

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieses Dokuments ist 2015-02-01.

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	6
Nationaler Anhang NA (informativ) Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen.....	6
Nationaler Anhang NB (informativ) Literaturhinweise.....	7
Einleitung	8
1 Anwendungsbereich.....	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Einführung in Ferroresonanzschwingungen.....	9
3.1 Definition der Ferroresonanz.....	9
3.2 Anregung von stationären und instationären Ferroresonanzschwingungen.....	11
4 Einphasige und dreiphasige Schwingungen	13
4.1 Einphasige Ferroresonanzschwingungen	13
4.2 Das vereinfachte Ersatzschaltbild für einphasige Ferroresonanzschwingungen.....	14
4.3 Kapazitive Spannungswandler	17
4.4 Dreiphasige Ferroresonanzschwingungen.....	17
4.4.1 Allgemeines	17
4.4.2 Aufbau	17
4.4.3 Anregung der Ferroresonanz	18
4.4.4 Resultierende Kurvenform der Ferroresonanzschwingung.....	18
4.4.5 Typische Oszillogramme der dreiphasigen Ferroresonanz	21
5 Beispiel von Ferroresonanz-Konfigurationen	22
5.1 Einphasige Ferroresonanz – Schaltfeld in einer 245-kV-Freiluftschaltanlage	22
5.2 Einphasige Ferroresonanzschwingungen aufgrund von Leitungskopplungen.....	24
5.3 Dreiphasige Ferroresonanzschwingungen.....	27
6 Induktive Spannungswandler (Hauptteile).....	28
7 Das Ersatzschaltbild für einphasige Ferroresonanz.....	30
7.1 Schematische Darstellung.....	30
7.2 Magnetisierungskennlinie	31
7.3 Stromkreisverluste.....	32
8 Notwendige Angaben für die Untersuchung von Ferroresonanz	33
8.1 Allgemeines	33
8.2 Einphasige Ferroresonanz	33
8.3 Dreiphasige Ferroresonanz.....	34
9 Computersimulation von Ferroresonanzschwingungen	35
9.1 Allgemeines	35
9.2 Elektrischer Stromkreis und Stromkreiselemente	35
9.3 Stromkreisverluste.....	35

	Seite	
9.4	Beispiele von Simulationsergebnissen für einphasige Ferroresonanzschwingungen	36
9.4.1	Allgemeines.....	36
9.4.2	Fall 1: Transiente, abnehmende Ferroresonanzschwingung.....	36
9.4.3	Fall 2: Stationäre Ferroresonanzschwingung mit Netzfrequenz	37
9.4.4	Fall 3: Stationäre subharmonische Ferroresonanzschwingung.....	37
9.4.5	Fall 4: Stationäre chaotische Ferroresonanzschwingung	38
9.5	Simulation dreiphasiger Ferroresonanz	39
10	Experimentelle Untersuchungen, Prüfverfahren und praktische Messungen.....	40
10.1	Allgemeines.....	40
10.2	Einphasige Ferroresonanzschwingungen	40
10.3	Dreiphasige Ferroresonanzschwingungen	43
11	Vermeidung und Unterdrückung von Ferroresonanzschwingungen.....	44
11.1	Flussdiagramm.....	44
11.2	Vorhandene Schaltanlagen.....	46
11.3	Neue Projekte.....	46
11.4	Vermeidung von Ferroresonanzschwingungen	46
11.4.1	Allgemeines.....	46
11.4.2	Einphasige Ferroresonanzschwingungen.....	47
11.4.3	Dreiphasige Ferroresonanzschwingungen	47
11.5	Dämpfung von Ferroresonanzschwingungen	47
11.5.1	Allgemeines.....	47
11.5.2	Einphasige Ferroresonanzschwingungen.....	47
11.5.3	Dreiphasige Ferroresonanzschwingungen	49
Anhang A (informativ) Schwingungen in nichtlinearen Stromkreisen		51
A.1	Übersicht	51
A.2	Die Vereinfachung der nichtlinearen elektrischen Stromkreise mit dem Theorem von Thévenin.....	53
A.3	Die Differentialgleichung für Ferroresonanzschwingungen	53
A.4	Schwingungsfrequenzen in Ferroresonanzsystemen	55
Literaturhinweise		56
Bilder		
Bild 1 – Beispiel einer typischen Magnetisierungskennlinie eines ferromagnetischen Kerns.....		10
Bild 2 – Ersatzschaltbild des einfachsten Ferroresonanzkreises		10
Bild 3 – Beispiele von gemessenen einphasigen Ferroresonanzschwingungen mit $16\frac{2}{3}$ - Hz - Schwingungen		12
Bild 4 – Schematische Darstellung eines freigeschalteten Abgangsfeldes mit Spannungswandlern als ein Beispiel, in dem einphasige Ferroresonanz auftreten kann		13
Bild 5 – Ersatzschaltbild einer Netzsituation, die zu einphasigen Ferroresonanzschwingungen neigt, wobei sie über die kapazitive Kopplung von parallel verlaufenden Freileitungssystemen angeregt und aufrechterhalten wird		14

	Seite
Bild 6 – Ersatzschaltbilder für die theoretische Analyse von einphasigen Ferroresonanzschwingungen	16
Bild 7 – Isoliertes Netz als Beispiel für das Ersatzschaltbild in einer Situation, in der eine dreiphasige Ferroresonanzschwingung auftreten kann	17
Bild 8 – Zeigerdiagramm zur Erklärung der Schwingung des Erdpotentials	18
Bild 9 – Von Bergmann verwendeter Laboratoriums-Prüfaufbau	19
Bild 10 – Bereiche der Kapazität C und der verketteten Spannung U , in denen unterschiedliche harmonische und subharmonische Ferroresonanzschwingungen bei einem Widerstand $R = 6,7 \Omega$ im Prüfaufbau nach Bergmann beobachtet wurden	20
Bild 11 – Bereiche der Kapazität C und der verketteten Spannung U , in denen Ferroresonanzschwingungen mit der zweiten Subharmonischen bei Veränderung des Widerstands R im Prüfaufbau nach Bergmann beobachtet wurden	20
Bild 12 – Bereiche der Kapazität C und der verketteten Spannung U , in denen unterschiedliche Schwingungstypen von Ferroresonanzschwingungen mit der zweiten Subharmonischen bei einem Widerstand $R = 6,7 \Omega$ im Prüfaufbau nach Bergmann beobachtet wurden	21
Bild 13 – Anzeige eines Störungsrecorders einer dreiphasigen Ferroresonanzschwingung	22
Bild 14 – Schaltfelder in der 245-kV-Schaltanlage, in der einphasige Ferroresonanzen auftreten können	23
Bild 15 – Beispiele von Schwingungen der einphasigen Ferroresonanz beim Ausschalten des Leistungsschalters nach Bild 14	24
Bild 16 – Einphasiges Schema der Netzsituation auf der 60-kV-Spannungsebene im Bereich der Schaltanlagen 1, 2 und 3	25
Bild 17 – Mastbild auf der von den Freileitungen zwischen Schaltanlage 1 und Schaltanlage 2 gemeinsam benutzten Strecke	26
Bild 18 – Ferroresonanzschwingungen, die an der Leitung Nr. 5 an Schaltanlage 2 aufgezeichnet worden sind	26
Bild 19 – Einphasiges Schema der 170-kV-Schaltanlage (links) und der 12-kV-Schaltanlage (rechts), in denen während des Schaltvorgangs dreiphasige Ferroresonanzschwingungen aufgetreten sind	27
Bild 20 – Oszillogramme der dreiphasigen Spannungen am induktiven Spannungswandler T04	28
Bild 21 – Ersatzschaltbild des Spannungswandlers und die Vereinfachung für die Ferroresonanzuntersuchungen	29
Bild 22 – Ersatzschaltbild für die Analyse einphasiger Ferroresonanzschwingungen	31
Bild 23 – Beispiel einer Hysteresekurve eines Spannungswandlernkerns, gemessen bei 50 Hz	32
Bild 24 – Ersatzschaltbild für dreiphasige Ferroresonanzschwingungen	34
Bild 25 – Transiente, abnehmende Ferroresonanzschwingungen mit der fünften Subharmonischen 50/5 Hz (10 Hz)	36
Bild 26 – Stationäre Ferroresonanzschwingungen mit Netzfrequenz	37
Bild 27 – Stationäre Ferroresonanzschwingungen mit 10 Hz	38
Bild 28 – Stationäre chaotische Ferroresonanzschwingungen	39
Bild 29 – Beispiel für den Anschluss eines Messwiderstandes zur Erfassung des Stromsignals durch die Primärwicklung des Spannungswandlers am Anschluss N (siehe Schaltbild in Bild 30)	41
Bild 30 – Messung des Stroms durch die Primärwicklung und der Spannung an der Sekundärwicklung des Spannungswandlers	42
Bild 31 – Messung einer einphasigen Ferroresonanzschwingung	43

	Seite
Bild 32 – Messung von dreiphasigen Ferroresonanzschwingungen mit einem Oszilloskop	44
Bild 33 – Flussdiagramm zur Analyse und Vermeidung von Ferroresonanzschwingungen	45
Bild 34 – Ersatzschaltung mit Dämpfungseinrichtung (rote Kreise), die an die Sekundärwicklung des Spannungswandlers angeschlossen ist.	47
Bild 35 – Beispiel der wirksamen Dämpfung von einphasigen Ferroresonanzschwingungen mit $16\frac{2}{3}$ Hz	48
Bild 36 – Dämpfung von Ferroresonanzschwingungen in der offenen Dreiecksschaltung von Spannungswandlern im Schaltfeld	49
Bild 37 – Dämpfung von Ferroresonanzschwingungen mit Spannungswandlern im Sternpunkt des Leistungstransformators	50
Bild A.1 – Ersatzschaltung Stromkreis für die Analyse der Ferroresonanzschwingung	51
Bild A.2 – Ersatzschaltung für die Ableitung der nichtlinearen Differentialgleichung zweiter Ordnung	54
Bild A.3 – Ein nichtlineares Schwingungssystem	55
 Tabellen	
Tabelle 1 – Anregungsarten und mögliche Entwicklungen von Ferroresonanzschwingungen	11
Tabelle 2 – Parameter	33