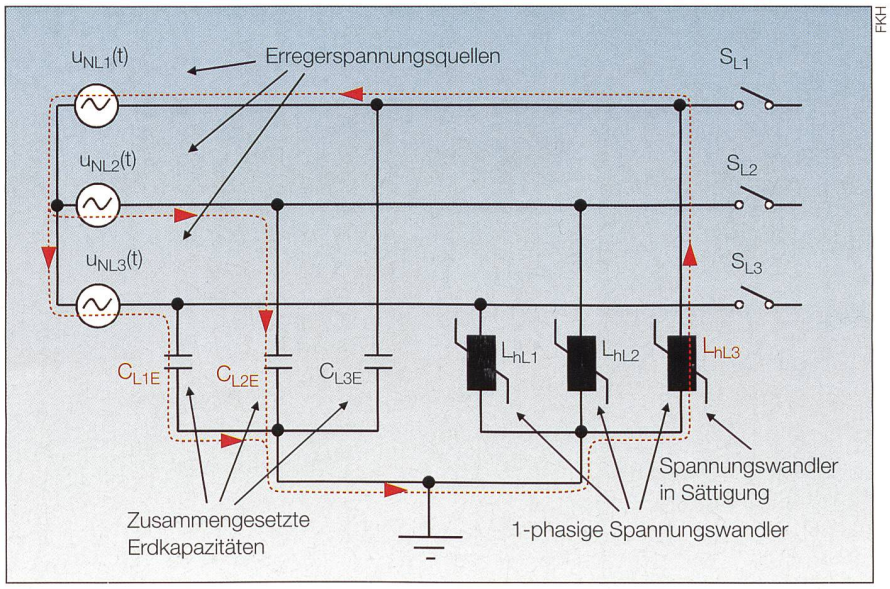
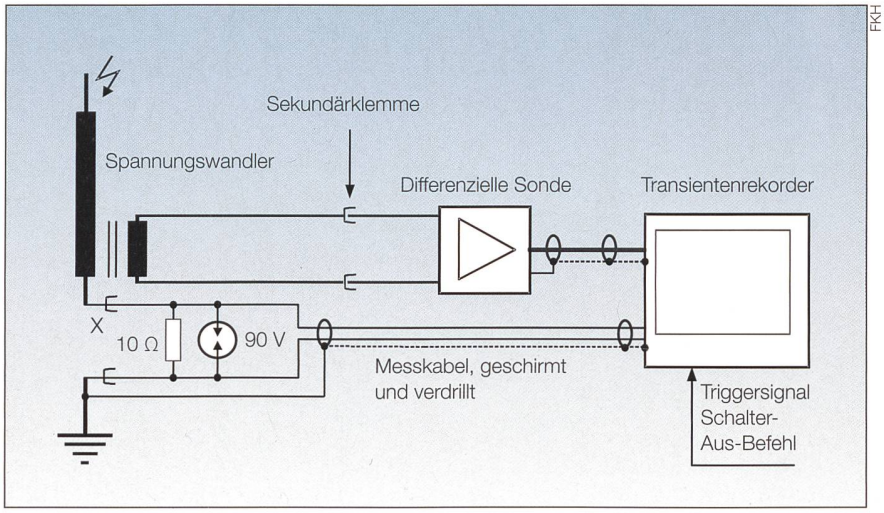


Bild 4 Netzkonfiguration für mögliches Auftreten einer 3-phasigen Ferroresonanzschwingung.
Rot eingezeichnet ist der Strompfad in der Schwingungsphase, in der der Spannungswandlerkern der Phase L3 gesättigt ist.



FKH

Bild 5 Messung des Stroms durch die Spannungswandler-Primärwicklung und die Spannung an der Sekundärwicklung.
Bemerkung: Der Erdanschluss der Primärwicklung darf im Betrieb niemals geöffnet werden, da an der Klemme sonst Hochspannung auftritt. Als Sicherheitsmassnahme wird aus diesem Grund der Einbau eines Überspannungsschutzelements zwischen Erde und der erdseitigen Klemme der Primärwicklung empfohlen.

licherweise der Eindruck entstehen, der Leistungsschalter hätte nicht alle Phasen ausgeschaltet. Als zweiter Punkt werden oft unterschiedliche Phasenspannungen angezeigt. Und drittens werden bei einer Frequenzauswertung Frequenzen angezeigt, die von der Netzfrequenz abweichen.

3-phasige Ferroresonanz

Auch bei 3-phasiger Ferroresonanz steht die Kontrolle der Spannungen im Vordergrund. Mit der Zuschaltung eines Netzkuppeltrafos von der Oberspannungsseite wird bei einer auftretenden Ferroresonanz durch die Sättigung eines Wandlers der Schwellwert der Verlagerungsspannung überschritten und durch die Erdschlussüberwachung eine Erdschlussmeldung abgesetzt. Eventuell läuft auch der angeschlossene Störschreiber an. Der gleiche Vorgang läuft bei einem echten Erdschluss ab.

Um festzustellen, ob es sich um einen echten Erdschluss (z.B. eingelegte Erdungsstangen) oder Ferroresonanzen handelt, muss die Phasenspannung kontrolliert werden. Da stehende Ferroresonanzen subharmonische Schwingungen sind (25 Hz; 16⅔ Hz), wird die Anzeige sich ständig verändern und keinen festen Wert anzeigen. Werden Spannungseffektivwerte angezeigt, so stellen sich andere Spannungen als bei 50 Hz ein. Läuft der Störschreiber an, zeichnet er einen breiten Strich auf. In der Schaltanlage wird meist ein Brummen der Spannungswandler wahrgenommen, das mit einer tiefen Schwebungsfrequenz von Phase zu Phase wechselt.

Messtechnische Untersuchung

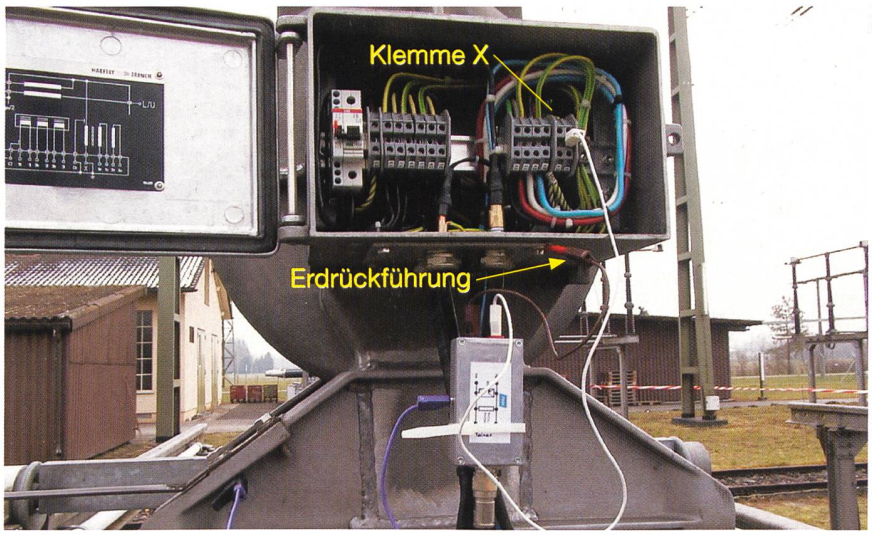
In den meisten Fällen werden im Netz messtechnische Untersuchungen eingesetzt, um festzustellen, ob bei gewissen Schalthandlungen Ferroresonanzen auftreten können und wie schnell sie abklingen. Ausschlaggebend wird in der Regel auch die Frage sein, ob die auftretenden Schwingungen zu kritisch hohen Strömen in der Spannungswandlerprimärwicklung führen oder nicht. Für grundlegende Untersuchungen, wie für die Verifikation von Berechnungsmodellen, werden Messungen mit Simultanerfassung mehrerer Spannungs- und Stromverläufe vorgenommen und mit den theoretisch ermittelten Verläufen verglichen.

1-phasige Ferroresonanz

Messungen werden meist im Zusammenhang mit Schaltversuchen durchgeführt, bei denen getestet wird, ob in gewissen Anlagenkonfigurationen Ferroresonanzschwingungen auftreten. Die empfindlichste Grösse zur Feststellung von Ferroresonanz ist der Strom durch die Spannungswandler-Primärwicklung. Zur Messung dieses Stroms, der im Normalbetrieb im Bereich weniger mA liegt, wird in die Erdverbindung der Hochspannungswicklung X ein Kleinstromwandler eingefügt, oder es wird die Klemme aufgetrennt und ein Messwiderstand von ca. 10 Ω eingefügt. (Bild 5). Bei Ferroresonanz liegen Spitzenwerte der Ströme in den Primärwicklungen zwischen 20 mA und einigen 100 mA. Nur in extremen Fällen liegen sie im Bereich von 1 A.

Bild 6 zeigt die Messanschlüsse an einem Spannungswandler-Anschlusskasten. Der Strom durch die Primärwicklung des Spannungswandlers ergibt stets eindeutige Hinweise auf eine bestehende Ferroresonanzschwingung. Der Sättigungsgrad ist durch die schmalen und hohen Stromspitzen ersichtlich (vgl. Bild 7, untere Oszillogrammspur). Spannungsverläufe an den Sekundärwicklungen zeigen zwar ebenfalls Schwingungen an. Liegt nur eine Spannungsmessung vor, kann aber in der Regel nicht eindeutig zwischen Schwingungen ohne Kernsättigung und Ferroresonanzschwingungen mit gefährlich hohen Strömen in der Primärwicklung unterschieden werden (Bild 7, obere Oszillogrammspur).

Für detaillierte Messungen, wo nicht nur die Frage nach dem Auftreten von Ferroresonanzschwingungen gestellt wird, sondern beispielsweise weitere Daten für die Überprüfung von Computersimulationen



FKH

Bild 6 Beispiel für den Anschluss eines Messwiderstands für die Erfassung des Stroms durch die Spannungswandlerprimärwicklung an der Klemme X (siehe Prinzipschaltbild Bild 5).

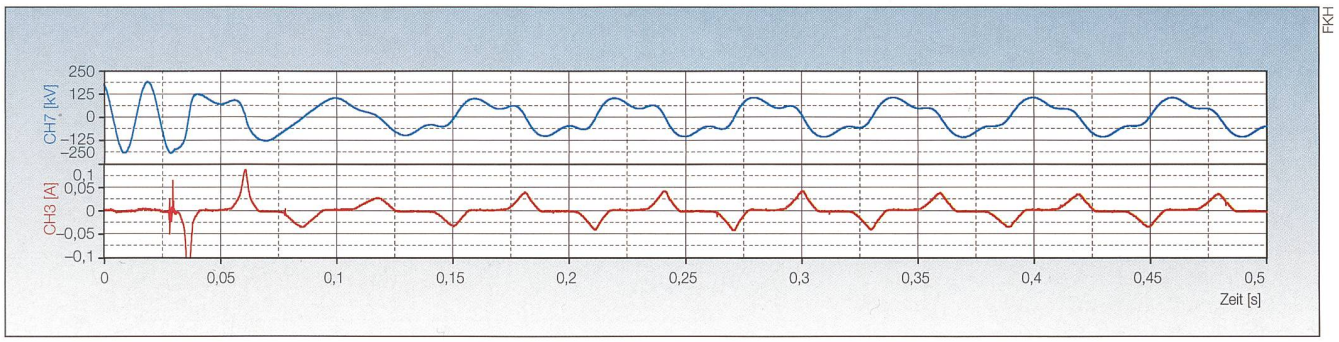


Bild 7 Messung einer 1-phasigen Ferroresonanzschwingung.
Beispiel für eine gemessene stationäre 1-phasige Ferroresonanzschwingung von $16^2/_3$ Hz, gemessen von der FKH an der 220-kV-Schaltanlage des Unterwerks Mettlen. Obere Spur: Primärspannung, gemessen auf der Sekundärwicklung; untere Spur: Strom durch die Spannungswandlerprimärwicklung.

ermittelt werden sollen, werden mehrkanalige Messungen benötigt.

3-phasige Ferroresonanz

Bei Kontrollmessungen von 3-phasigen Ferroresonanzschwingungen wird eine Messung an allen 3 Phasen empfohlen (Bild 8). Wie bei der 1-phasigen Ferroresonanz wird die Erdverbindung der Hochspannungswicklung X aufgetrennt und ein Shunt für die Messung eingefügt. Aus dem Verlauf der Ströme durch die Spannungswandlerprimärwicklungen wird die Sättigung direkt ersichtlich. Auch die Spannung über die offene Dreieckschaltung sollte mitgemessen werden.

Zur Abklärung, ob eine Anlagenkonfiguration für 3-phasige Ferroresonanzen gefährdet ist, kann die Sekundärwicklung eines Spannungswandlers kurzzeitig (ca. 200 ms) kurzgeschlossen werden. Das transiente Kurzschliessen wird als Worst-Case-Anregebedingung angesehen. Mit dem sekundären Kurzschluss kann eine Anregung der Ferroresonanz durch häufiges oberspannungsseitiges Zuschalten zum Schutz des speisenden Transformators vermieden werden. Ein Oszillogrammbeispiel einer 3-phasigen Ferroresonanzschwingung ist in Bild 3 festgehalten.

Simulation 1-phasiger Ferroresonanzschwingungen

Im Gegensatz zu oft sehr aufwendigen experimentellen Untersuchungen stellt die Berechnung ein zeitsparendes und flexibles Hilfsmittel zur Analyse und Vermeidung ferroresonanzgefährdeter Anlagenkonfigurationen dar. Ein besonderes Interesse besteht darin, ferroresonanzgefährdete Anlagenkonfigurationen bereits im Planungsstadium bei Neuanlagen bzw. Erweiterungen zu erkennen und geeignete Massnahmen dagegen ergreifen zu können. Aufgrund der Komplexität der Ferroresonanz und der dazugehörigen Einflussgrössen hat sich die Simulation als wirkungsvolles Mittel zur Beurteilung des Verhaltens erwiesen. Voraussetzung dafür ist jedoch die Beschreibung des Problems durch ein geeignetes Ersatzschaltbild. Und es wird darauf hingewiesen, dass die Simulation und Rechnung von 3-phasigen Ferroresonanzschwingungen bisher nicht zum Erfolg geführt haben, aufgrund der hohen Anzahl der Anlage- und Messwandlerparameter.

Modellierung und Simulation

Zur mathematischen Beschreibung von Ferroresonanzschwingungen existiert keine in sich geschlossene analytische Lösung. Vielmehr bedarf es numerischer Verfahren. Neben der Simulation existieren weitere mathematische Ansätze, wie die Methode nach Galerkin [4, 5], die Darstellung im Phasendiagramm nach Poincaré [6, 7, 8] oder die störungstheoretische Beschreibung. Im Gegensatz zur Simulation, welche die zeitabhängige Lösung für eine diskrete Konfiguration ermittelt, zeigen die anderen Methoden die Existenzbereiche der unterschiedlichen Ferroresonanzmodi auf, ohne die zeitabhängigen Lösungen bestimmen zu müssen. Der Nachteil Letzterer ist, dass sie in der Praxis schwierig zu handhaben sind und keinerlei Aussagen über die zu erwartenden Strom- und Spannungsformen und deren Amplituden liefern.

Die Simulation dagegen stellt diese Grössen bereit. Dies gilt jedoch nur für die untersuchte spezifische Konfiguration und stellt kein allgemeingültiges Ergebnis dar, womit unter Umständen mehrere Rechengänge für unterschiedliche Konfigurationen notwendig werden. Im Folgenden sollen am Beispiel der 1-phasigen Ferroresonanz die wesentlichen Kreisparameter und deren Bedeutung im Hinblick auf das Simulationsergebnis erläutert werden.

Bild 9 zeigt das Ersatzschaltbild zur rechnerischen Behandlung der 1-phasigen Ferroresonanz. Die in der Literatur oftmals zu findende Reduktion des in Bild 2 gezeigten Ersatzschaltbildes auf einen Serienresonanzkreis ist für eine qualitative Beschreibung zum Verständnis des Ferro-

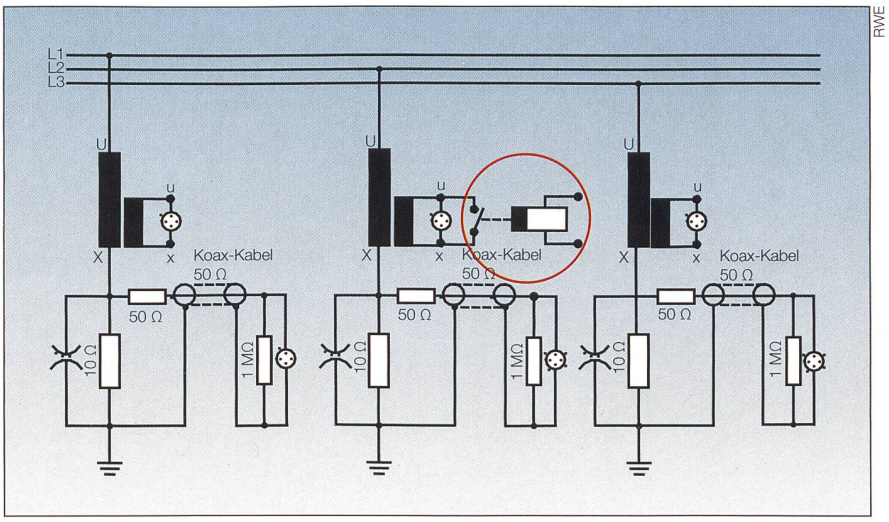


Bild 8 Messung 3-phasiger Schwingungen mit dem Oszilloskop.
Anregung der Schwingungen durch Sekundärkurzschluss eines Spannungswandlers (roter Kreis).

resonanzvorgangs hilfreich. Für die rechnerische Behandlung birgt diese Darstellung allerdings einige Gefahren. So muss besonders auf die Behandlung nicht linearer Elemente und auf die richtige Transformation der Anfangsbedingungen zum Zeitpunkt der Zustandsänderung (Schalthandlung) geachtet werden. Bei den heute zur Verfügung stehenden Rechnerleistungen kann allerdings auf eine Vereinfachung des Ersatzschaltbilds verzichtet werden.

Neben der Auswahl eines geeigneten Ersatzschaltbildes sind die Wahl der richtigen Anfangsbedingungen und die Charakterisierung der einzelnen Kreiselemente entscheidend für das Simulationsergebnis. Eine besondere Rolle spielt dabei die Darstellung des nicht linearen Elements, d.h. der Magnetisierungskurve des Spannungswandlers und die Erfassung der Kreisverluste.

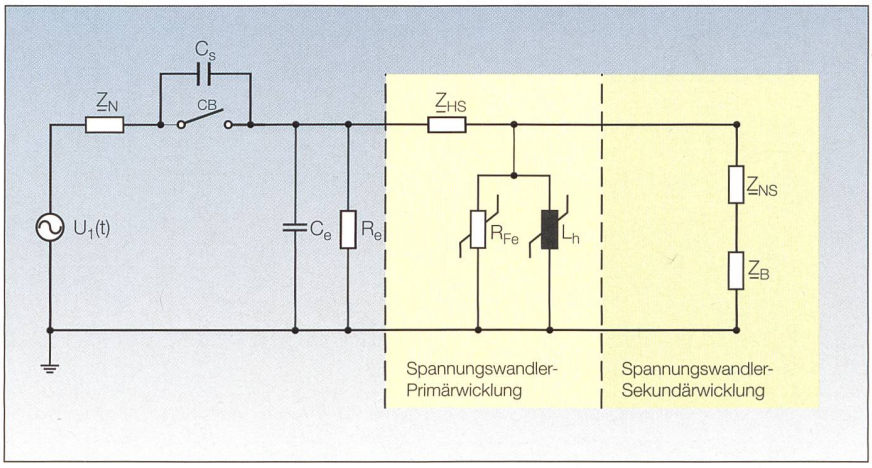


Bild 9 Ersatzschaltbild zur Behandlung einer 1-phasigen Ferroresonanzschwingung.
CB Leistungsschalter
C_e Gesamte Erdkapazität der Anlage (ohne Kapazität der Primärwicklung)
C_s Steuerkondensator-Kapazität des Leistungsschalters LS
R_e Zusammenfassung der Isolationswiderstände Phase–Erde (wandlerinterner Isolationswiderstand, nicht linearer Ableitwiderstand z.B. durch Ströme in verschmutzten Oberflächen, Koronaströme und Ströme von Metalloxidableiter)
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
Z_B Impedanz des Bürdenwiderstands der Sekundärwicklung 1 (Bürdenwiderstand und Induktivität)
Z_{HS} Impedanz der Primärwicklung (Widerstand und Streuinduktivität)
Z_N Netzimpedanz
Z_{NS} Impedanz Sekundärwicklung (Widerstand und Streuinduktivität)

Magnetisierungscharakteristik

In Bild 10 ist eine typische Magnetisierungskurve eines Spannungswandlers dargestellt. Nach zahlreichen Simulationen wurde deutlich, dass bereits geringfügige Veränderungen der Kreisparameter, so auch der Magnetisierungscharakteristik, zu gänzlich unterschiedlichen Simulationsergebnissen führen können. Daher ist auf eine möglichst realitätsgetreue Nachbildung der Magnetisierungskurve bis weit in den Sättigungsbereich hinein zu achten.

Berechnete Magnetisierungskurven können oftmals erheblich von gemessenen abweichen. Die Messung stellt somit meist die exakteste Möglichkeit zur Bestimmung der Magnetisierungskurve dar. Jedoch muss auch bei der Messung auf parasitäre Einflüsse wie kapazitive Grössen geachtet werden, die das Messergebnis verfälschen können. Weiterhin muss gewährleistet sein, dass das Sättigungsverhalten bis zu hinreichend hohen Erregungen H(t) zur Verfügung steht. Die für die Simulation geeignete Form der Magnetisierungskurve ist die Darstellung der magnetischen Flussdichte B(t) in Abhängigkeit der Erregung H(t). Die oftmals zu findende Darstellung durch Effektivwerte weicht ebenso wie die Rekonstruktion der Scheitelwerte aus den Effektivwerten zu stark vom tatsächlichen Verlauf ab.

Kreisverluste

Eine weitere wichtige Grösse, welche die Qualität des Simulationsergebnisses beeinflusst, ist die Erfassung und Behandlung von Verlusten im Ferroresonanzkreis. Diese entscheiden letztendlich, ob ein Vorgang stationär wird oder abklingt. Im Ersatzschaltbild in Bild 9 sind dabei verschiedene Verlustanteile enthalten. Die im Spannungswandler selbst auftretenden Verluste sind zum einen in der Impedanz Z_{HS} der Hochspannungsspule enthalten. Zum anderen berücksichtigt der nicht lineare Widerstand R_{Fe} Wirbelstrom- und Hystereseverluste im Kern. Diese werden durch die bei Netzfrequenz gemessene Hysteresekurve berücksichtigt. Verluste aufgrund der angeschlossenen Bürde werden durch die Impedanz Z_B erfasst.

Weitere Verlustquellen in der Schaltanlage wie Ableitströme über Isolatoren, Ableiter oder Koronaentladungen werden in einem Widerstand R_e parallel zur Anlagenkapazität C_e zusammengefasst. Während die Wandlerverluste von Herstellerseite meist hinreichend genau bekannt sind, sind die Verluste von Anlage zu Anlage verschieden und lokalen und temporären Einflussgrössen wie Wetter und Verschmutzungsgrad unterworfen und daher meist unbekannt. Für GIS-Anlagen sind bauartbedingt wesentlich geringere Verluste als in luftisolierten Anlagen anzusetzen. Je nach Anlagentyp und -design kann somit der Wert des Widerstands R_e durchaus über mehrere Grössenordnungen variieren. Typische

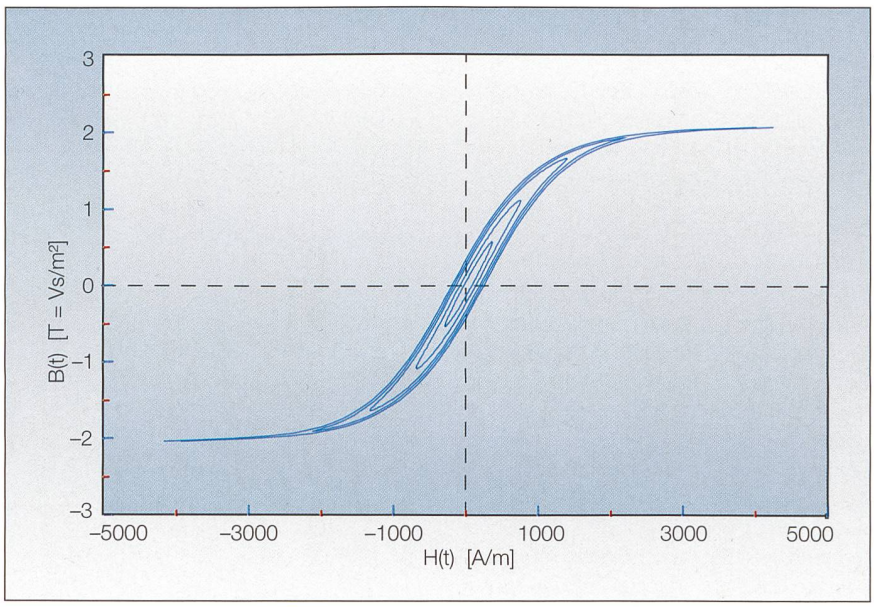


Bild 10 Typische Hysteresekurve eines Spannungswandlerkerns mit Luftspalt, berechnet für eine Frequenz von 50 Hz.

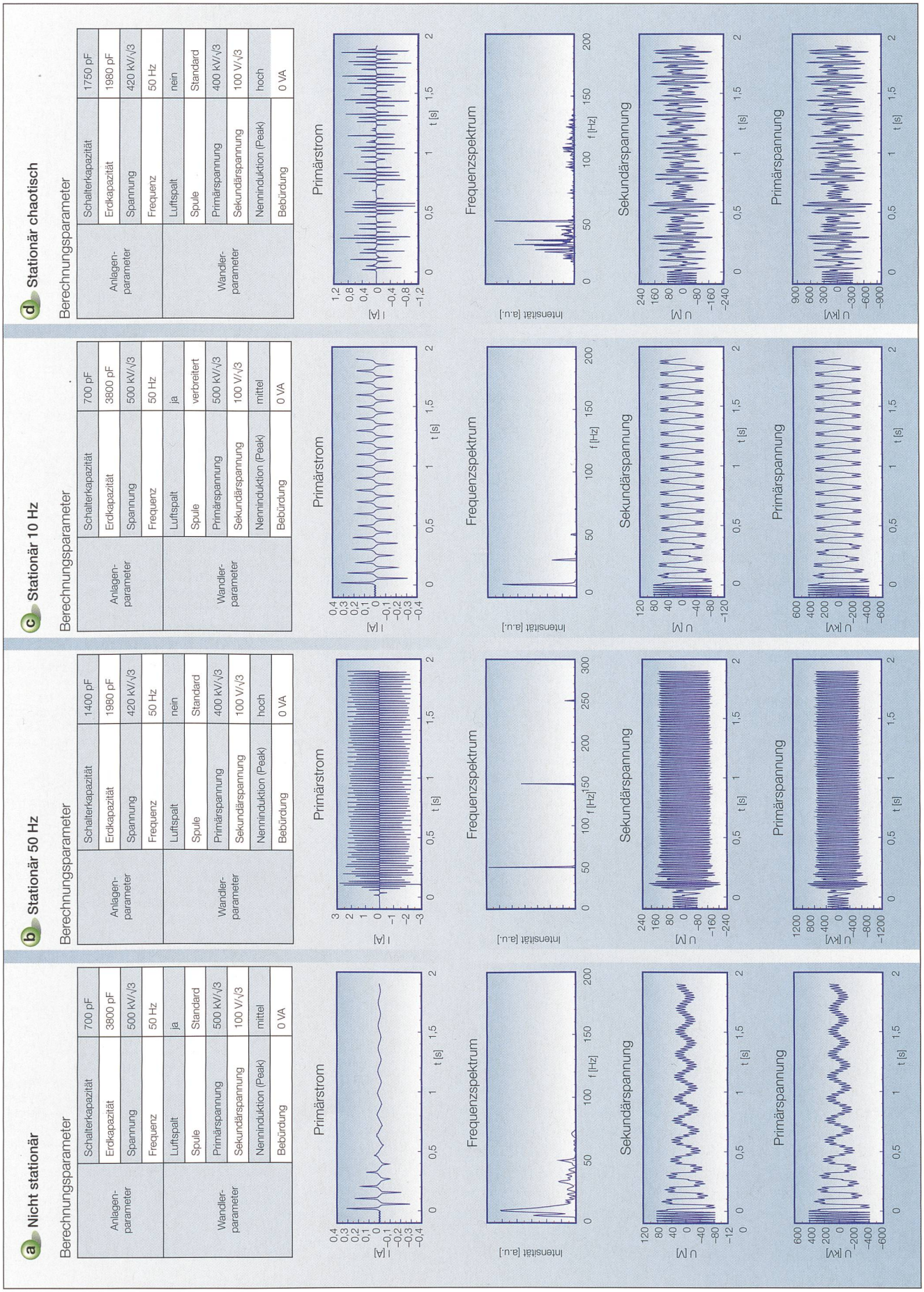


Bild 11 Primärstrom, Spektrum und Spannungsverläufe von modellierten Ferroresonanzschwingungen.

Werte für eine 420-kV-Anlage sind einige 10 MΩ bis hin zu einigen GΩ.

Beispiele für Simulationsergebnisse

Je nach Kreisparameter können im Wesentlichen 4 verschiedene Ferroresonanzmodi unterschieden werden. In den Berechnungsbeispielen wird das Leitungsfeld mit dem Leistungsschalter im Spannungsmaximum (Zeitpunkt 0) der dargestellten Phase ausgeschaltet.

- Fall 1: Nicht stationäre (transiente) Ferroresonanzschwingungen (Anregungssituation, die zu einer abklingenden Ferroresonanzschwingung führt).
- Fall 2: Stationäre netzfrequente Ferroresonanzen.
- Fall 3: Stationäre subharmonische Ferroresonanzschwingungen.
- Fall 4: Stationäre chaotische Ferroresonanzschwingungen.

Als Erstes ein Beispiel für den Fall 1, einer nicht stationären (transienten) Ferroresonanzschwingung (Bild 11a): Bei ausreichend hohen Kreisverlusten bzw. zu geringer Energieeinkopplung in den Ferroresonanzkreis kommt es zu einer abklingenden, nicht stationären (transienten) Ferroresonanzschwingung. Diese ist als Ausgleichsvorgang aus physikalischen Gründen unvermeidlich und für den Wandler unkritisch. Charakteristisch ist ein breites «kontinuierliches» Frequenzspektrum mit der Mischung unterschiedlicher Frequenzanteile und einer ausgeprägten Subharmonischen.

Die Ferroresonanzschwingung klingt exponentiell ab. Sichtbar ist ausserdem eine überlagerte 50-Hz-Schwingung, deren Amplitude sich aus der Spannungsaufteilung über der Koppel- und der Erdkapazität ergibt.

Stationäre netzfrequente Ferroresonanz

Bei einer stationären Ferroresonanzschwingung reichen die Kreisverluste nicht aus, um die angeregte Schwingung zu bedämpfen, und die Energieeinkopplung überwiegt (Bild 11b). In diesem Ferroresonanzmodus kann es aufgrund der netzfrequenten Schwingungsform je nach Kapazitätsverhältnissen zu hohen Überspannungen kommen. Charakteristisch für das Frequenzspektrum ist das dominante Auftreten der anregenden Frequenz (hier 50 Hz). Aufgrund der Sättigungserscheinung des Kerns ist weiterhin die 3. Harmonische als Spitze zu beobachten.

Stationäre subharmonische Ferroresonanz

Bei Einsatz von Spannungswandlern mit Luftspaltkern können die oftmals mit hohen Überspannungen einhergehenden netzfrequenten Ferroresonanzschwingungen vermieden werden, und es treten nur subharmonische Ferroresonanzschwingungen auf (Bild 11c). Im Frequenzspektrum dominant tritt die jeweils relevante Subharmonische auf. Am häufigsten ist dabei die 3., 5. usw. Subharmonische zu beobachten.

Stationäre chaotische Ferroresonanz

In seltenen Fällen kann es auch zu chaotischen Schwingungsformen kommen (Bild 11d). In diesem Fall können die auftretenden Spannungen wiederum höher ausfallen als für die subharmonische Erscheinungsform. Im Frequenzspektrum ist wiederum ein kontinuierlicher Bereich, d.h. ein Mischen eines breiten Frequenzspektrums, zu erkennen.

Referenzen

[1] Bräunlich R., Däumling H., Hofstetter M., Prucker U., Schmid J., Minkner R., Schlierf H.-W.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen, Teil 1: Definitionen und allgemeine Erklärungen; Bulletin SEV/AES 23/2006.

[2] Bräunlich R., Däumling H., Hofstetter M., Prucker U., Schmid J., Minkner R., Schlierf H.-W.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen Teil 2: Fallbeispiele; Bulletin SEV/AES 24/25 2006.

[3] Bräunlich R., Däumling H., Hofstetter M., Prucker U., Schmid J., Minkner R., Schlierf H.-W.: Ferroresonanz an 220/420-kV-Spannungswandlern bei Schalthandlungen; ETZ, Heft 7/2007, S. 36–41.

Zu Galerkin:

[4] Kieny C., Le Roy G., Sbai A.: Ferroresonance Study using Galerkin Method with Pseudo-Arclength Continuation Method; IEEE Trans. Power Delivery; vol. 6, no. 4, 1991.

[5] Germond A.: Computation of ferroresonant overvoltages in actual power systems by Galerkin's method; Proc. IEEE PICA Conf., New Orleans, LA, June 1975, pp. 127–135.

Stabilitätsanalyse, Phasenraum:

[6] David A., Jacobson N., Lehn P. W., Menzies W.: Stability Domain Calculations of Power Delivery; vol. 17, no. 3, July 2002.

[7] van Craenenbroeck T., van Dommelen D., Driesen J., Belmans R.: Application of the harmonic balance method to study ferroresonance in voltage transformers, ISH 99, London.

[8] Iravani M.R., et.al.: Modeling and Analysis Guidelines for slow transients – Part III: The Study of Ferroresonance, IEEE Trans Power Delivery, vol. 15, no. 1, Jan. 2000.

Résumé

Oscillations de résonance ferromagnétique dans les réseaux à haute et moyenne tension

3e partie: paramètres des circuits à résonance ferromagnétique et méthodes d'analyse. On entend par résonance ferromagnétique des oscillations non linéaires pouvant apparaître sur les réseaux haute tension dans certaines configurations ou états de commutation, ceci en présence d'appareils inductifs et capacitifs. Si des transformateurs de tension sont installés, ils risquent d'être détruits par surcharge thermique due aux oscillations ferromagnétiques. Ce phénomène n'est cependant pas toujours reconnu comme tel étant donné qu'il peut se présenter sous différentes formes. L'article est la 3e partie d'une série de 4 articles sur le problème de la résonance ferromagnétique dans les réseaux à haute et moyenne tension. Il est consacré aux critères de risques dus aux oscillations ferromagnétiques et expose la manière de reconnaître ces oscillations.

Angaben zu den Autoren

Dr. *Reinhold Bräunlich* ist seit 1990 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 SF_6-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 Trench-Gruppe 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] Die Autoren dieses Beitrags sind gleichzeitig die Mitglieder der Arbeitsgruppe Ferroresonanz.

himmelblau

imprägnierwerk willisau

Herzlichen Dank...

...für die angenehme und erfolgreiche Zusammenarbeit im 2008.

Ihr Team vom Imprägnierwerk Willisau

Imprägnierwerk AG Willisau • Ostergauerstrasse 10 • 6130 Willisau
Tel. 041 970 11 76 • info@impraegnierwerk.ch • www.impraegnierwerk.ch

Heute schon eine Chance eröffnet?

Das Nachwuchsförderungsprogramm «New Generation» des swissT.net arbeitet für die Zukunft der Technologiebranche. www.swisst.net

Jetzt.

swissT.net
swiss technology network
Wirkt im Kleinen bewegt im Grossen.

Finis les chemins à grille, les chemins de câbles et les **conduites montantes!**

Il existe maintenant les Multi-chemins LANZ: un chemin pour tous les câbles

- Les Multi-chemins LANZ simplifient la planification, le métré et le décompte!
- Ils diminuent les frais d'agencement, d'entreposage et de montage!
- Ils assurent de meilleurs profits aux clients: excellente aération des câbles
- Modification d'affectation en tout temps. Avantageux. Conformes aux normes CE et SN SEV 1000/3.

Pour des conseils, des offres et des livraisons à prix avantageux, adressez-vous au grossiste en matériel électrique ou directement à

lanz oensingen sa e-mail: info@lanz-oens.com
CH-4702 Oensingen • Tél. 062/388 21 21 • Fax 062/388 24 24

kf 5