

Entstehung von Kippschwingungen und deren Bedämpfung

Walter Schossig, VDE Thüringen

Tagung 2/2012 der VDE –AK HS- und MS-Schutz am 06. und 07.11. 2012 in Schwerin

(mit Ergänzungen)

Abstract und Quellennachweis

Im Ergebnis einer Literaturrecherche, Auswertung von Richtlinien und Empfehlungen, Betriebserfahrungen und Störungsanalysen sowie Aussagen der Wandlerhersteller wird in dem Vortrag die Historie, die Entstehung, Ursache und Zusammenhänge, Auslöser, Voraussetzungen und Erkennungsmerkmale von Kippschwingungen in 110-kV- und MS-Netzen behandelt.

Geschichte

- 1907 *Bethenod, J.* (F) berichtet über Kippschwingungen [618]
- 1920 Erstmalig wird der Begriff Ferroresonanz in der Literatur erwähnt [1619]
- 1928 *Kiefer, R.* untersucht Kippschwingungen der dritten Harmonischen in geerdeten Netzen [2836]
- 1946 *Meyer, H.*; BBC, weist auf Spannungsverlagerung durch Ferroresonanz bei einpolig isolierten Spannungswandlern hin [647]
- 1964 *Peiser* Diss. über Kippschwingungen an der TU Berlin [618]
- 1966 Diss. *Bergmann* an der TU Berlin und *Gmeinhardt* an der TH Graz über Kippschwingungen [617][619]

Phänomen der Kippschwingungen

Ferroresonanzerscheinungen sind nichtlineare Schwingungen, die dann auftreten, wenn mindestens ein nichtlinearer und ein linearer Energiespeicher untereinander gekoppelt sind.

Nichtlineare Speicherglieder als hochohmige Eisendrosselspulen sind die Hauptinduktivitäten von Trafos und Spannungswandlern

Lineare Speicherglieder sind die Kapazitäten des Netzes

Folge: hohe Spannungen und Ströme und somit Gefährdung der Betriebsmittel

Kippschwingungen

- netzfrequente
- subharmonische und harmonische

Ursachen und Zusammenhänge, die zum Auftreten von Kippschwingungen führen, sind sehr kompliziert. Der Existenzbereich hängt nach [3833][3834][3902] ab von Netz-Erde-Kapazität je Wandlersatz (z.B. im MS-Netz $C_E < 0,2$ bis $2 \mu\text{F}/\text{Wandlersatz}$ und 110-kV-Netz $C_E < 0,03$ bis $0,3 \mu\text{F}/\text{Wandlersatz}$)

- Innenwiderstand der Wandler
- Eisenverluste des Wandlerkerns
- Steuerkondensatoren an Leistungsschaltern
- Gekoppelte Freileitungssysteme
- Dämpfungswiderständen

Auslöser

- Schalthandlungen, insbesondere einpoliges Schalten
- Erdschlusswischer bzw. Verlöschen eines Erdschlusses
- Unsymmetrien, Einbau von nur zwei einpol. Spannungswandlern oder Schmelzen einer HS-Sicherung
- Falsch eingestellte Petersenspule

Vorraussetzungen

- Trafo- oder Wandlerinduktivität mit Netzkapazität **und**
- Netzspannung und Sättigungsspannung

in einer gewissen Größenordnung zueinander stehen [617]

Erkennungsmerkmale

- U_{LN} und U_{LL} ergeben „keinen Sinn“
- Starkes Brummen
- Erdschlussmeldung
- Schwebungen (typisch 3 oder 25 Hz)

Quelle	Auftreten von Kippschwingungen bei Sternpunktbehandlung			Massnahmen	Literatur
	isoliert	kompensiert	starr geerdet		
Andrä	✓✓	✓	✓	Herabsetzung L_{Wdl} / Vergrößerung C_E / RESPE, NOSPE, SSPE / $R_d = 20$ bis 40Ω bei MS und $1,5$ bis 5Ω bei 110 kV	[3834]
Bauer	✓			R_d , falls keine da-dn-Wicklung, Einbau eines Zusatzwandlers	[3948]
Buigues u.a.			✓		[3850]
Boulasikis	✓		✓	$R_d = 3$ bis 20Ω kurzzeitig	[3930]
Bergmann	✓✓	✓			[617][3921]
Craenenbroeck	✓			R_d	[3838]
Doemeland	✓			$R_d = 20$ bis 40Ω	[3837]
Dettmann u.a.	✓			R_d / Wirkleistungs-drosselpulen / Thyristoren	[3901]
Dettmann	✓✓	✓		R_d / Wirkleistungs-drosselpulen	[3902]
Feracci	✓	✓		$R_d = 57 \Omega$ an Erdschluss-hilfswicklung (oder Leistungswickl.)	[3935]
Geppert	✓			$R_d = 40 \Omega$ kurzzeitig / 50-Hz-Sperrkreis	[3926]
Gmeinhardt				R_d	[3907]
Grambow u.a.	✓				[Gra]
Heißrath	✓			R_d	[3832][3833]
Heuck u.a.	✓✓	✓			[3927]
Hoolmanns	✓	✓		Kippschwingungsfreie Wandler / Wirkleistungs-drosseln / R_d	[3938]
Hopkins	✓				[3903]
Kegel	✓	✓		$v \neq 1$	[3835]
Kiefer	✓		✓		[2836]
Koch				Leitungszuschaltung / R_d sekundär oder primär	[3924][3925]
Kraeft	✓✓	✓	✓	$R_d = 20$ bis 40Ω bei MS und $1,5$ bis 5Ω bei 110 kV	[3936]
Kunde			in SF ₆ -Anl. ✓	Wanderauslegung	[3839]
LaPierre	✓				[3904]
Nitzschke				$R_d = 5 \Omega$ kurzzeitig / RESPE, NOSPE. SSPE	[3937]
Meyer,H.	✓			R_d	[647]

Kippschwingungen



Meyer,T.	✓	✓			[3940]
Morav	✓			R_d , bei 110 kV ≥ 1000 W	[649][3920]
Peiser					[618]
Reiche				Kurzschliessen der e-n-Wicklung über Automat, Ohmsche Widerstände	[4359]
Robinson	✓		✓		[648]
Ruschk	✓✓			$R_d = 60 \Omega$, 200 W	[3929]
Schär	✓			Einbau Spannungswandler am Trafosternpunkt und $R_{pSek} = 35 \Omega \cong R_{pPrim} 184.000 \Omega$	[3967]
Sowade	✓			Einbau von Zusatzkondensatoren / Einbau Glühlampe 150 W, 130 V kein Erfolg / $R_d = 2 \Omega$ als Kurzzeitdrossel	[3922]
Valverde u.a.	✓	✓			[3846]
Piasecki	✓✓	✓	✓	R_d nullsystemspannungsabhängig /	[2969]
SALH	✓✓			$R_d = ca. 20 \Omega$	[SALH-PK]
Schutzleitfaden	✓	✓	✓	$R_d = 20$ bis 40Ω , 6 A bei MS und etwa 5Ω , 25 A bei 110 kV	[E2]
E.ON Netz	✓	✓		$R_p = 50 \Omega$ im 110-kV-Netz und 20Ω in MS-Trafoeinspeisung	[E.ON N]
E.ON edis				R_p im 110-kV-Netz und in MS-Trafoeinspeisung	[edis]
E.ON Thüringen				$R_d = ca. 20 \Omega$, 6 A	[ETE]
GWBS, GWW, PW, SWEm, SWH	✓	✓		Wirkleistungsdrossel und parallel $R_d = 50$, 220 W oder ein $R_d = 20 \Omega$, 750 W	[GWBS][GW W][PW][SWE m][SWH]
Ritz				$R_d = 20 \Omega$	[Ritz]
Verschiedene SWe				$R_d = 16 \Omega$, 550 W	[SWJ]

Legende

- ✓ Kippschwingungsgefahr bzw. unter bestimmten Bedingungen gegeben
- ✓✓ starke Kippschwingungsgefahr
- C_E Erdkapazität
- L_{Wdl} Wandler-Nenninduktion
- R_d Ohmscher Dämpfungswiderstand

Zusammenfassung

Um Schäden an Spannungswandlern in kippschwingungsgefährdeten Netzen zu vermeiden und einheitlich bei Schutz- und Messwandlern zu verfahren:

- Einsatz von ohmschen Kippschwingungsdämpfern $22 \text{ bis } 25 \Omega \pm 10 \%$, 600 W, in besonderen Fällen Wirkleistungs-drosseln DE6 im MS- und GSOF2504, 2 x 3500 W bei 90 V, 25 Hz bzw. 2 x 2100 W bei 80 V, 25 Hz im 110-kV-Netz
- Anschluss nach der Sicherung bei ohmschen Widerständen
- Erdung einheitlich bei Schutz und Zählung, z.B. dn(n) von L1
- Einheitliche Betriebsmittelkennzeichnung
- Anordnung der Spannungswandler möglichst im Schutzbereich
- Primärprüfung des Wandlersatzes und IBS-Messung

Literatur

- [617] Bergmann,C.: Kippschwingungen in Drehstromnetzen. Diss. TU Berlin, 1966
- [618] Peiser,R.: Kippschwingungen und Subharmonische im Serienschwingkreis mit Eisendrossel. Diss. TU Berlin 1964
- [619] Gmeinhardt: Kippschwingungen in Drehstromsystemen. Diss. TH Graz, 1966
- [647] Meyer,H.: Spannungsverlagerungen durch Ferroresonanz in Anlagen mit zwischen Phase und Erde geschalteten Spannungswandlern und Drosselpulen. BBC-Mitt. 33(1946) S. 405-410
- [648] Robinson,L.N.: Phenomena accompanying with some types of star transformer connections. Teil 1 und 2. Trans. A.I.E.E. 34(1915) S. 2183-2195 und .35(1916) S.590-597
- [649] Moraw,K.: Einpolig geerdete Spannungswandler als Ursache von Spannungsverlagerungen. ÖZE 6(1953) s. 37-40
- [1619] Irvani,M.R. u.a.: Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients – Part III: The Study Ferroresonance. IEEE TRANSAKTIONS ON POWER DELIVERY 16(2000)1,255-265
- [2836] Kiefer,R.: Über Kippschwingungen dreifacher Frequenz in magnetisch unverketteten Dreiphasentransformatoren. EuM 46(1928)38,921-926
- [2913] Bräunlich,R.; Däumling,H.; Hofstetter,M.; Prucker,U.; Schmid,J.; Schlierf,H.W.; Minkner,R.: Ferroresonanzschwingungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen. Teil 1: Definitionen und allgemeine Erklärungen. Bulletin SEV/AES (2006)23,17-22, Teil 2: Fallbeispiele, Bulletin SEV/AES (2006)24/25,27-30, Teil 3: Parameter von Ferroresonanzkreisen und Methoden zur Untersuchung. Bulletin SEV/AES (2008)22/23,33-40, Teil 4:Behebung von Ferroresonanzschwingungen. Bulletin SEV/AES (2009)1,23 -29
- [2969] Piasecki,W.; Florkowski,M.; Fulcyk,M.; Mahonen,P.; Luto,M.; Nowak,W.; Preiss,O.: Schutz vor Resonanzen – Methoden zur Vermeidung von Ferroresonanzen in Mittelspannungs-Spannungswandlern. ABB Technik (2005)4,42-46
- [3832] Heißrath,M.: Grenzleistungs- und Kurzzeitbelastungsbedingungen der Spannungswandler für Mittelspannungsanlagen. Elektrik 24(1970)2,47-49

- [3833] Heißrath, M.: Belastungsbedingungen und Fehlverhalten der Spannungswandler für Mittelspannungsanlagen bei der Bedämpfung von Kippschwingungen und ihr Einsatz für Schutzzwecke. *Elektrie* 24(1979)3,86-87
- [3834] Andrä, W.: Kippschwingungen in Drehstromnetzen. *ETZ-B* 18(1966)22,825-832
- [3835] Kegel, R.: Ein Beitrag zur Berechnung von Ferroresonanzerscheinungen in Energieversorgungsnetzen. Diss., Hochschule der Bundeswehr Hamburg, 1981
- [3837] Doemeland, W.: Kippschwingungen in Mittelspannungsnetzen – Erkennen und Bedämpfen. *Der Elektro-Praktiker* 26(1972)9,274-275
- [3838] Craenenbroeck, T. Van; Michiels, W.; Dommelen, D. Van: Bifurcation Analysis of Three-Phase Ferroresonant Oscillations in Ungrounded Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, 2, April 1999
- [3839] Kunde, K.; Niedung, L.; Umlauf, A.; Neumann, C.; Lipken, H.; Bayer, R.: Einphasige Kippschwingungen in Netzen mit induktiven Spannungswandlern. *Elektrizitätswirtschaft* 95(1996)4,162-170
- [3846] Valverde, V.; Buigues, G.; Mazón, A.J.; Zamora, I.; Albizu, I.: Ferroresonant Configuration in Power System. International Conference Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Sanriago de Compostela (Spain), 28th to 30th March 2012. <http://www.icrepq.com/icrepq'12/351-valverde.pdf>
- [3850] Buigues, G.; Zamora, I.; Valverde, V.; Mazón, A.J.; San Martin, J.I.: Ferroresonance in three-phase power distribution transformers: sources, consequences and prevention. CIREN, 19th International Conference on Electricity Distribution. Paper 0197- Vienna, 21-24 May 2007, http://www.cired.be/CIREN07/pdfs/CIREN2007_0197_paper.pdf
- [3884] Oswald, B., R.: Skript Sternpunktbehandlung. Vorlesung Elektrische Energieversorgung II, Ausgabe 2005. http://www.iee.uni-hannover.de/fileadmin/iee/Dokumente/Skripte_Prof_Oswald/SPE.pdf
- [3900] Valverde, V.; Mazón, A.J.; Zamora, G.: Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations. 317-valverde.pdf
- [3901] Dettmann, K.-D.; Heuck, K.; Kegel, R.: Ferroresonanz vor allem in Netzen mit Spannungswandlern. *etz* 109(1988)17,780-783 und 19,900-904
- [3902] Dettmann, K.-D.: Resonanzgefährdete Betriebszustände in Netzen mit Spannungswandlern. *etzArchiv* 7(1985)1,33-36
- [3903] Hopkinson, R.H.: Ferroresonance During Single-Phase Switching of 3-Phase Distribution Transformer Banks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 84 (1965)p.289-293
- [3904] LaPierre, C.W.: Theory of abnormal Line-to-Neutral Transformer Voltages. *AIEE Transactions* 50 (1931) p.328.-342
- [3905] Clarke, E.; Peterson, H.A.; Light, P.H.: Abnormal Voltage Conditions in Three-Phase Systems Produced by Single-Phase Switching. *Trans. AIEE, Power Apparatus and Systems*, vol.60, 1941, pp 329-339
- [3906] Behrend, H.: Ein allgemeines Schaulinienbild der in Drehstrom-Freileitungsnetzen bei Erdschluß auftretenden Ströme und Spannungen. *Siemens-Zeitschrift* (1922)8,369-373
- [3907] Gmeinert, W.; Preininger, G.: Kippschwingungen in Drehstromnetzen und ihre mathematische Behandlung mit Digitalrechnern. *ETZ-A* 88(1967)1,13-16
- [3920] Morow, K.: Einpolig geerdete Spannungswandler als Ursache von Spannungsverlagerungen. *ÖZE* 6(1953)2,37-40
- [3921] Bergmann, C.: Grundlegende Untersuchungen über Kippschwingungen in Drehstromnetzen. *ETZ-A* 88(1967)12,292-298
- [3922] Sowade, H.J.: Kippschwingungen in mittelspannungsanlagen. Technische Mitteilung, SfH Mannheim, Gruppe 0-24-4, Sept. 1970
- [3923] Lawrenz, R.: Übersicht über Resonanzerscheinungen in Energieversorgungsnetzen. *Energietechnik* 20(1970)2,73-79
- [3924] Koch, W.: Kippschwingungen in Starkstromanlagen. *ETZ* 64(1943)31/31,427-430
- [3925] Koch, W.: Kipperscheinungen in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen. *Siemens Zeitschrift*, Juni 1959, H.6, S. 385-395

- [3926] Geppert,O.: Methoden zur Unterbindung ferroresonanter Schwingungen in Umspannwerken. EuM 76(1959)5,108-110
- [3927] Heuck,K.; Kegel,R.: Ferroresonanz bei Transformatoren mit freiem Sternpunkt. etz Archiv (1979)4,113-120
- [3929] Ruschk,R.: Ferroresonanz bei Spannungswandlern. ASEA Zeitschrift 3(1958)2,44-46
- [3930] Boulasikis,N.: Über Resonanzen, insbesondere Ferroresonanzen in elektrischen Energiesystemen. Teil 1 und 2. VEÖ Journal (2000)1/2,49-53 und (2000)3,37-42
- [3935] Feracci,Ph.: Ferroresonance. Cahier technique n° 190, Collection Technique, Groupe Schneider, ECT190, first issued March 1998
- [3936] Kraeft,H.: Beseitigung von Kippschwingungen. Energie 19(1967)4,122-126
- [3937] Nitzschke,M.: Entstehung und Bekämpfung von Ferroresonanzerscheinungen in H-Umspannwerken. TIKO 2(1971)2,7-10
- [3938] Hoolmanns,G.; Hülshorst,H.; Schlierf,H.-W.: Beitrag zur Lösung des Kippschwingungsproblems. EVU-Betriebspraxis (2000)12,14-20
- [3940] Meyer,T.: Kippschwingungen bzw. Ferroresonanzen auch in gelöschten betriebenen Freileitungsnetzen. EVU-Betriebspraxis (1996)1/1,22-24
- [3948] Bauer,R.: Bedämpfung von Kippschwingungen in Hochspannungsnetzen. ETZ 65(1944)5/6,53-55
- [3967] Schär,F.: Ein einfaches Mittel zur Verhinderung der Spannungsverlagerung bei Spannungswandlern, hervorgerufen durch Kippen des Schwingkreises. Bulletin SEV/ASE 45(1954)12,471-472

Weitergehende Literatur

- [2970] Köppl,G.; Läderach,S.; Lüke,E.; Kunde,K.: Ferroresonanz auf einer abgeschalteten 220-kV-Leitung durch parallelgeführte 380-kV-Leitung. Elektrizitätswirtschaft 94(1995)21,1352-1358
- [2971] Ta-Peng Tsao and Chia-Ching Ning: Analysis of Ferroresonant Overvoltages at Maanshan Nuclear Power Station in Taiwan. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 2, APRIL 2006, p.1006-1012
- [2972] Bräunlich,R.; Däumling,H.; Hofstetter,M.; Prucker,U.; Schmid,J.; Minkner,R.; Schlierf,H.-W.: Einphasige Ferroresonanzschwingungen in Hochspannungsanlage. etz (2009)1,40-51

Richtlinien und Empfehlungen

- [E2] Leitfaden zum Einsatz von Schutzsystemen in elektrischen Netzen. VDE-FNN / VEÖ. Aug. September 2009, www.vde.com, und Anhang für die Schweiz. VSE/AES. Ausgabe: 17.11.2011. www.strom.ch
- [E35] Geiger,S.; Schossig,T.: Primärprüfungen von Spannungswandlern mit CMC 356 und CMC 353.OMICRON Anwendertagung 2010. <http://www.omicron.at/de/support/customer/papers/awt2010/>
- [edis] http://www.eon-edis.com/media/TAB_3020.pdf
- [E.ON N] THN – Bauen und Errichten. 4 Sekundärtechnik. E.ON Netz
- [ETE] Grundsätze für die Auslegung des Sekundärschutzes und der Automatisierungseinrichtungen. SE 2-01, E.ON Thüringer Energie AG, Oktober 2005

- [EWR] http://ewr-netz.de/fileadmin/Dateien/EWR_Netz_GmbH/Kundenservice/Vertr%C3%A4ge_zur_Messung/Messstellenbetrieb/EWR_TMA_Strom_An1_c_Strom_Wandler_NG_N_086_0309.pdf
- [Gra] Grambow, I. u.a.: Meßwandler für Mittel- und Hochspannungsnetze. Kontakt&Studium Bd. 554, expert verlag Renningen-Malsheim 2000
- [GWW] http://www.gemeindewerke-wadgassen.de/uploads/media/Anlage_1_Technische_Mindestanforderungen_Strom.pdf
- [GWBS] http://www.gwbs-netz.de/uploads/media/anlage_2_techn_mindestanforderungen.pdf
- [PW] http://www.pfalzwerke-netzgesellschaft.de/dokumente/PW_Anlage_1_1_TMA.pdf
- [Ritz] http://www.ritz-international.com/fileadmin/pictures/cms/pdf/downloads/RITZ%20-%20Damping%20Unit%20Against%20Ferro%20Resonance%20Oscillation%20-%20German-English%20-%20Rev_April_2010.pdf
- [SALH-PK] Strom- und Spannungswandler – Spannungswandler – Betriebsverhalten und Schaltungsanordnungen. PK Teil B07-02-03, Starkstromanlagenbau Leipzig-Halle, SALH, Ausg. 10.83.
- [Scho-Ns] Schossig, W.; Schossig, T.: Netzschutztechnik. EW Medien und Kongresse GmbH, Frankfurt a.M. / VDE Verlag, Berlin, 4. Auflage 2013
<http://www.ew-online.de/>
- [SWH] http://www.stadtwerke-homburg.de/fileadmin/dokumente/Netze_PDF/Erdgas/M_anlage3_tma_strom_24062011.pdf
- [SWJ] http://www.stadtwerke-jena.de/fileadmin/stadtwerke-jena.de/Netzbetrieb/Netzbetrieb_beides/SWEJ-S_G_MRV-A2-TechA_ab10-10.pdf
- [UniH] http://www.iee.uni-hannover.de/fileadmin/iee/Dokumente/Skripte_Prof_Oswald/SPE.pdf

Anlage [Vortragsfolien](#)

info@walter-schossig.de, www.walter-schossig.de