

Bedingungen für das Auftreten von Kippschwingungen bei Hochspannungswandlern im Netz

U. Schärli

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart

G. Krause

Geschäftsbereich Netzkompensation, Haefely GmbH, Müllheim

1. Einleitung

Kippschwingungen sind nichtlineare Schwingungen, die bei der Kopplung von linearen und wenigstens einem nichtlinearen Energiespeicher auftreten können. Im Energieversorgungsnetz kommen als nichtlineare Elemente die Hauptinduktivitäten von induktiven Spannungswandlern und von Transformatoren in Frage. Oft findet man auch die Bezeichnung «Ferroresonanz» für diese Erscheinung. Sie wird in der Fachliteratur seit Anfang dieses Jahrhunderts von einer Vielzahl von Autoren beschrieben. Auch heute ist Ferroresonanz immer wieder ein aktuelles Thema, da eine Vorausberechnung der Resonanzbedingungen sehr aufwendig ist.

Kippschwingungen können entstehen, wenn ein Serienkreis aus Spannungsquelle, Kondensator und sättigbarer, d.h. nichtlinearer Induktivität zustande kommt. Als weitere notwendige Bedingung muß zunächst die Resonanzfrequenz, die sich aus der Kapazität und der Induktivität im linearen Bereich der Magnetisierungskennlinie ergibt, kleiner als die Netzfrequenz sein, während die Resonanzfrequenz mit der viel kleineren Sättigungsinduktivität über der Netzfrequenz liegen muß [1]. Kippschwingungen sind gefährlich, weil die betroffenen Betriebselemente zum einen durch Überspannungen vorgeschädigt oder zerstört, zum anderen durch erhöhte Ströme überhitzt werden können.

Nach der Anregung können Kippschwingungen ein transientes Verhalten zeigen, d.h. sie können nach einigen Netzperioden abklingen, oder sie können nach dem Anschwingen stationär weiterbestehen. Bei transientser Ferroresonanz ist die Aufheizung durch Überströme meist unkritisch, während bereits kurzzeitige Überspannungen zu einer Schädigung der Isolation führen können.

Man hat periodische Kurvenverläufe mit subharmonischen und harmonischen Frequenzanteilen beobachtet, aber auch nichtperiodisches bzw. chaotisches Verhalten.

In über 90% aller Fälle von Ferroresonanzerscheinungen im Netz sind induktive Spannungswandler beteiligt. Die notwendige Serienkapazität ist meist durch die Steuerkondensatoren eines Leistungsschalters in einem Sammelschienenabgang gegeben. Im Unterschied zum kapazitiven Spannungswandler, der alle für Ferroresonanz notwendigen Elemente intern enthält und daher bereits werksseitig ausreichend gedämpft ist, muß bei induktiven Spannungswandlern der äußere Netzaufbau mit einbezogen werden, der vielfältig sein kann. Deshalb gibt es nur für kapazitive Wandler eine Normprüfung hinsichtlich Ferroresonanz (IEC 186). Für induktive Wandler kann eine Prüfung individuell nach der jeweiligen Kundenanforderung erfolgen.

In der Praxis kommt der für Ferroresonanz nötige Serienkreis manchmal auf verschlungenen Wegen zustande [CIGRE-Beitrag 1974, Heuck].

Für den Wandlerhersteller ist es daher wünschenswert, wenn er ggf. einen Kunden nach Kenntnis der Netzdaten fundiert beraten und auf eine mögliche Gefährdung durch Ferroresonanz hinweisen kann. Auch eventuelle Abhilfemaßnahmen lassen sich am digitalen Modell entwickeln.

2. Induktiver Spannungswandler im Netz

Als konkretes Beispiel zur Untersuchung von Kippschwingungen wird exemplarisch ein induktiver 245kV-Wandler in einem Sammelschienenabgang simuliert. Für die theoretischen Untersuchungen genügt eine einphasige Betrachtung. Bei der Messung im Netz können in einer, in zwei oder in allen drei Phasen Ferroresonanzerscheinungen auftreten. Dieses Verhalten ist auf Toleranzen der Anregung (Öffnen des Leistungsschalters) und der einzelnen Wandler zurückzuführen. Eine gegenseitige Beeinflussung findet im betrachteten Fall nicht statt.

Der Sammelschienenabgang wird als worst case Betrachtung stets ohne zusätzliche Last angenommen. Diese würde in jedem Fall dämpfend wirken.

2.1 Ersatzschaltbild

Bild 1 zeigt das Ersatzschaltbild des Wandlers mit der Netznachbildung, dem Leistungsschalter und der Bürde. Es gilt für niedrige Frequenzen bis einige kHz, jedoch nicht für Gleichstrom.

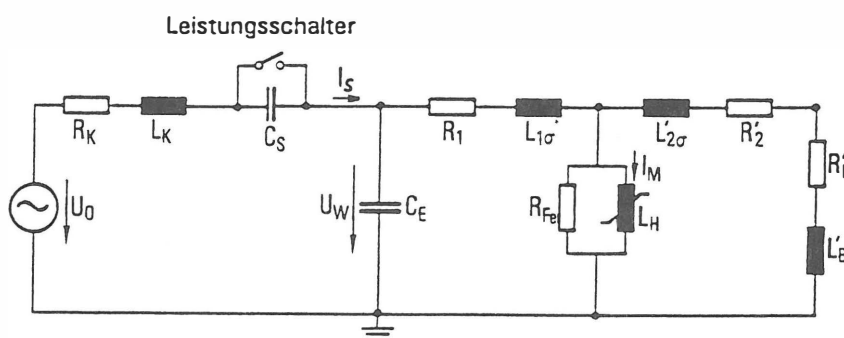


Bild 1:
Ersatzschaltbild des induktiven 245kV-Spannungswandlers

I_M	Magnetisierungsstrom	I_S	Netzspeisestrom
U_W	Primärspannung am Wandler	U_0	Netzspannung ($U_N=220\text{kV}$)
L_K, R_K	Netznachbildung	C_S	Steuerkapazität des Leistungsschalters
R_1	primärer Wicklungswiderstand des Wandlers	R'_2	sekundärer Wicklungswiderstand
$L_{1\sigma}$	primäre Streuinduktivität des Wandlers	$L'_{2\sigma}$	sekundäre Streuinduktivität
L'_B, R'_B	Nachbildung der Nennbürde		
C_E	Kapazität des Wandlers inclusive Restnetz (z.B. Stromwandler) gegen Erde		
R_{Fe}	Widerstand zur Nachbildung der Eisenverluste		
L_H	Hauptinduktivität des Wandlers mit nichtlinearer Kennlinie		

Alle gestrichelten Größen sind auf die Primärseite des Wandlers bezogen.

2.2 Notwendige Daten für die Simulation

Bei der Netzspannung können in der Praxis zeitweilige Spannungserhöhungen, z.B. durch Lastabwurf oder im Fehlerfall - besonders in Netzen mit Erdschlußkompensation -, auftreten. Diese sind zu berücksichtigen, da die Magnetisierungskennlinie bei einer Spannungsüberhöhung auch höher angesteuert wird.

Die Steuerkapazität C_S des Leistungsschalters dürfte bekannt sein. Die Erdkapazität C_E des Sammelschienenabganges nach dem Leistungsschalter jedoch muß vermutlich sinnvoll abgeschätzt werden, da eine Messung nicht realistisch ist. Besonders zu beachten sind Kabel und lange Freileitungstücke. Die Nachbildung der Netzimpedanz kann, wie die durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, vernachlässigt werden. Im hier betrachteten Fall ohne Last fließen nur kleine Ströme, so daß der Spannungsabfall an der Netzimpedanz minimal ist.

Bei der Messung der Wicklungswiderstände im Prüffeld ist zu berücksichtigen, daß dies im betriebswarmen Zustand geschieht, da eine Temperaturabhängigkeit zu erwarten ist. Streuinduktivitäten können vom Wandlerhersteller abgeschätzt oder näherungsweise berechnet werden.

Der Eisenverlustwiderstand wird hier in erster Näherung als konstant angenommen (siehe aber [2]). Sein Wert muß, ebenso wie die Magnetisierungskennlinie, durch Messungen am Wandler gewonnen werden. Auf die Magnetisierungskennlinie hat die Größe des effektiven Luftspaltes (einige 0,01mm) und damit die Temperatur erheblichen Einfluß. Auch hier ist am betriebswarmen Wandler zu messen. Ganz entscheidend ist es, den Eisenkern vor der Aufnahme der Kennlinie zu entmagnetisieren, da sonst auf Grund der Remanenz keine reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden können. Unter Umständen muß dazu bis zum 2,5-fachen der Nennspannung angesteuert werden, was wegen der Gefahr eines Überschlages problematisch sein kann. Beim Entmagnetisieren darf die an der Wicklung angelegte Wechselspannung im Bereich großer Kennliniensteilheit (große Induktivität \rightarrow große Zeitkonstante) nicht zu schnell abgesenkt werden. Andernfalls bleibt der Eisenkern vormagnetisiert.

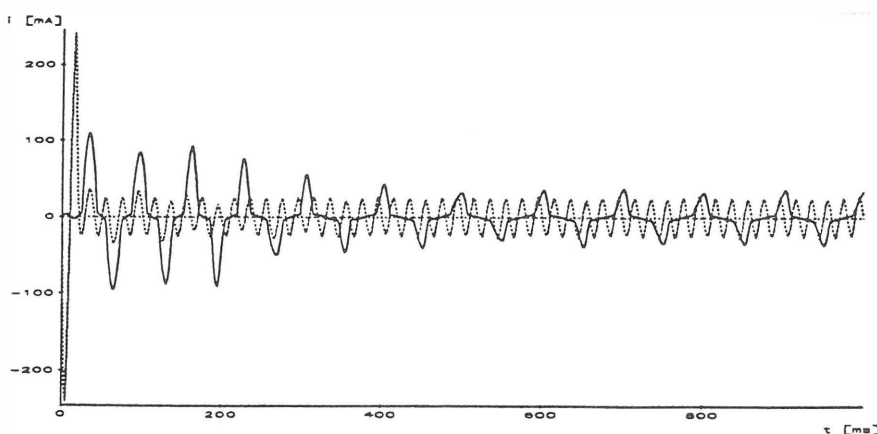


Bild 2:
Beispiel für die Änderung der Grundfrequenz bei Kipp-schwingungen
(— Magnetisierungsstrom I_M ,
--- Netzspeisestrom I_S)

3. Simulation von Kippschwingungen

Als Werkzeug zur Simulation des Netzwerkes nach Bild 1 wird das «**A**lternative **T**ransients **P**rogram (**ATP**)» verwendet, das die Differentialgleichungen numerisch mit einem Zeitschrittverfahren löst. Es stimmt im wesentlichen mit dem weitverbreiteten «**E**lectromagnetic **T**ransients **P**rogram (**EMTP**)» überein.

Ein solches Netzwerksimulationsprogramm erlaubt es, ein Ergebnis (z.B. die Spannung am Wandler U_W und den Magnetisierungsstrom I_M) für genau einen Parametersatz innerhalb eines bestimmten Zeitfensters zu berechnen. Aus dem Magnetisierungsstrom läßt sich dann ablesen, ob keine, transiente oder stationäre Ferroresonanz auftritt. Jede Variation eines Parameters, z.B. der Erdkapazität C_E , erfordert einen erneuten Simulationslauf. Um das Risiko auszuschließen, daß zwischen den simulierten Punkten Bereiche übersehen werden, in denen Ferroresonanz auftritt, muß ein Kompromiß zwischen Rechenzeit und Schrittweite gefunden werden.

Abhilfe könnte die Anwendung der kürzlich veröffentlichten Bifurkationstheorie auf das gegebene nichtlineare Netzwerk bringen [3,4]. Sie soll in der Lage sein, einen globalen Überblick über die Parameterbereiche zu geben, in denen Ferroresonanz auftreten kann. Der Zeitaufwand zur Erstellung der notwendigen Hilfsmittel (Programme, etc.) ist jedoch hoch und ein wirklich brauchbares Ergebnis nicht gesichert.

Eine weitere von Rüdenberg [5] erwähnte sehr einfache Methode zur Beurteilung von möglicher Ferroresonanz beinhaltet eine stationäre Betrachtungsweise von Kippschwingungen, ohne daß zeitveränderliche Größen erfaßbar sind. Die Beschreibung des Überganges von einem Zustand in den anderen ist nicht möglich. Außerdem ist die Methode nur auf den einfachsten Serienkreis anwendbar, der bereits bei der Schaltung nach Bild 1 nicht mehr vorliegt. Für die Praxis ist dieses Verfahren daher nicht brauchbar.

Ein nichtlineares System kann mehrere stationäre Zustände einnehmen, von denen nur einer erwünscht ist. Durch eine Unstetigkeit, z.B. eine Störung von außen, kann ein Wechsel vom Normalbetrieb in einen anderen Zustand erfolgen. Auch scheinbar willkürliche Zustandsänderungen sind möglich. Zu beobachten ist dies bei Kippschwingungen, wenn sich ihre Grundfrequenz plötzlich ändert. Bild 2 zeigt den Magnetisierungsstrom I_M und den Netzspeisestrom I_S , wenn der Leistungsschalter zur Zeit $t=20$ ms geöffnet wird. Der Magnetisierungsstrom geht kurz danach in die Sättigung. Die Amplitude von I_S geht auf einen kleinen Wert zurück und wird hier nur geringfügig durch die zwischen C_E und L_H entstehenden Schwingungen beeinflusst. I_S liefert die Energie in den Kreis nach, die die Kippschwingungen stationär aufrecht erhält. Man erkennt zunächst eine Grundfrequenz von $16 \frac{2}{3}$ Hz, die sich nach etwa 150 ms auf 10 Hz ändert.

Folgende Ursachen für die Anregung von Kippschwingungen sind denkbar:

- netzfrequente Überspannungen
- transiente Überspannungen
- Harmonische/Subharmonische
- Gleichstromüberlagerungen

Transiente Überspannungen sind externe blitz- und schaltstoßähnliche Impulse, ausgelöst durch Blitzschlag bzw. Schalthandlungen irgendwo im Netz. Das Öffnen des Leistungsschalters (Bild 1) verursacht ebenfalls einen Ausgleichsvorgang und kann Ferroresonanz

anregen, ebenso das Aufreißen eines sekundären Kurzschlusses am Wandler.
Das Ziel der Untersuchung ist zunächst, aus der Vielzahl der möglichen Anregungen diejenigen herauszufinden, die für die gegebene Konfiguration am leichtesten Kippschwingungen auslösen (worst case). Damit kann man sich bei den weiteren Untersuchungen und bei Messungen im Prüffeld auf diesen kritischen Fall konzentrieren.

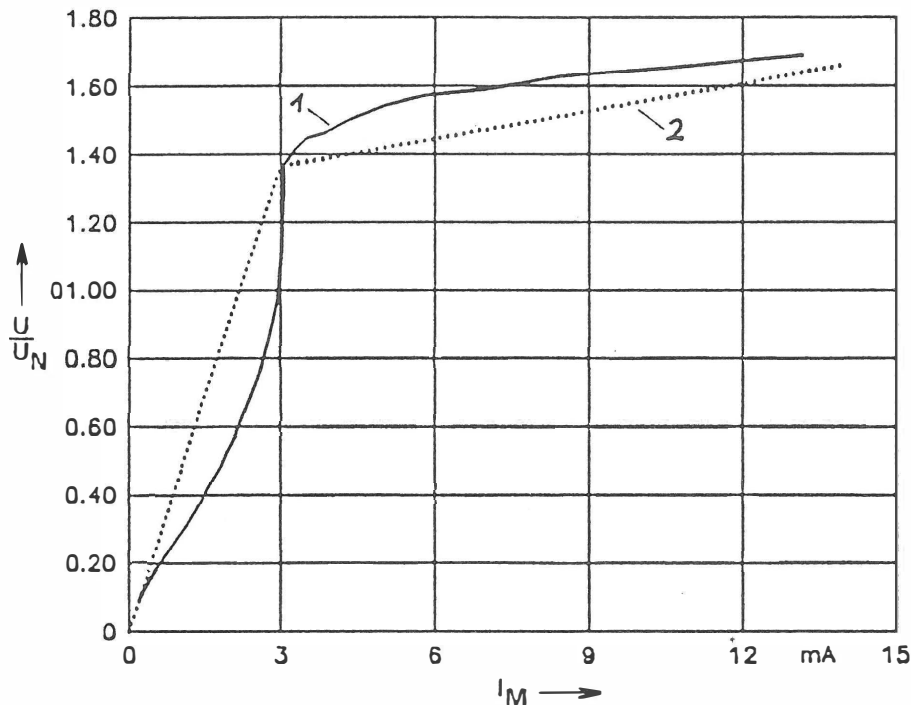


Bild 3:
Gemessene (1) und vereinfachte (2) Magnetisierungskennlinie

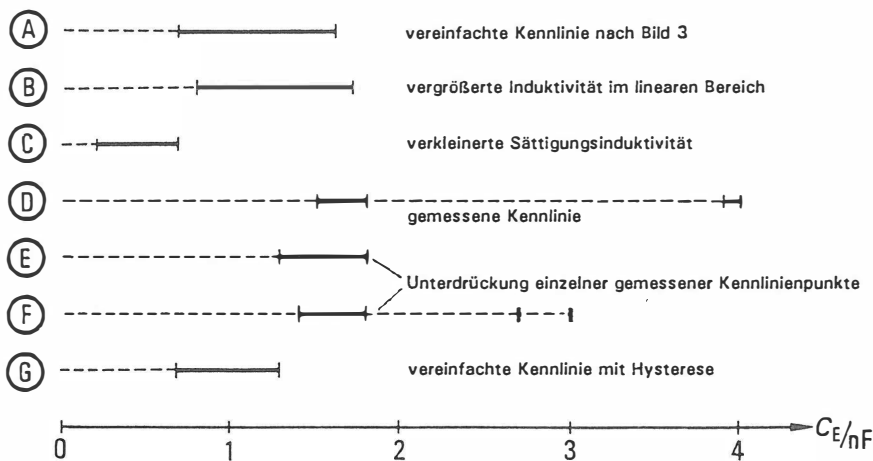


Bild 4:
Kapazitätsbereiche für CE mit stationärer Ferroresonanz

4. Diskussion der Ergebnisse

4.1 Einfluß der Magnetisierungskennlinie

In einer ersten Stufe wird eine vereinfachte Magnetisierungskennlinie, bestehend aus 2 Geradenstücken, verwendet (Bild 3). Hintergrund dafür ist die Tatsache, daß die Kennlinie eines Wandlers oft nur unzureichend genau bekannt ist und nur wenige Informationen (z.B. voltage factor) greifbar sind. Die einfache Kennlinie läßt sich durch wenige Parameter beschreiben (Induktivität im linearen und gesättigten Bereich, Lage des Knickpunktes). Die Kippschwingungen sollen durch das Öffnen des Leistungsschalters angeregt werden.

Die Steuerkapazität des Schalters wird zu $C_s=450$ pF angenommen, um Kippschwingungen zu provozieren. Ihre Größe hat erheblichen Einfluß auf das Auftreten von Ferroresonanz, ähnlich wie die Erdkapazität C_E . Bei sehr kleinen Werten für C_s genügt die aus dem Netz nachfließende Energie nicht, um die immer existierenden Verluste auszugleichen, während bei sehr großen Werten die am Wandler anliegende Spannung immer stärker vom Netz bestimmt, quasi eingepreßt wird und Kippschwingungen ebenfalls nicht mehr möglich sind.

Zur Beurteilung des Einflusses der verschiedenen Parameter auf das Ferroresonanzverhalten wird hier exemplarisch der Bereich der Erdkapazität C_E ermittelt, in dem stationäre Kippschwingungen auftreten. Ein anderer Ansatz wäre z.B. die Ermittlung des Bereiches der Steuerkapazität C_s , in dem Ferroresonanz auftritt.

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich ein Bereich von 0,7nF bis 1,6nF für die Erdkapazität C_E , in dem stationäre Ferroresonanz auftritt (Fall A, Bild 4).

Eine Erhöhung der Steigung der Magnetisierungskennlinie im normalen Arbeitsbereich auf das Dreifache zeigt kaum Wirkung (Fall B), während eine um den Faktor 3 flachere Sättigungssteigung den kritischen Bereich zu wesentlich kleineren Werten verschiebt (Fall C).

Rechnet man mit der gemessenen Kennlinie (Bild 3), erhält man ein völlig anderes Ergebnis (Fall D). Die empfindliche Reaktion auf Änderungen der Kennlinie wird in den Fällen E und F noch deutlicher; hier wurden einzelne Punkte aus der Kennlinie unterdrückt.

Bereits aus diesen Ergebnissen muß der Schluß gezogen werden, daß der Verlauf der Magnetisierungskennlinie von entscheidender Bedeutung ist und daß sie für eine brauchbare Simulation bekannt sein muß. Eine Messung am Wandler (z.B. als Typprüfung) ist daher unbedingt notwendig. Es ist nicht vertretbar, eine «Schätz»-Kennlinie zu verwenden (etwa festgelegt durch den voltage factor, der angibt, bei welcher Spannung der Wandler in die Sättigung geht, und durch die Annahme einer Sättigungsgeraden mit der Steigung μ_0 im B-H- Diagramm).

Alle Bereiche der Kennlinie sind wichtig, besonders aber der Übergangsbereich zur Sättigung. Dort ändert sich die differentielle Induktivität sehr schnell mit dem Strom. Dort entscheidet sich auch, ob der Strom weit in die Sättigung ansteigt oder im normalen Betriebsbereich bleibt.

4.2 Einfluß der Hysterese

Das nichtlineare Verhalten des magnetischen Kreises muß strenggenommen durch verschiedene Hystereseschleifen beschrieben werden. Die Simulation zeigt eine Verkleinerung des kritischen Kapazitätsbereiches für C_E bei verbreiteter Hystereseschleife bzw. einen vergrößerten kritischen Kapazitätsbereich bei schmalerer Hystereseschleife (vgl. Fall G mit Fall A in Bild 4). Die Studien zeigen für unterschiedliche Kennlinienverläufe (gemessen und vereinfacht) die gleiche Tendenz: Hysterese reduziert die Anfälligkeit für Kippschwingungen. Transiente Ferroresonanz mit Berücksichtigung von Hysterese klingt schneller ab und zeigt kleinere Stromamplituden als ohne Hysterese. Die physikalische Erklärung dafür sind die Verluste durch Ummagnetisierung im Eisenkern, die mit einer größeren Hystereseschleife zunehmen. Diese Verluste haben dämpfenden Charakter. Für eine worst case Aussage bezüglich Ferroresonanz kann daher die Hysterese unberücksichtigt bleiben.

4.3 Einfluß von Remanenz

Die Remanenz des Eisenkerns kann die Entstehung von Kippschwingungen fördern oder unterdrücken, je nach ihrem Vorzeichen. Allerdings läßt sie sich mit dem Simulationsprogramm ATP nicht erfassen. Einen Hinweis auf ihren Einfluß geben andere Veröffentlichungen. Nach [2, S.117 ff.] ist Remanenz beim **Zuschalten** durch eine um ca. 15% höhere Netzspannung näherungsweise zu berücksichtigen. Beim **Abschalten** – wie hier betrachtet – und besonders beim folgenden Öffnen des Trenners (um z.B. Kippschwingungen zu beenden) kann ein magnetischer Fluß im Eisenkern zurückbleiben, der beim nächsten Zyklus dazu führt, daß geringfügig andere Schleifen im Kennlinienfeld durchlaufen werden. Mehrere nacheinander durchgeführte Prüfzyklen können so selbst bei exakt gleichphasigem Schalten zu scheinbar willkürlichem Auftreten von Ferroresonanz führen, da die Vormagnetisierung nicht gleich ist. Nur wenn der Kern entmagnetisiert wäre, könnte man von gleichen Startbedingungen ausgehen. Eine Aussage zur Größe des Remanenzeinflusses ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich und bedarf weiterer Untersuchungen.

4.4 Variation weiterer Wandlerkenndaten

Bei angeschlossener Nennbürde und versuchsweiser Erhöhung bzw. Verringerung von Wicklungswiderständen und Streuinduktivitäten um jeweils 30% ergeben sich für den betrachteten 245kV-Wandler Verschiebungen und/oder Aufweitungen der Erdkapazitätsbereiche mit Ferroresonanz um lediglich 0,1nF. Im Vergleich zum Einfluß der Magnetisierungskennlinie ist die Auswirkung nicht so gravierend.

Ob die Eisenverluste durch einen linearen Widerstand R_{Fe} genügend genau erfaßt werden, muß eine Messung am Wandler zeigen. Eine Variation um plus/minus 30% führt zu Änderungen in der gleichen Größenordnung wie zuvor. Eine Abhängigkeit des Einflusses vom Verlauf der Magnetisierungskennlinie ist jedoch nicht auszuschließen.

Fällt die Bürde durch einen sekundären Kurzschluß und anschließendes Ansprechen der Sicherung weg, treten Kippschwingungen in einem deutlich größeren Bereich von C_E auf, was wiederum eine erhöhte Gefährdung durch Ferroresonanz bedeutet. Eine Erhöhung der Bürde führt hingegen zu stärkerer Dämpfung (vgl. Bild 5 und Bild 6). Allerdings ergeben sich aufgrund der Simulation mitunter so große Bürden, daß ein Einsatz in der Praxis wegen der zu erwartenden Meßfehler und der Überlastung des Wandlers nicht in Frage kommt.

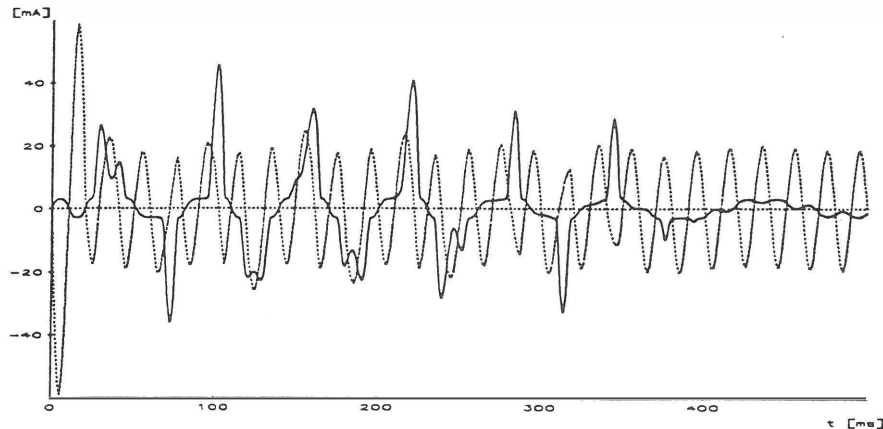


Bild 5:
Transiente Ferroresonanz bei einem induktiven Wandler mit Nennbürde (Anregung durch Öffnen des Leistungsschalters)
(— Magnetisierungsstrom I_M ,
--- Netzspeisestrom I_S)

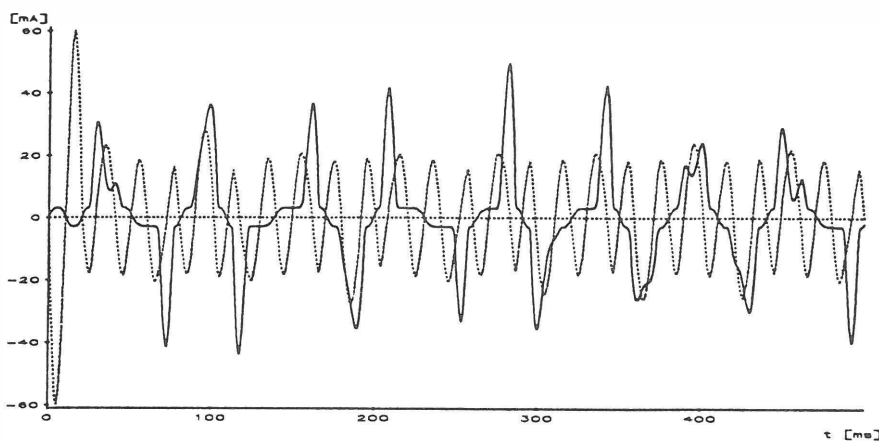


Bild 6:
Stationäre Ferroresonanz bei einem induktiven Wandler ohne Bürde (Anregung durch Öffnen des Leistungsschalters)
(— Magnetisierungsstrom I_M ,
--- Netzspeisestrom I_S)

4.5 Möglichkeiten zur Anregung von Kippschwingungen

Durch eine Unstetigkeit kann das betrachtete nichtlineare System vom normalen Betriebszustand in einen kritischen Zustand wechseln.

4.5.1 Transiente Überspannungen

Um die Störung des Systems durch einen Schaltstoß zu untersuchen, wird von der Anordnung nach Bild 1 ausgegangen, wobei der Leistungsschalter dauernd geöffnet bleibt. Bei diesem Betriebsfall ist die Spannung U_W am Wandler klein und im wesentlichen durch den kapazitiven Teiler aus C_S und C_E gegeben, solange keine Kippschwingungen auftreten. Der Teiler bestimmt auch, welche Wandlereingangsspannung bei einem netzseitigen transienten Schaltstoß maximal auftreten kann. Mit größer werdendem C_E nimmt die maximale Amplitude ab. Die durchgeführten Studien zeigen, daß ein der sinusförmigen Netzspannung überlagerter Schaltstoß mit einer Amplitude bis 4 pu keine stationäre Ferroresonanz anregt, obwohl die gleiche Konfiguration durch das Öffnen des Leistungsschalters (siehe folgendes Kapitel) leicht anzuregen ist. Die vom Schaltstoß in das System gebrachte Energie reicht offensichtlich nicht zur Entstehung von Kippschwingungen aus. Erst unrealistisch hohe Schaltstoßamplituden von 6 pu können Ferroresonanz anregen. Dies gilt in noch stärkerem Maße für einen vergleichsweise kurzen, energieärmeren Blitzstoß.

4.5.2 Anregung durch das Betätigen des Leistungsschalters

Die Simulation beginnt mit dem eingeschwungenen Zustand bei geschlossenem Schalter. Der Schalter öffnet entweder im Nulldurchgang des Stromes oder bei Unterschreiten einer bestimmten Stromschwelle, wie es in der Realität zu erwarten ist (Stromabriß).

Untersuchungen mit unterschiedlichen Magnetisierungskennlinien zeigen, daß das Öffnen des Leistungsschalters im Bereich maximaler Spannung U_W am kritischsten ist. Da hauptsächlich die Kapazitäten den Schalterstrom bestimmen, ist dieser gegen die Spannung U_W um ca. 90° phasenverschoben und damit im Spannungsmaximum näherungsweise Null. Um den Nulldurchgang der Spannung herum wird keine Ferroresonanz angeregt, d.h. ein Stromabriß stellt keine erhöhte Anforderung dar. Die in der Erdkapazität C_E gespeicherte Energie entlädt sich nach dem Öffnen des Schalters im wesentlichen über den Wandler, so daß der Magnetisierungsstrom in die Sättigung geraten kann.

Das Öffnen des Leistungsschalters stellt also für die hier betrachtete Konfiguration eine besonders kritische Anregung dar und wird deshalb in den Simulationen bevorzugt verwendet.

4.5.3 Aufreißen eines sekundären Kurzschlusses

In Anlehnung an die Prüfung kapazitiver Spannungswandler nach IEC 186 kann das Aufreißen eines Kurzschlusses an den Wandlersekundärklemmen auch bei einem induktiven Wandler zu Kippschwingungen führen, wenn er über eine Kapazität C_S an Spannung liegt. Diese Prüfung kann in Ausnahmefällen auch bei induktiven Wandlern angewandt werden. Man sollte aber bedenken, daß nur gleiche Konfigurationen miteinander verglichen werden können, d.h. die Bürde muß bei einem Test im Prüffeld nach dem Aufreißen des Kurzschlusses ebenfalls angeschlossen sein, wenn sie im Schaltfeld angeschlossen ist.

Aber selbst bei exakt gleicher Schaltung gibt es Konstellationen, die durch das Öffnen des Leistungsschalters zu stationärer Ferroresonanz angeregt werden, nicht jedoch durch das Aufreißen eines Kurzschlusses der Sekundärklemmen, und umgekehrt. (OHNE Bürde gerechnet!)

Man muß daraus den Schluß ziehen, daß die beiden Anregungen nicht vergleichbar sind und daß eine im Prüffeld durch einen Sekundärkurzschluß am Wandler gewonnene Aussage zur Ferroresonanz nicht ohne weiteres auf den Wandler im Schaltfeld übertragbar ist. Dies wird durch den Vergleich von Bild 6 und Bild 7 unterstrichen, in denen die Magnetisierungsströme trotz gleicher Werte für alle Elemente keine Ähnlichkeit aufweisen. Offensichtlich nimmt das System durch die unterschiedlichen Störungen verschiedene Zustände ein.

Eine größere Serie von Simulationen hat für die Sekundäranregung einen wesentlich kleineren Erdkapazitätsbereich mit stationären Kippschwingungen ergeben als für das Schalteröffnen, doch sollte man dieses Ergebnis nicht verallgemeinern. Ein Einfluß der verwendeten Magnetisierungskennlinie ist nicht auszuschließen.

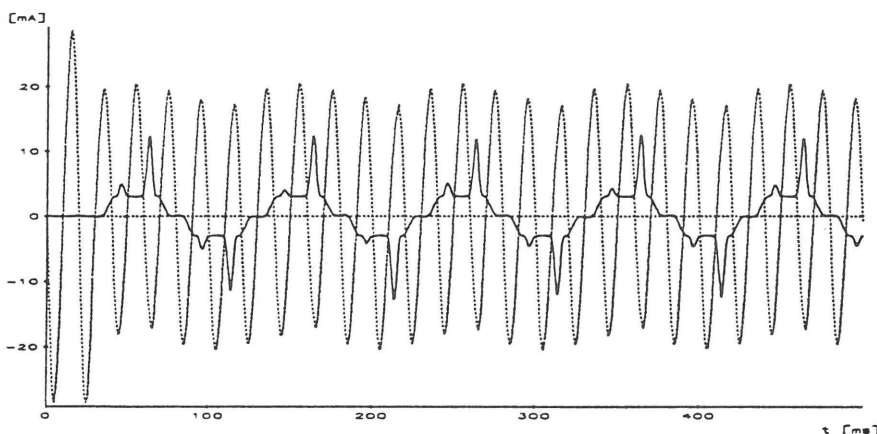


Bild 7:
Anregung von stationärer
Ferroresonanz durch das Auf-
reißen eines sekundären
Kurzschlusses
(— Magnetisierungsstrom I_M ,
- - - Netzspeisestrom I_S)

4.5.4 Harmonische und subharmonische Frequenzanteile

Die Simulation einer von Oberwellen bzw. Subharmonischen überlagerten Netzspannung ist bisher nicht befriedigend gelöst, da das ATP in der vorliegenden Version bei der Bestimmung des stationären Ausgangszustandes für die Zeit $t=0$ nur eine einzige Netzfrequenz zuläßt. Es ist selbst bei einem großen Zeitfenster nicht möglich, den eingeschwungenen Zustand zu erreichen. Dieser ist jedoch Voraussetzung für jede Aussage, da von wohldefinierten Verhältnissen ausgegangen werden muß.

Es ist jedoch wahrscheinlich, daß insbesondere Subharmonische zu beachten sind, da die Impedanz einer Induktivität mit fallender Frequenz abnimmt, so daß bei gegebener Spannung ein größerer, u.U. in den Sättigungsbereich ansteigender Strom fließt. Desgleichen sind Gleichströme zu berücksichtigen, z.B. ausgelöst durch sehr langsame Veränderungen des Erdmagnetfeldes («geomagnetic storm»), die den Arbeitspunkt auf der Magnetisierungskennlinie verschieben und so schneller zu Sättigung oder bei entsprechender Stromstärke zur Überhitzung führen können. An dieser Stelle ist ein geeigneter Ansatz zur Simulation der Anregungen noch zu erarbeiten.

5. Zusammenfassung

Zum Studium der Bedingungen für das Auftreten von Kippschwingungen bei induktiven Spannungswandlern eignet sich ein Rechenverfahren zur Simulation transienter Vorgänge im Netz (hier: ATP).

Die grundsätzlichen Untersuchungen zum Einfluß der verschiedenen Parameter sowie möglicher Anregungen werden exemplarisch an einem 245 kV Wandler im Netz untersucht.

Die Simulationsrechnungen zeigen folgende Ergebnisse:

Der Einfluß der Magnetisierungskennlinie ist überragend. Eine geschätzte oder nur ungefähre Kennlinie genügt nicht, um das teilweise hochempfindlich auf Änderungen reagierende nichtlineare System richtig zu beschreiben.

Die Hysterese der Kennlinie bzw. die Hystereseverluste haben bezüglich Ferroresonanz eher dämpfenden Charakter und können für die worst case Untersuchungen vernachlässigt werden.

Die Steuerkapazität des vorgeordneten Leistungsschalters sowie die Erdkapazität des Wandlers bzw. des Restnetzes haben entscheidenden Einfluß. Es existieren jeweils kritische Bereiche für das ferroresonante Verhalten.

Der Einfluß der Netzimpedanz ist vernachlässigbar.

Eine Bürde des Wandlers wirkt grundsätzlich dämpfend; diese ist jedoch aus Gründen der Meßgenauigkeit bzw. der maximalen Leistungsabgabe des Wandlers nicht beliebig zu vergrößern.

Das Öffnen des Leistungsschalters ist bei der betrachteten Konfiguration die wahrscheinlichste Anregung für Ferroresonanz. Schalt- und Blitzüberspannungen spielen keine Rolle. Eine sekundärseitige Anregung des Wandlers durch Aufreißen eines Kurzschlusses, wie sie z.T. in Laborprüfungen angewandt wird, ist nicht unbedingt mit der Anregung durch den Leistungsschalter vergleichbar.

Die weiteren Untersuchungen zu diesem Thema sollten folgenden Inhalt haben: Zum einen muß eine möglichst exakte und praktikable Messung der Magnetisierungskennlinie am Wandler erarbeitet werden, zum anderen sind die Parameter Remanenz und mögliche Anregungen durch Subharmonische und Gleichströme zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- [1] K.-D. Dettmann, K. Heuck, R. Kegel:
Ferroresonanz vor allem bei Spannungswandlern.
Teil 1: Entstehung der Ferroresonanzschwingung.
etz, Band 109 (1988), Heft 17, S. 780-783

- [2] K.-D. Dettmann:
Berechnung von Ferroresonanzerscheinungen unter
besonderer Berücksichtigung von Remanenz, Hysterese- und Wirbelstromeffekten.
Dissertation, Hochschule der Bundeswehr, Hamburg, 1984

- [3] C. Kieny:
Application of the Bifurcation Theory in Studying and Understanding the Global
Behaviour of a Ferroresonant Electric Power Circuit.
IEEE Tr. on Power Delivery, VOL. 6, NO. 2, April 1991, pp.866-872

- [4] B. A. Mork, D. L. Stuehm:
Application of Nonlinear Dynamics and Chaos to Ferroresonance in Distribution
Systems. Proceedings IEEE/PES Summer Meeting, Vancouver, B. C., Canada,
July 18 - 22, 1993

- [5] R. Rüdenberg:
Elektrische Schaltvorgänge
Springer-Verlag, 1953