

Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen

Teil 4: Behebung von Ferroresonanzschwingungen

Ferroresonanzerscheinungen in Hochspannungsnetzen sind nicht lineare Schwingungen, die in Zusammenhang mit induktiven Apparaten und Kapazitäten auftreten können. In gewissen Anlagenkonfigurationen bzw. Schaltzuständen kann durch kapazitive Kopplung mit der Netzspannung ein Spannungswandlernkern periodisch in Sättigung geraten, wodurch komplexe, nicht lineare Schwingungen auftreten können. Werden diese nicht erkannt und gestoppt, können die betroffenen Spannungswandler durch thermische Überlastung zerstört werden. In den drei vorausgegangenen Beiträgen [1–3] wurden die Mechanismen der 1- und 3-phasigen Ferroresonanz aufgezeigt sowie die Auftretenskriterien und die Untersuchungsmethoden. Der letzte Beitrag geht nun auf die Vermeidung von Problemen mit Ferroresonanzschwingungen ein.

Es liegt auf der Hand, dass die Frage der Ferroresonanzschwingungen bereits in der Planungsphase einer neuen Schaltanlage miteinbezogen werden sollte – ebenso bei

R. Bräunlich, H. Däumling, M. Hofstetter, U. Prucker, J. Schmid, H.-W. Schlierf, R. Minkner¹⁾

einem Erneuerungsprojekt. Durch eine entsprechende Auslegung der Schaltanlagen und deren Komponenten kann das Auftreten solcher Schwingungen weitgehend vermieden werden. In vielen Fällen gelingt die Verhinderung von Ferroresonanzschwingungen aber auch durch betriebliche Massnahmen, wie durch die Festlegung diesbezüglich sicherer Schaltprozeduren. Schliesslich existiert eine weite Palette von Mitteln, die ergrif-

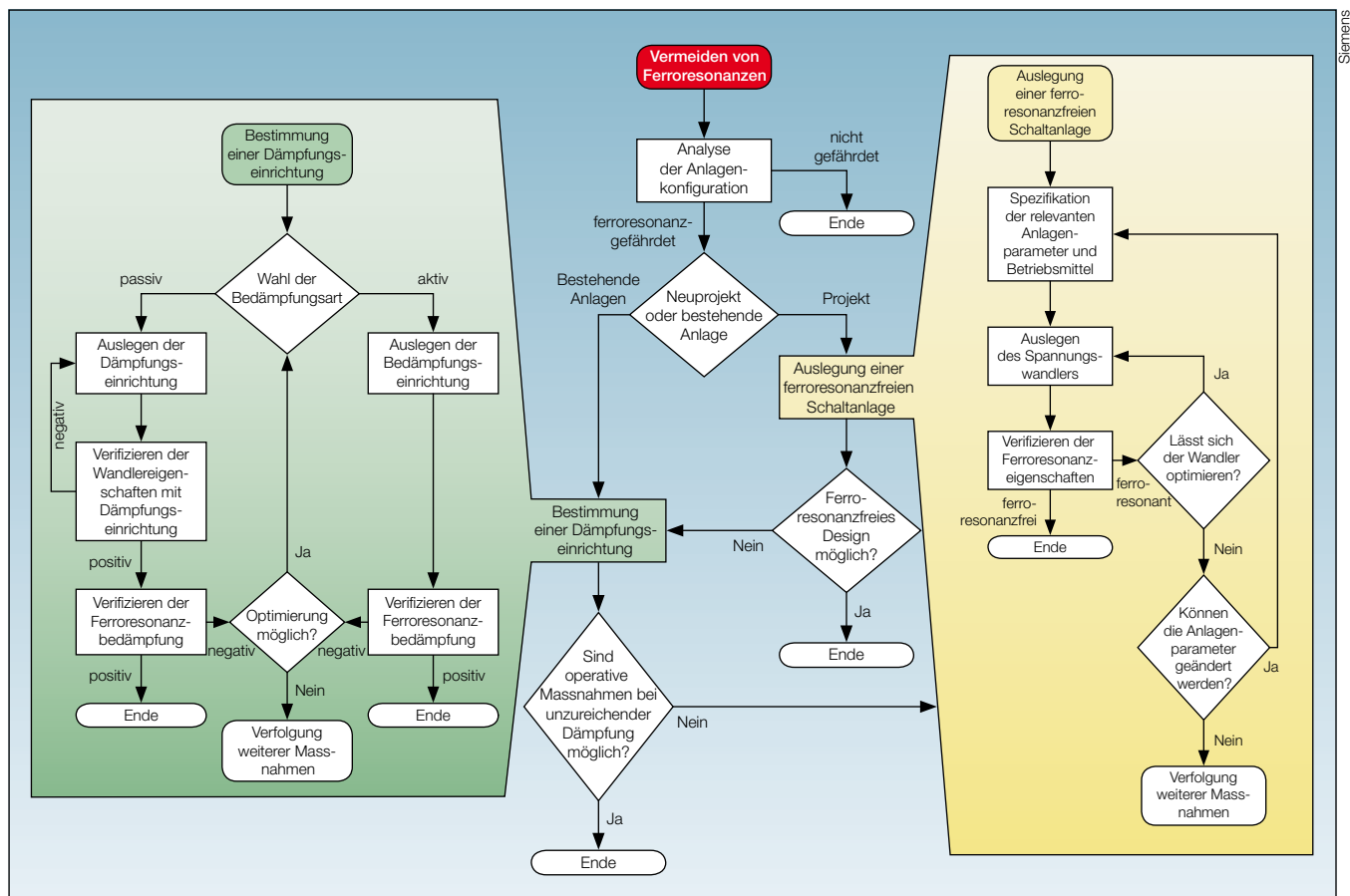


Bild 1 Signalfusspläne für die Analyse und Vermeidung der Ferroresonanz.

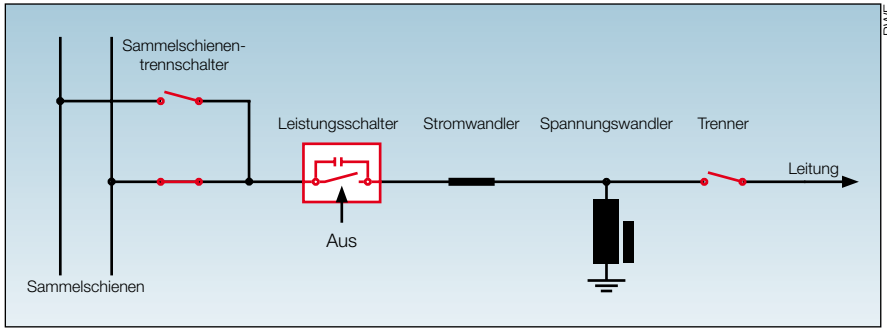


Bild 2 1-poliges Ersatzschaltbild für 1-phasige Ferroresonanz.
Ausschaltung eines Leistungsschalters mit Steuerkondensatoren bei ausgeschaltetem Leitungstrennschalter und eingeschaltetem Sammelschienen-trennschalter.

fen werden können, wenn das Auftreten von Ferroresonanzschwingungen erst später im Betrieb festgestellt wird oder wenn es gar zu Schadensfällen gekommen ist.

Oft reicht eine Einzelmassnahme nicht aus. In diesem Fall ist zu berücksichtigen, dass die Massnahmen sich auch gegenseitig beeinflussen können.

Übersicht über die Gegenmassnahmen

Der vorliegende Beitrag geht insbesondere auf folgende Massnahmen gegen Ferroresonanzschwingungen ein:

- Vermeidung durch kontrollierte Schalthandlungen
- Reduktion der Anregungsleistung (kleine Koppelkapazität)
- Vergrössern oder Verkleinern der Erdkapazitäten (muss durch Simulation oder Messung abgeklärt werden)
- Anpassung der Nennbürde an den tatsächlichen Bedarf bzw. Ausnützen der verfügbaren Bürdenleistung
- Optimierung der nicht linearen Magnetisierungscharakteristik des Spannungswandlers
- Einsatz einer zusätzlichen Bedämpfungseinrichtung auf der Sekundärseite von Wandlern
- Bei 3-phasigen Ferroresonanzkonfigurationen: Einfügung eines bedämpften Spannungswandlers am unterspannungsseitigen Sternpunkt des Netzkuppeltrafos.

Bild 1 zeigt Signalfusspläne als Hilfsmittel für die Vorgehensweise zur Analyse und Vermeidung von Ferroresonanz. Zu Beginn des Prozesses steht die prinzipielle Beurteilung der Anlage bezüglich einer 1-phasigen bzw. 3-phasigen Ferroresonanzgefährdung. Hier werden mögliche kritische Schaltzustände identifiziert und weitere Massnahmen spezifiziert. Zunächst muss zwischen der Vorgehensweise bei einer bestehenden Anlage (linker Ast des Hauptsignalfussplans in der Mitte) und einer zu projektie-

renden Schaltanlage (rechter Ast) unterschieden werden.

Bestehende Anlagen

In einer bestehenden Anlage können Ferroresonanzschwingungen ohne Umbaumaassnahmen nur durch externe Dämpfungseinrichtungen oder operative Massnahmen vermieden werden. Gelingt es nicht, ein bestehendes Problem mithilfe einer externen Dämpfungseinrichtung zu beheben, so muss geprüft werden, ob stationäre Ferroresonanzen durch operative Massnahmen wie Ausschluss von kritischen Schaltzuständen bzw. Schalthandlungen, wie sofortiges Betätigen des Trennschalters zur Unterbrechung der weiteren Energieeinkopplung, vermieden werden können. Sind diese Massnahmen nicht erfolgreich, so muss die Anlagenkonfiguration dementsprechend verändert werden.

Projekt

Bei der Neuprojektierung oder Erweiterung einer Anlage können stationäre Ferro-

resonanzschwingungen bereits in der Planungsphase durch das Anlagendesign vermieden werden beziehungsweise durch die Abstimmung der einzelnen Betriebsmittel aufeinander. Aufgrund ökonomischer und technischer Zwänge (grosse Kapazitäten der Steuerkondensatoren der Schalter zur Beherrschung hoher Kurzschlussströme oder die Forderung nach einer hohen Klassengenauigkeit bei gleichzeitig hoher Bürdenleistung) ist die Ausschöpfung aller Massnahmen gegen Ferroresonanz beim Design des Spannungswandlers nicht immer möglich. In diesen Fällen können stationäre Ferroresonanzschwingungen meist durch eine speziell auf den Wandler abgestimmte externe Dämpfungseinrichtung vermieden werden.

Bei der Neuprojektierung oder Erweiterung von Schaltanlagen besteht die Möglichkeit, das Ferroresonanzverhalten im Vorfeld zu untersuchen und durch eine gezielte Spezifikation der Betriebsmittel positiv zu beeinflussen. Der rechnerische Nachweis ist nach heutigem Stand nur für 1-phasige Ferroresonanzkonfigurationen mit der geforderten Zuverlässigkeit realisierbar. In allen Fällen kann aber eine experimentelle Überprüfung in der betreffenden Anlage selbst bzw. exemplarisch an einer für den Betreiber typischen Referenzanlage erfolgen.

Im Falle eines negativen Verifizierungsergebnisses besteht bei 1-phasiger Ferroresonanz die Möglichkeit, die Auslegung des Wandlers zu optimieren oder, falls dies für die zugrunde gelegte Spezifikation nicht möglich ist, die Spezifikationen von Wandler und Leistungsschalter dementsprechend zu ändern. Fällt dies ebenso ausser Betracht, so werden die oben erwähnten

fachbeiträge

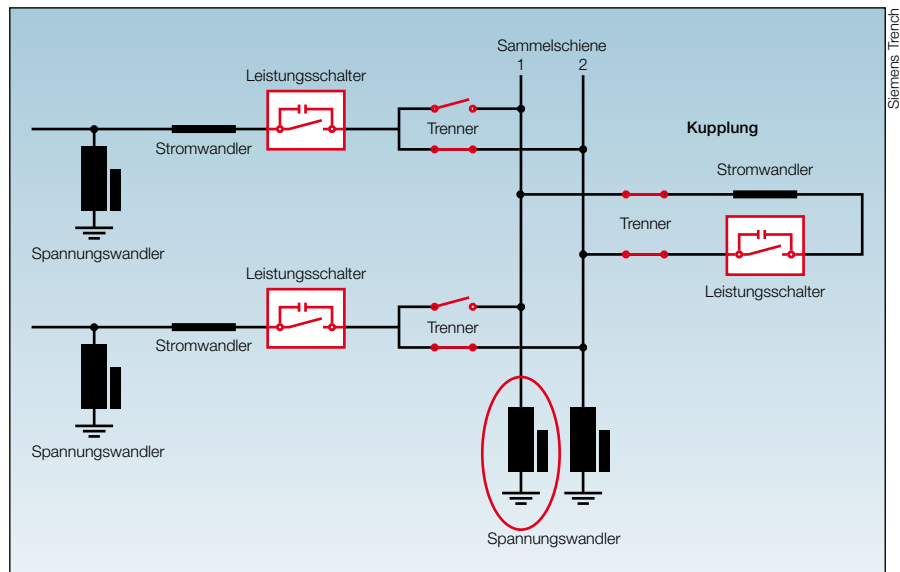


Bild 3 1-poliges Netzersatzschaltbild für 1-phasige Ferroresonanz.
Abschaltung einer Sammelschiene mit induktiven Spannungswandlern durch Leistungsschalter mit Steuerkondensatoren und eingeschalteten Sammelschienen-trennschaltern.

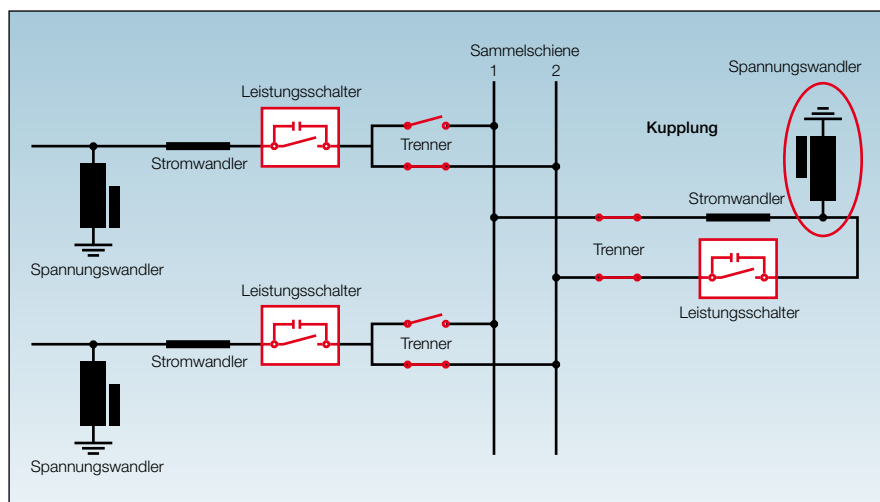


Bild 4 1-poliges Netzersatzschaltbild für 1-phasige Ferroresonanz.

Abschaltung einer Kupplung mit induktiven Spannungswandlern durch Leistungsschalter mit Steuerkondensatoren und eingeschalteten Sammelschientrennschaltern.

externen Dämpfungseinrichtungen an den Spannungswandler-Sekundärklemmen zur Unterdrückung stationärer Ferroresonanzschwingungen herangezogen.

Zunächst kann zwischen einer aktiven bzw. passiven Dämpfungseinrichtung unterschieden werden. Bei einer aktiven Dämpfungseinrichtung wird das dämpfende Bauteil bei Auftreten einer Ferroresonanzschwingung durch eine Steuereinrichtung zugeschaltet. Eine passive Dämpfungseinrichtung kommt ohne Steuereinheit aus, wobei das dämpfende Glied permanent zugeschaltet ist. Die Dämpfungsmöglichkeiten werden weiter unten beschrieben. Da eine passive Dämpfungseinrichtung permanent an den Spannungswandler angeschlossen ist, muss natürlich die Einhaltung der Klassenanforderungen mit angeschlossener Dämpfungseinrichtung verifiziert werden.

Schaltmassnahmen

Generell gilt, dass die Ferroresonanzschwingungen nur dann angeregt werden können, wenn Netzteile abgetrennt und nicht geerdet werden. Dabei ist besonders auf Schaltungen für Prüfungen zu achten.

Bei einer 1-phasigen, stehenden Ferroresonanzschwingung in einer Konfiguration nach Bild 2 gibt es 3 Möglichkeiten, die Schwingung zu beseitigen. Zum einen kann der Leistungsschalter wieder eingeschaltet werden, um die Wandler mit dem Netz zu verbinden. Dies gewährleistet allerdings nicht, dass bei der nächsten Ausschaltung keine Ferroresonanzschwingung auftritt. Ausserdem kann der Sammelschientrennschalter ausgeschaltet werden, sofern die Verriegelungsbedingungen es zulassen. Das ist möglich, da nur ein geringer Strom fliesst. Schliesslich kann auch der Leitungs-

trennschalter zugeschaltet werden, sofern die Verriegelungsbedingungen es zulassen. Gleichartige Anregebedingungen gelten auch für das Abschalten von leerlaufenden Sammelschienen mit induktiven Sammelschienen Spannungswandlern (Bild 3).

Das Betreiben der Kupplung mit geschlossenen Trennschaltern und geöffnetem Leistungsschalter ist zu vermeiden, wenn der Leistungsschalter Steuerkondensatoren hat. Diese Konfiguration kann zu Ferroresonanz des Sammelschienen Spannungswandlers (Bild 3, unten) mit der Kapazität des Steuerkondensators des Kupplungsschalters führen. Deshalb müssen die Trennschalter unmittelbar nach dem Öffnen des Kupplungsschalters geöffnet werden. Dies gilt auch beim Abschalten von gekoppelten Sammelschienen (Spannungswandler im Kuppelfeld, Bild 4).

Eine weitere Gefahrensituation, in der stehende 1-phasige Ferroresonanzschwingungen entstehen können, ist gegeben, wenn ein leerlaufender Leitungsabschnitt durch kapazitive Kopplung von andern Stromkreisen höherer Spannungsebenen beeinflusst wird (Bild 5). Bei der beeinflus-

ten Leitung wurde nur eine Phase gezeichnet. In der Praxis kann eine Ferroresonanzanregung auch auf mehr als einer Phase der beeinflussten Leitung auftreten. Bei Leitungen, die durch den Leistungsschalter ausgeschaltet sind, sollten deshalb die Spannungswandler durch Öffnen der Trennschalter oder durch Erdung der Leitungen spannungsfrei geschaltet werden.

Bei 3-phasiger Ferroresonanzschwingung ist der Anregevorgang spannungsabhängig. Deshalb soll die Zuschaltung des Transformators über die Oberspannungsseite bei der kleinsten Unterspannung erfolgen, gegeben durch den Stufenschalter. Sollte trotzdem eine 3-phasige Ferroresonanzschwingung auftreten, muss das unterspannungsseitige Netz nach der nötigen Spannungsanpassung möglichst schnell zugeschaltet werden.

Sollte die Ferroresonanzschwingung auch dann noch bestehen bleiben oder eine umgehende unterspannungsseitige Zuschaltung nicht möglich sein, so muss der oberspannungsseitige Leistungsschalter des Transformators wieder ausgeschaltet werden.

Auslegung der Spannungswandler

Durch das Einfügen eines Luftspalts in den Spannungswandlerkern wird die Magnetisierungskennlinie linearisiert (vgl. Bild 10 in [3]) und der Neigungswinkel reduziert. Bei grosser Magnetisierung infolge Schalthandlungen tritt die Sättigung dann weniger abrupt auf, wodurch bei gezielter Auslegung des Wandlers bei vielen Anlagenkonfigurationen eine Ferroresonanz vermieden werden kann.

Wesentlich für die natürliche Dämpfung auftretender Ferroresonanzschwingungen ist die Frage der Bebürdung. Wandler, die für eine hohe Messleistung dimensioniert sind, aber nur mit geringer Bürdenleistung betrieben werden, sind bei ungünstigen Anlagenkonfigurationen bezüglich Ferroresonanz nicht ausreichend bedämpft.

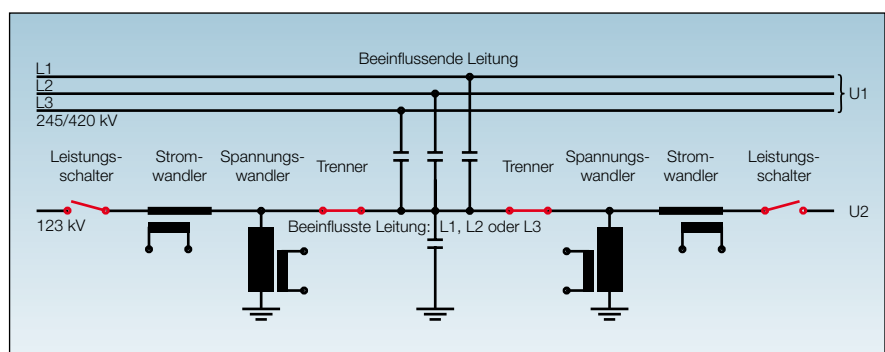


Bild 5 Beispiel eines 1-poligen Netzersatzschaltbilds für 1-phasige Ferroresonanz. Beeinflussung durch parallele Stromkreise einer höheren Spannungsebene.

Auftreten von Ferroresonanz		Nach Schaltbild	Netzschaltungen, bei denen Ferroresonanz auftritt	Bedingung für die Anregung Energieeinkopplung	Erkennen sofortige Abhilfemassnahme
<p>Wahrscheinlichkeit: hoch</p> <p>1-phasige Ferroresonanz im starr geerdeten Netz</p>		<p>Voraussetzung nicht gegeben</p>			
Abgang (Leitung, Kabel)	Zwischen LS und offenem Abgangstromschalter: Spannung von der Sammelschiene	LS ohne Steuerkondensatoren	Bei Prüfschaltung (Überprüfung des Schutzes, Wartung des LS) Durch Ausschaltung des LS	Je grösser die Steuerkapazität des LS und je kleiner die Energieeinkopplung über Steuerkapazität des LS	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz) LS sofort wieder einschalten oder Sammelschienenstromschalter ausschalten
Sammelschiene	Mehrere parallele LS mit grosser Kapazität der Steuerkondensatoren	Ein-, zwei LS mit kleiner Kapazität des Steuerkondensators	Normalbetrieb (Sammelschienenfehler, leeraufende Sammelschiene) Prüfschaltungen durch Ausschaltung des LS	LS mit Steuerkondensatoren u induktive Spannungswandler in der SS Energieeinkopplung über Steuerkapazität des LS	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz) LS sofort wieder einschalten oder Sammelschienenstromschalter ausschalten
Kupplung	LS mit grosser Kapazität der Steuerkondensatoren	LS mit kleiner Steuerkapazität	Normalbetrieb (Abschaltung LS und Trennschalter in Ein) durch Ausschaltung des LS	Je grösser die Steuerkapazität des LS und je kleiner die Energieeinkopplung über Steuerkapazität des LS	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz) LS sofort wieder einschalten oder Sammelschienenstromschalter ausschalten
Kupplung	LS mit grosser Kapazität der Steuerkondensatoren	Wandler vor oder nach geschlossenem Leitungstromschalter bei ausgeschalteter langer Leitung oder LS ohne Steuerkondensatoren	Normalbetrieb Nach erfolgloser Wiedereinschaltung durch Ausschaltung des LS	Je grösser die Steuerkapazität des LS und je kleiner die Energieeinkopplung über Steuerkondensatoren aller LS an den Leitungsenden	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz) Spannungszufuhr über Trennschalter unterbrechen
Leeraufende Leitung auf Masten mit Stromkreisen höherer Spannungen	LS in Aus und Trennschalter in Ein (meist abhängig von der Leitungslänge)	Trennschalter in Aus (evtl. Leitung geerdet)	Normalbetrieb durch Ausschaltung des letzten LS der Leitung	Kapazitive Einkopplung von höherer Spannungsebene (Leitungsanordnung bei Mehrfachstromkreisen auf einem Mast)	Spannungsüberwachung (Wert, Frequenz) Erden der leeraufenden Leitung ¹⁾
<p>Wahrscheinlichkeit: mittel</p> <p>3-phasige Ferroresonanz im isolierten Netz</p>		<p>Wahrscheinlichkeit nicht gegeben</p>			
Netzkupelltrafo	Wandler nahe am Trafo zwischen Trafo und offenem LS auf US-Seite	Wandler in grösserer Entfernung zwischen Trafo und offenem LS auf US-Seite	Normalbetrieb Zuschalten des LS auf der OS-Seite bei hohen Spannungen auf der US-Seite	Hohe Spannung auf der US-Seite und niedrige Erdkapazität Wandler mit hoher Induktion Energieeinkopplung über Trafo, je nach Stellung des Stufenschalters	Spannung und Frequenz beobachten, evtl. Erdschlussmeldung Zuschalten des Netzes mit der geringsten Spannung ²⁾
	Intermittierende Erdschlüsse im Mittelspannungsnetz		Normalbetrieb intermittierende Erdung durch Lichtbogen	Energieeinkopplung über Trafo	Erdschlussmeldung ²⁾
	Aufhebung der Erdung in «starr» geerdeten Netzen durch Wegschalten von Netzteilen bei Störungen	Aufhebung der Erdung in «starr» geerdeten Netzen durch Wegschalten von Netzteilen bei Störungen	Normalbetrieb Ausschalten des LS	Energieeinkopplung über Trafo	Frequenzabweichungen; Zuschalten des Netzes nicht mehr möglich ²⁾
	Wandler zwischen Trafo und offene LS auf OS-Seite, wenn die Erdung aufgehoben auf der OS-Seite (Stempunktterdter ausgeschaltet)	Hochstufen des Stufenschalters	Normalbetrieb Sprungharte Spannungsänderung Sonderbetrieb (Betrieb des Transformators von der Unterspannungsseite her) Zuschalten des LS von der US-Seite (Mittelspannungsseite)	Energieeinkopplung über Trafo Spannungswandler auf der OS-Seite zwischen Trafo und LS über US-Seite des Trrafos an Spannung Zuschalten des Trrafos an Energieeinkopplung über Trafo, je nach Stellung des Stufenschalters, falls US-seitig vorhanden	Erdschlussmeldung ²⁾ Auf der OS-Seite Spannung und Frequenz beobachten Stempunkt OS-Seite erden

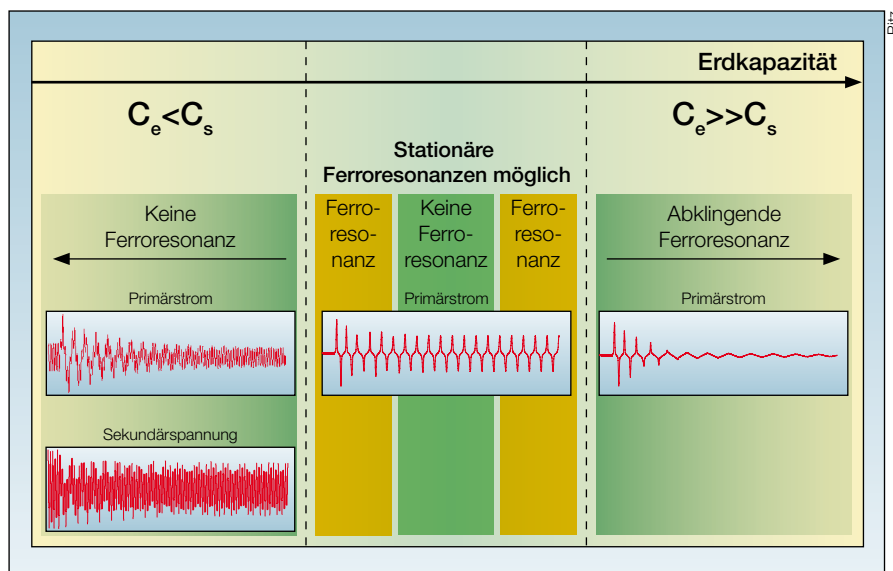


Bild 6 Einfluss der Leistungsschalter-Steuerkapazität.

Die Spezifikation der Spannungswandler sollte von zu hohen und oftmals nicht benötigten Forderungen bzgl. Bürdenleistung und ggf. Klassengenauigkeit absehen, da dadurch der Spielraum in der Wandlerauslegung bzgl. der Vermeidung von Ferroresonanzen durch Senkung der Induktion bzw. Verschiebung der Magnetisierungskurve (U-I-Charakteristik) zu höheren Strömen hin erheblich eingeschränkt wird. Die «Ferroresonanzfreiheit» kann für den spezifizierten Parameterbereich der Anlage entweder experimentell oder durch ein geeignetes Rechenverfahren nachgewiesen werden.

Auslegung der Schaltfelder

Die schwingungsanregende Steuerkapazität, die Erdkapazitäten und die magnetische Charakteristik des Spannungswandlers stehen grundsätzlich in einer Wechselbeziehung. Es existieren gewisse Bereiche von Wertekombinationen, in denen stationäre Ferroresonanzschwingungen möglich sind. Die Neigung dazu hängt insbesondere vom Verhältnis der Steuerkapazität des Leistungsschalters zur Erdkapazität ab. Dabei werden 3 Fälle unterschieden: keine Ferroresonanzanregung, stationäre Ferroresonanzschwingung und abklingende Ferroresonanzschwingung (Bild 6). Insbesondere wenn mehrere Leistungsschalter parallel auf einen Sammelschienen-Spannungswandler wirken, wird die Vermeidung

von Ferroresonanzschwingungen oft schwer beherrschbar.

Dämpfung 1-phasiger Ferroresonanz

Die notwendige Bedämpfung auf der Sekundärseite muss jeweils individuell für die vorliegende Netzsituation bestimmt werden. Entsprechende Beschaltungen werden aufgrund dieser Abklärungen ausgewählt (Bild 7). Abklingende Verläufe der Sekundärspannung und des Stroms in der Primärwicklung des Spannungswandlers zeigt das Oszillogramm in Bild 8.

In der Praxis werden zur Schwingungsdämpfung über einer Sekundärwicklung des Spannungswandlers Widerstände oder Sättigungsdrosseln oder auch Kombinationen davon angeschlossen. Weiter kann zur Bedämpfung auch ein Serie- oder Parallelresonanzkreis verwendet werden. Ersterer ist abgestimmt auf die Frequenzen der Ferroresonanz, Letzterer auf die Betriebsfrequenz. Und nicht zuletzt können Dämpfungsglieder auch kurzzeitig elektronisch zugeschaltet werden.

Das Ergebnis einer Simulation von Petersen und Umlauf [5] zeigt in Bild 9, dass

bei ausreichend kleinem Dämpfungswiderstand im Sekundärkreis Ferroresonanzschwingungen vermieden werden können. Sie zeigt dabei auch den Einfluss der Steuer- und Erdkapazität. In der Regel werden die Bedämpfungseinrichtungen bei 1-phasiger Ferroresonanz an einer Sekundärwicklung der Spannungswandler in jeder Phase einzeln angebracht.

Wenn der Dämpfungswiderstand an der Sekundärwicklung des Wandlers so klein gewählt werden muss, dass die Genauigkeitsklasse beeinträchtigt wird, kann eine dämpfende Beschaltung gewählt werden, die möglichst nur im Ferroresonanzfall wirkt und sonst den Messwandlerkreis unbeeinflusst lässt. Als eine der Standardlösungen werden Dämpfungsdrosseln an die Sekundärwicklungen der Spannungswandler angeschlossen, die im Ferroresonanzfall in Sättigung gehen und dann Energie absorbieren.

Aufwendiger ist der Einsatz eines Ferroresonanzschutzrelais, welches das Auftreten von Ferroresonanzschwingungen detektiert und kurzzeitig einen niederohmigen Dämpfungswiderstand elektronisch zuschaltet. Der Widerstand wird wieder abgeschaltet, wenn die Ferroresonanz abgeklungen ist [6]. Treten die Ferroresonanzen nur bei Schalthandlungen auf, so bieten sich auch Schalter-Hilfskontakte für ein temporäres Zuschalten der Widerstände an.

Dämpfung 3-phasiger Ferroresonanz

Die am häufigsten gewählte Variante der 3-phasigen Ferroresonanzdämpfung auf der Sekundärseite zeigt Bild 10. Die Spannungswandler-Sekundärwicklungen zur Erdschlusserkennung werden zum Dreieck zusammengeschaltet, wobei eine dämpfende Impedanz mit in Reihe geschaltet wird. Als Impedanzen kommen je nach Netzsituation einfache Widerstände, Sättigungsdrosseln oder elektronische Lasten zum Einsatz. Auch bei dieser Lösung ist der Erdschlussfall zu berücksichtigen.

Mit zunehmender Erdkapazität C_e werden tiefe subharmonische Frequenzen angeregt. Damit verringern sich die Spannun-

← Tabelle Zusammenstellung Ferroresonanzschwingungen, Anlagenkonfigurationen, Erkennung und Abhilfe.

¹⁾ In betroffenen Phasen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Wandler an beiden Leitungsenden betroffen.
²⁾ Bei 3-phasiger Ferroresonanz sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die Wandler aller 3-Phasen beschädigt.

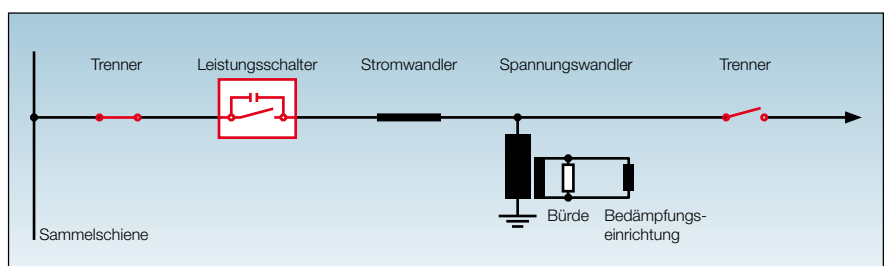


Bild 7 Bedämpfung 1-phasiger Ferroresonanzschwingungen durch Anschluss einer Bedämpfungseinrichtung.

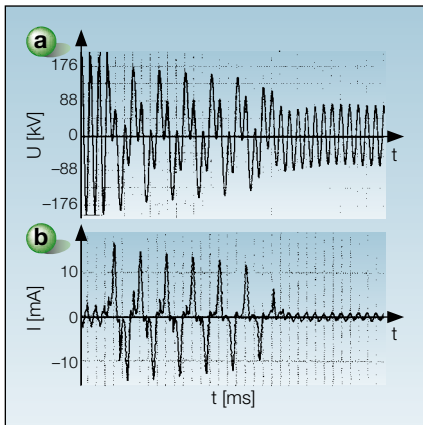


Bild 8 Abklingende Ferroresonanzschwingung durch Dämpfung.

a) Spannung an der Sekundärwicklung,
b) Strom durch die Primärwicklung.

gen an der offenen Dreieckswicklungsschaltung. Ebenso wie im Ferroresonanzfall tritt im isolierten Netz an der Impedanz auch im Erdschlussfall eine Spannung auf. Bei der Auslegung der Impedanz muss deshalb darauf geachtet werden, dass diese im Erdschlussfall nicht überlastet wird.

In Anlagen, in denen später eine Dämpfungsdrossel zur Ferroresonanzbedämpfung in die offene Dreieckswicklung geschaltet werden muss, kann es in speziellen Fällen vorkommen, dass diese nicht gleichzeitig für eine ausreichende Ferroresonanzdämpfung und für einen sicheren Erdschlussbetrieb ausgelegt werden kann (zu grosse Verluste im Erdschlussfall). In diesem Fall kann die Dämpfungsdrossel (Bild 10) nicht dauernd angeschlossen sein, da die Verlustleistung zu gross ist. Somit muss die Drossel bei einer Ferroresonanzschwingung elektronisch zugeschaltet werden [6] oder es kann ein auf die Ferroresonanzfrequenz abgestimmter Serienresonanzkreis eingesetzt werden.

Im zweiten Fall (Bild 11) dämpft eine Einrichtung das System, die unterspannungsseitig des Netzkupplerttransformators im Sternpunkt gegen Erde geschaltet wird.

Der Spannungswandler und die Dämpfungseinrichtung müssen der höchsten auftretenden Spannung im Sternpunkt angepasst sein, die im Erdschlussfall vorliegt.

Schlussfolgerung

Die Tabelle zeigt eine Übersicht über die praxisrelevanten Ferroresonanzsituationen. Dabei sind die Eigenschaften, das Gefährdungspotenzial und die möglichen Gegenmassnahmen zusammengestellt. Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei Abänderungen der Netzkonfiguration, Ersatz von Komponenten und/oder Anpassung der Schaltprogramme Ferroresonanzschwingungen auftreten können, die bisher nicht festzustellen waren. Dabei sind insbesondere folgende Modifikationen in Betracht zu ziehen:

- Vergrösserung der Steuerkondensatoren von Lastschaltern zur Erhöhung der Abschaltleistung
- Änderung der Erdkapazitäten durch Umbau von Anlagenteilen, z.B. Änderung einer Kabelverbindung
- Änderung der Betriebsspannung eines Freileitungs-Übertragungssystems auf einem Mast mit weiteren Übertragungssystemen
- Austausch von Betriebsmitteln (Lastschalter, Wandler, Trafo)
- Aufbau von Bauprovisorien
- Änderung der Sternpunktbehandlung

Bei der Angabe des Gefährdungspotenzials in der Tabelle ist darauf hinzuweisen, dass sich die grün eingefärbte Spalte, in der keine Ferroresonanz auftritt, jeweils nur auf den behandelten Anregungsmechanismus bezieht. In gewissen Schaltanlagenkonfigurationen können gleichzeitig mehrere Anregungsmechanismen vorliegen. In diesem Fall wären zum Ausschluss von Ferroresonanzschwingungen unter Umständen entsprechend mehrere Abhilfemassnahmen zu ergreifen.

In der Serie zum Thema der Ferroresonanzschwingungen in Hochspannungsnet-

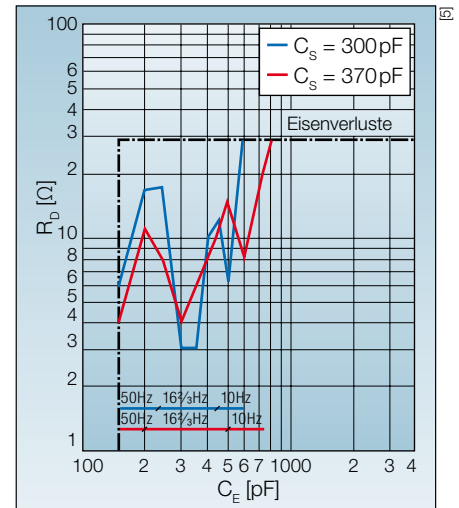


Bild 9 Berechnung des notwendigen Dämpfungswiderstands.

Beispiel eines Berechnungsergebnisses von Petersen und Umlauf [5] für einen 1-phasigen Ferroresonanzkreis mit der Hauptinduktivität eines 420-kV-Spannungswandlers. Wandlerkapazität: 150 pF. Notwendiger Dämpfungswiderstand R_D für eine wirksame Bedämpfung der Ferroresonanz in Abhängigkeit der Erdkapazität C_E . Die blaue Kurve gilt für eine Schalterkapazität C_S von 300 pF, die rote Kurve für eine Schalterkapazität C_S von 370 pF.

zen wurden die wichtigsten Aspekte aufgezeigt. Dabei wurde angestrebt, den Problemerkis mit praktischen Beispielen, aber auch mit grafischen und tabellarischen Zusammenstellungen der Abhilfemethoden und der kritischen Anlageparameter einem breiten Fachpublikum vorzustellen. Die Arbeit war insbesondere dadurch motiviert, dass eine zusammenfassende, praktische Darstellung der Problematik in der Fachliteratur weitgehend fehlte. Die vorliegende Artikelserie soll den Herstellern von Messwandlern und den Planern, Herstellern und Betreibern von Hochspannungsschaltanlagen und -netzen als Leitfaden dienen, die heute immer noch häufig auftretenden Probleme im Zusammenhang mit Ferroresonanzschwingungen zu vermeiden bzw. diese bei deren Auftreten effizient zu beheben. Es ist vorgesehen, dass die Ergebnisse als Vorlage für einen Anhang der Publikation IEC/TC 38/60044-2, Standard für induktive Spannungswandler [9], bzw. für die zukünftige Publikation IEC/TC 38/61869-3, Ed. 1: Specific Requirements for inductive Voltage Transformers, verwendet werden.

Referenzen

[1] R. Bränlich et al.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen, Teil 1: Definitionen und allgemeine Erklärungen. Bulletin SEV/VSE 23/2006.
[2] R. Bränlich et al.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen, Teil 2: Fallbeispiele. Bulletin SEV/VSE 24/25 2006.
[3] R. Bränlich et al.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen, Teil 3, Parameter von Ferroresonanzkreisen und Methoden zur Untersuchung. Bulletin SEV/VSE 22/2008.

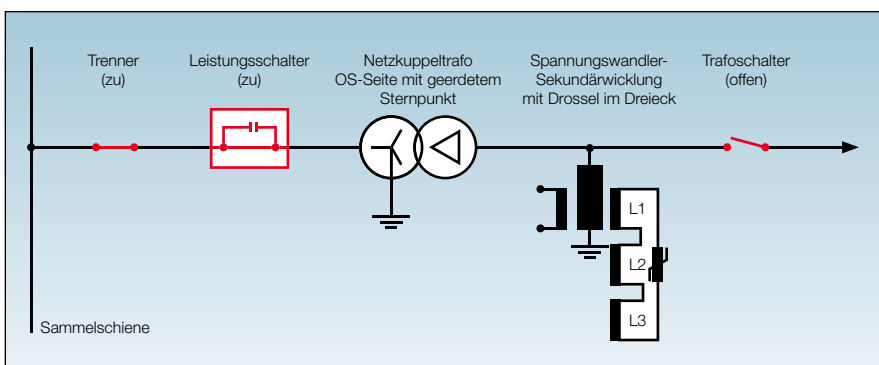


Bild 10 Bedämpfung der 3-phasigen Ferroresonanzschwingungen mit einer Drossel in der e-n-Wicklung (das OS-Netz ist starr geerdet).

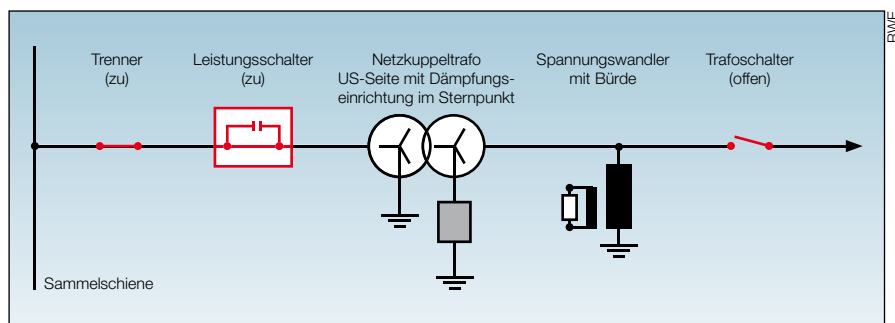


Bild 11 Bedämpfung einer 3-phasigen Ferroresonanzschwingung.

Bedämpfung einer 3-phasigen Ferroresonanzschwingung durch eine Dämpfungseinrichtung im Sternpunkt der Unterspannungswicklung des Netzkuppeltransformators. Diese Lösung kann angewendet werden, wenn keine e-n-Wicklung bei den Spannungswandlern vorhanden ist. Das OS-Netz ist starr geerdet. Das US-Netz besitzt keinen starr geerdeten Sternpunkt (Ausführungsbeispiel aus dem RWE-Netz).

- [4] R. Bräunlich et al.: Ferroresonanz an 220/420-kV-Spannungswandlern bei Schalt-handlungen. ETZ, Heft 7/2007, S. 36–41.
- [5] C. Petersen, A. Umlauf: Kippschwingungen in starr geerdeten Drehstromnetzen. Elektrizitätswirtschaft; Band 79 (1980), Heft 7, S. 236–240.
- [6] W. Piasecki, M. Florkowski: Schutz vor Resonanzen, Methoden zur Vermeidung von Ferroresonanz in Mittelspannungs-Spannungswandlern. ABB Technik 2005, Heft 4, S. 43–46.
- [7] H.-J. Vorwerk: Betriebserfahrungen mit Messwandlern > 100 kV und ihre Konsequenzen. Bulletin SEV/VSE 72/1 (1981).
- [8] Cigré: The paper-oil insulated measurement transformer, Chapter II: Design and Construction. Arbeitsgruppe 23.07 des Study Committee 23 (Unterstationen), Elektra, 124, 1990, Cigré 57.
- [9] IEC Standard 60044-2, Version 1.2, 2003-02.

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, braenlich@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 weitweiten 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, Informations-technik) 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-tsfc.com

¹⁾ Die Autoren dieses Beitrags sind gleichzeitig die Mitglieder der Arbeitsgruppe Ferroresonanz des TK 38 (Messwandler). Die Gruppe setzt sich seit 2004 mit diesem Thema auseinander und publizierte diese Serie von 4 Artikeln im Bulletin SEV/VSE über Ferroresonanz.

Résumé

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

4^e partie: Suppression des résonances ferromagnétiques. Les résonances ferromagnétiques dans les réseaux à haute tension sont des oscillations non linéaires pouvant apparaître en présence d'appareils inductifs et de capacités. Dans certaines configurations d'installation ou états de commutation, le couplage capacitif avec la tension du réseau peut avoir pour conséquence que le noyau d'un transformateur de tension arrive périodiquement à saturation, pouvant faire apparaître des oscillations complexes non linéaires. Si celles-ci ne sont pas décelées et bloquées, les transformateurs de tension concernés risquent d'être détruits par surcharge thermique. Les trois articles précédents [1–3] ont exposé les mécanismes de la ferroresonance mono- et triphasée ainsi que les critères d'apparition et méthodes d'étude. Ce dernier article traite de la manière d'éviter les problèmes entraînés par les résonances ferromagnétiques.