

H1 100 Jahre Petersenspule

Kurzfassung

Die Sternpunktbehandlung spielt in elektrischen Netzen für den Normalbetrieb kaum eine Rolle. Im Falle eines Erdfehlers ist sie jedoch von entscheidender Bedeutung. Die bei der Drehstromübertragung auftretenden Probleme und deren Lösung durch den Einbau einer Erdschlussspule sowie der Weg zur optimalen Kompensation des Erdschlussstromes werden in dem Beitrag chronologisch wiedergegeben.

Die Drehstromübertragung

Im Jahre 1887 beschreibt der deutsche Ingenieur Friedrich August Haselwander in seiner Patentschrift ein Dreiphasen-Übertragungssystem mit Generator, Aufspanntransformator, Fernleitung, Abspanntransformator und Antriebsmotor (Bild 1). Michael Dolivo-Dobrowolsky, AEG, „dachte lange nach über die eigentümliche Überlagerung der drei Ströme in den drei Leitungen, wo keine Rückleitung vorhanden und wo eigentlich jede Leitung zugleich Rückleitung für die anderen bildet. ...nannte dies Dreifachverketteter Wechselstrom oder Drehstrom.“ [1] Bei der ersten Drehstromübertragung Laufden-Heilbronn wurden die Sternpunkte des Generators sowie der Auf- und Abspanntransformatoren mit der Erde verbunden, sodass starre Sternpunktterdung vorlag. Die Sternpunktterdung hat jedoch „sehr bedeutende Störungen im Telefonbetrieb herbeigeführt“.

Während in den USA und in England die Erdung der Generator- und Transformatorensternpunkte die Regel wurde, war dies in Deutschland wegen der Posttelegrafie von der Postverwaltung untersagt.

In Netzen mit isoliertem oder großen Widerständen geerdeten Sternpunkt sind die elektrischen Verhältnisse bei Erdschluss gegenüber denen bei Kurzschluss grundsätzlich verschieden.

Die unmittelbare Sternpunktterdung hat den Nachteil, dass bei einpoligen Fehlern eine Auslösung durch den Kurzschlussschutz erforderlich ist. Um die Vorteile der Erdung ohne den Nachteil der sofortigen Abschaltung bei Erdschluss zu haben, werden im Jahre 1913 bei Pensinsular Power Co. (US) durch den Erdstrom die Maximal-Relais außer Tätigkeit gesetzt und ein Lätwerk betätigt. [2]

Netze mit isoliertem Sternpunkt bieten den großen Vorteil, dass Fehler Leiter-Erde nicht zu kurzschlussartigen Strömen führen und somit auch keine Abschaltung erforderlich ist. Lichtbogenfehler verlöschen unter bestimmten Bedingungen.

Die Nachteile der isolierten Sternpunktbehandlung sind allerdings ein großer Strom an der Fehlerstelle, hohe Schrittspannung und intermittierende Erdschlüsse mit Überspannungen bis zum 3,5fachen der Leiter-Erde-Spannungen.

Während im Kabelnetz durch den symmetrischen Aufbau in allen Leitern gleiche Leiter-Erde-Kapazitäten zu verzeich-

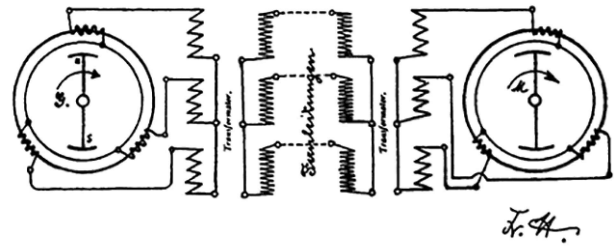


Bild 1: Drehstromübertragung nach Haselwander

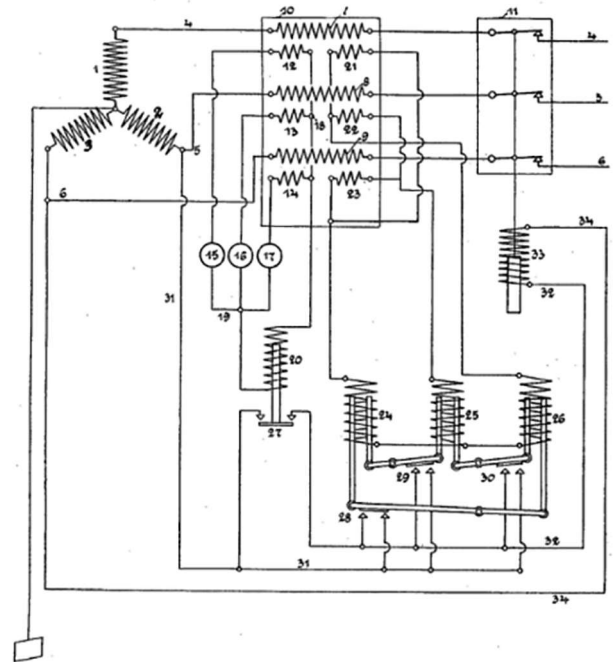


Bild 2: Spannungssummenschaltung zur Erdschlusserfassung

nen sind, ist die am Sternpunkt gegen Erde im Normalbetrieb auftretende U_0 -Spannung sehr gering. Im Freileitungsnetz liegen infolge der Leiteranordnung andere Verhältnisse vor, sodass auch im erdschlussfreien Betrieb eine unerwünschte Nullpunktverschiebung U_0 auftritt. Diese wirkten sich in Hochspannungsnetzen > 50 kV besonders aus, sodass bei der ersten 100-kV-Drehstromübertragung Europas Lauchhammer-Riesa im Jahre 1912 erstmals eine Verdrillung vorgenommen wurde.

Der Erdschluss und seine Erfassung

Bei der Installation elektrischer Leitungen wurde in der Niederspannung vorwiegend Holz verwendet. Daraus resultiert auch der noch heute übliche Begriff „Klemmbrett“. Um Bränden vorzubeugen wurde in der ersten deutschen Sicherheitsvorschrift – dem Vorläufer der heutigen VDE 0100 – im Jahre 1895 vorgeschrieben: „Die Hauptschalttafeln in Betriebsräumen sollen aus unverbrennlichem Material bestehen, oder es müssen sämtliche stromführende Theile auf isolierenden Unterlagen montiert werden.“

Zur Erdschlusserfassung verwendet Schuckert im Jahre 1903 in seinem Patent DRP 160069 „Sicherungsvorrichtung für Wechselstromanlagen“ eine Spannungssummenschaltung (Bild 2).

Torsten Holmgren entwickelt 1911 die nach ihm benannte Holmgrenschtaltung, indem eine Parallelschaltung der drei Leiterströme vorgenommen wird. Eigentlich waren es Schuckert 1903 bzw. Nicholson 1908 und Zachrisson 1909. [3]

Der geschichtliche Rückblick zeigt, dass in den deutschsprachigen Ländern die Mittelspannungsnetze zunächst mit freiem Sternpunkt betrieben wurden. Diese Betriebsweise lag nahe und man hatte auch infolge der geringen Netzausdehnung (geringer Erdschlussstrom) und der großen Reserve im Isolationsniveau der Geräte keine besonderen Schwierigkeiten. Mit dem Ansteigen der Erdschlussströme wesentlich über 50 A kam es aber nicht mehr zum Verlöschen der Erdschlusslichtbögen. Umgekehrt stieg die Gefahr von intermittierenden Erdschlüssen bei Netzen mit $I_{CE} < 10$ A sehr an. [4]

In den Jahren 1916 bis 1918 beschäftigte sich daher Waldemar Petersen intensiv mit dem Einfluss des Erdschlussstromes auf die Betriebssicherheit des Netzes. Nach Überschreiten bestimmter Werte blieb der Erdschlussstrom als Lichtbogen stehen, wenn auch die Erdschlussursache nur vorübergehend auftrat. Er erkannte dabei den Zusammenhang des Erdschlussreststromes mit einer ganzen Reihe verschieden gearteter Störungen, wie Leitungsbrüche, Isolatorschäden, Dauererdschlüsse, Schmelzen von Sicherungen von Netztransformatoren und Überspannungen. Hinzu kommt die Lebensgefahr zum Beispiel an Masten und Stationen bzw. an der Fehlerstelle. In Netzen mit kleinen Generatoren übersteigt der Betrag des Erdschlussstromes den Nennstrom des Generators. [5]

Eines seiner wichtigen Ergebnisse seiner Untersuchung des aussetzenden Erdschlusses war die Feststellung der beim Verlöschen des Erdschluss-Lichtbogens abgetrennten Gleichspannungsladungen. Die hohe Gleichspannung, welche das ganze Netz nach dem Verlöschen gegen Erde annimmt, ist die Ursache für Rückzündungen und hiermit der Überspannungen des aussetzenden Erdschlusses. Der technisch richtige Überspannungsschutz soll nicht etwa entstandene Überspannungen ableiten und die Anlage gegen Überspannung schützen, sondern er hat die Aufgabe, die Überspannungen in ihrer Entstehung zu unterdrücken. Um das Übel an den



Bild 3:
Erste Petersenspule

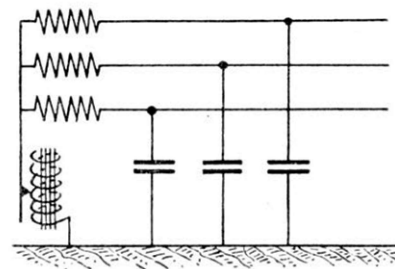


Bild 4: Petersenspule am Transformatorsternpunkt

Wurzeln zu packen, muss eine rasche Beseitigung der abgetrennten Ladungen erfolgen. Hierfür kommen in Frage:

- Funkenableiter mit Dämpfungswiderstand,
- dauernd eingebaute ohmsche Widerstände zwischen Leiter und Erde
- ohmsche Widerstände zwischen Generatoren- oder Transformatoren-Sternpunkten und Erde
- und schließlich als letztes die Erdschlussspule. [6]

Die Erdschlussspule

Die jahrelangen Forschungsarbeiten über die Ursachen der beobachteten Überspannungen führten Petersen zur Erfindung der Erdschlusslöschspule. Bei der Untersuchung der Wirkungsweise von ohmschen Widerständen zwischen den Generator- bzw. Transformator-Sternpunkt und Erde zeigten die rechnerischen Ergebnisse des Einflusses der Streuinduktivitäten, dass diese den über die Teilkapazitäten der Leiter fließenden Fehlerstrom verkleinerten. Dieses überraschende Ergebnis der Kompensationswirkung brachte Petersen auf seine erfolgreiche Idee. Er schreibt selbst: „Von dieser Erkenntnis bis zur Auffindung der Erdschlusspule war nur ein kleiner Schritt“. [7]

Petersen war zunächst beeindruckt von der von Thieme 1916 vorgeschlagenen selbsttätigen Schutzerdung. Dieser Erder bestand in der damaligen AEG-Ausführung aus drei einpoligen, zwischen Leiter und Erde geschalteten und von je einem Nullspannungsrelais gesteuerten Ölschaltern und diente zum Entlasten der Erdschlussstelle. Der jeweils betroffene Leiter wird zunächst zweimal vorübergehend geerdet. Besteht der Erdschluss noch, wird auch ein drittes Mal, aber jetzt für dauernd, geerdet. Im Jahre 1917 berichtet Petersen erstmalig über die Teilkapazitäten von Freileitungen und die Berechnung des Erdschlussstromes. 1918 folgte eine Arbeit über die Unterdrückung des aussetzenden Erdschlusses durch Nullwiderstände und Funkenableiter. Um die gleiche Zeit veröffentlichte er einen Aufsatz über die Beseitigung von Freileitungsstörungen durch Unterdrückung des Erdschlussstromes und -lichtbogens. Erst dann entwickelte Petersen eine induktive Erdschlusspule am Sternpunkt von Transformatoren (Bild 4).

Seine Idee wird ihm 1917 unter dem Titel „Einrichtung zur Unterdrückung des Erdschlußstromes von Hochspannungsnetzen“, Patentschrift Nr. 304823, vom Kaiserlichen Patentamt anerkannt. Der Hauptanspruch lautet: „Einrichtung zur Unterdrückung des Erdschlußstromes von Hochspannungsnetzen, dadurch gekennzeichnet, daß unter Benutzung der an sich bekannten Nullpunkterdung über Drosselspulen diese

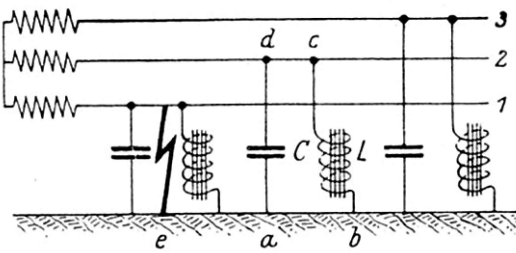


Bild 5: Wirkung der Erdkapazitäten und der Drosseln bei Erdschluss

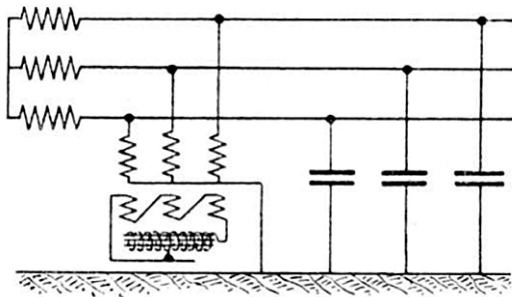


Bild 6: Bachscher Löschtransformator

derart bemessen sind, daß sie unter der Phasenspannung einen Strom aufnehmen, der gleich oder annähernd gleich dem Erdschlußstrom des Netzes ist". Patentiert sind hierin auch die Anordnung einzelner Drosseln (Bild 5) an die Phasen und der Anschluss an einen über Bildung eines künstlichen Nullpunktes. [8]

Später werden ähnliche Lösungen, wie z.B. Dissonanzspule, Löschtransformator oder Polerdungsdrossel, entwickelt.

Die erste im Betrieb erprobte Erdschlussspule (Bild 3) wurde nach Anleitung von Petersen aus einem alten Drehstromtransformator hergestellt und im Jahre 1917 bei der Kraftwerk Altwürttemberg A.-G., Wasserkraftwerk Pleidelsheim, von Petersen vorgeführt und in Betrieb genommen. Sie war

für max. 40 A ausgelegt und an den Sternpunkt eines der vier 10-kV-Generatoren des Kraftwerkes angeschlossen. Die Stromstärke wurde eingestellt, indem Pressspan zwischen die Kerne und das Joch kam, also durch Ändern des Luftspaltes oder der Windungszahl. Durch den weiteren Ausbau des 10-kV-Netzes reichte die Spule nicht mehr aus und wurde 1928 dem Deutschen Museum in München zur Verfügung gestellt.

1919 erschien von Petersen der erste Aufsatz über die Begrenzung des Erdschlussstromes und das Unterdrücken des Erdschlusslichtbogens durch die Erdschlussspule.

Im Jahre 1918 schlägt Richard Bauch den nach ihm benannten Bauchschen Löschtransformator (Bild 6) vor. Eine weitere Lösung war der Pollösche Löschtransformator und eine Anordnung nach Reittoffer, bei dem die Löschspule auf dem 4. Transformatorschenkel angebracht ist, aus dem Jahre 1921. [8]

In Deutschland ging man sehr rasch ab etwa 1920 zur Erdschlusslöschung über. Österreich, die Schweiz und Skandinavien schlossen sich dieser Entwicklung weitgehend an.

Nach dem Einbau in dem 256 km umfassenden 50-kV-Netz des Kraftwerkes Laufenburg gingen die Auslösungen von über 50 pro Monat auf weniger als eine pro Monat zurück.

Im Jahre 1920 erfolgt die Installation einer Petersenspule in Castell Modame, Städtische E.-W., Rom (I), 30 kV, 42 Per/s. Ein Jahr später wird die erste Petersenspule in den USA im 44-kV-, 60-Per/s-Netz der Alabama Power Company (US) in Betrieb genommen [12]. In Trollhättan (S) ist in den 20er Jahren die normale Nullpunktserdung im 50-kV-Netz, 25 Hz, durch Petersenspulen ersetzt worden [13]. Prof. Takashi Ohtsuki, Kumamoto Technical College, berichtet 1924 vom Einsatz von Petersenspulen bei langer 50-kV-Leitung in Japan [9]. Die Inbetriebnahme der seinerzeit größten und für die höchste Spannung eingesetzte Erdschlussspule (Bild 7), GE, in den USA und vermutlich in der ganzen Welt erfolgte 1935 in der 230-kV-Leitung in Boulder Dam, Southern California Edison Co. (US) [14]. Im Ergebnis einer Studie des Netzbetreibers Iberdrola S.A und University of the Basque Country wird im Jahre 2000 in Gorliz, Basque Country, die erste Petersenspule in Spanien installiert [10].

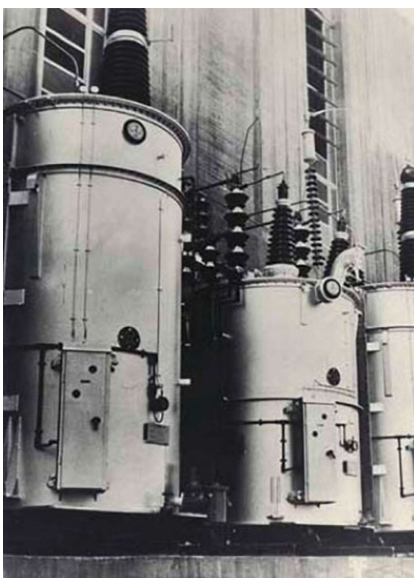


Bild 7: 230-kV-Erdschlussspule, Southern California Edison Co.



Bild 8: Erdschlussspule bei HPSC, China

Aber auch die 110-kV-Netze hat man zuerst mit freiem Sternpunkt betrieben. So wurde z. B. das sächsische 110-kV-Netz bis 1928 isoliert gefahren, eh man dann zum Einsatz von Petersenspulen überging. [4]

1994 erfolgt die Einführung der kompensierten Sternpunktterdung in den UW'en Angresse, Bacchus u. Lamotte-Beuvron, EDF GDF SERVICES Sud Aquitaine, Manche u. Loir et Cher (F). [11]

Eine heute bei dem chinesischen Verteilnetzbetreiber Handan Power Supply Company, HPSC, eingesetzte Petersenspule zeigt Bild 8.

Im Jahre 1922 erfindet P.v.d. Sterr, V&H, die offene Dreieckswicklung, die heutige e-n- oder da-dn-Wicklung bei Spannungswandlern und schlägt als erster Erdschlussleistungsrelais vor. Der genialen Idee, die e-n-Wicklung für $100/3V = 33V$ auszulegen, verdanken wir es, dass bei einem „satten Erdschluss“ 100 V, also 100 % Verlagerungsspannung, als Messgröße vorhanden ist.

Die Verstimmung der Spulen

Die Zunahme der Netze erforderte eine Vergrößerung des Spulenstromes und eine Verbesserung des optimalen Anpassens. Hundt, AEG, entwickelte 1924 die Doppelspule (Bild 9), mit der ohne nennenswerte Sättigungsschwankungen ein Regelverhältnis von 1:4 erreicht wird. Diese Doppelspule besteht aus zwei übereinander angeordneten Erdschlussspulen, die über ein gemeinsames Mitteljoch zusammengebaut sind. Ihre Wicklungen können einzeln oder parallel benutzt werden. der gemeinsame Mittelsteg führt nur dann einen magnetischen Kraftfluss, wenn die Spulen einzeln betrieben werden oder auf solche Anzapfungen geschaltet sind, auf denen die Flüsse voneinander abweichen. [8]

1927 werden erste Petersenspulen im Wiener 28-kV-Kabelnetz, in der Zentrale Engerthstraße, 2 Spulen, 16,2 kV, 1050 kVA, für 65 A mit Anzapfungen bei 55, 45 und 35 A, aufgestellt [15]. Die beiden Spulen reichten damals nur knapp aus. Das 28-kV-Netz wuchs in den folgenden Jahren rasch an. Während die alten 95 mm² Gürtelkabel einen Erdschlussstrom von 1,48 A/km haben, beträgt dieser bei dem 120 mm²-Höchstädter-Kabel 3,9 A/km. In den Folgejahren werden weitere Spulen in Simmering, Engerthstrasse und Süd aufgestellt. Die Abschaltung von nur einem Kabel brachte eine Verstimmung bis zu 35 A mit sich. Um nun rasch durch Wahl einer anderen Anzapfung Korrekturen vornehmen zu können, wurde vom Lastverteiler der Direktion ein Kompensometer in

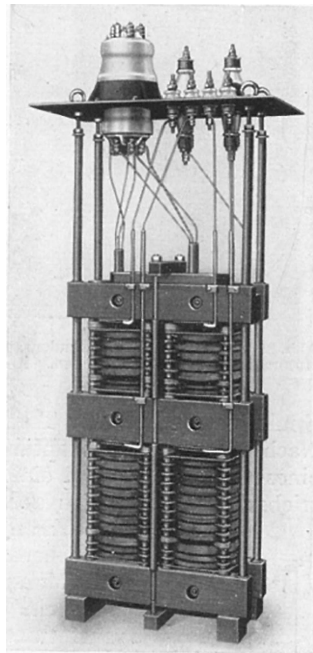


Bild 9: Doppelspule nach Hundt

Form einer elektrischen Waage geschaffen. Sämtlich 31 Kabel und alle Spulen mit ihren Anzapfungen sind durch ohmsche Widerstände nachgebildet. Durch Anlegen einer Gleichspannung von $2 \times 220V$ an die Widerstandsgruppen bei gemeinsamen Nullleiter kann der Erdschlussstrom, der Spulenstrom und die Differenz der beiden als induktiver oder kapazitiver Reststrom am entsprechen geeichten Stromzeiger abgelesen werden.

Anfänglich wurden nur fixe bzw. stufenweise einstellbare Petersenspulen verwendet.

1938 beginnt die Entwicklung von Petersenspulen mit stufenloser Einstellung durch Änderung des Luftspaltes. Zunächst durch Veränderung des Luftspaltes in Schenkelmitte des Mantelkerns, später ein Kern mit radial angeordneten Blechen und Rückschlussschenkeln (Bild 10). Mit der Entwicklung der kontinuierlich einstellbaren Spulen ergab sich die Einstellung eines beliebigen Kompensationsgrades während des Betriebes. Der Einstellbereich der Tauchkern-Erdschlussspulen konnte bis auf 1:10 erweitert werden, während er bei einer Stufenspule höchstens 1:2,5 beträgt.

Als einfachste Methode der Ermittlung des Spuleneinstellstromes wurde die Messung der vor allem in Freileitungsnetzen auftretenden natürlichen Spannungsunsymmetrie genutzt. Als verbessertes Verfahren wird 1930 von Wilhelm und Groß die Aufnahme der Ortskurve der Sternpunktterdspannung herausgearbeitet.

H. Hueter. und W. Schäfer, AEG, entwickeln 1931 eine Überwachung der Abstimmung eines gelöschten Netzes mit einem Kompensator [8]. In dem durch die Erdschlussspule und der Netzkapazität gebildeten Parallelkreis ist bei voller Abstimmung die Impedanz am größten. Das Kompensometer misst nun die Größe dieser Impedanz bzw. den reziproken Wert und gibt durch den Richtungsausschlag den Charakter der Fehlkompensation direkt in Ampere an, ob Über- oder Unterkompensation vorliegt.

Während diese Kompensationseinrichtungen eine quantitative Erfassung vornahmen, wurde von Krämer, AEG, nach dem 2. Weltkrieg eine qualitative Erfassung durch die Entwicklung eines Resonanzreglers (Bild 11) geschaffen. Dieser

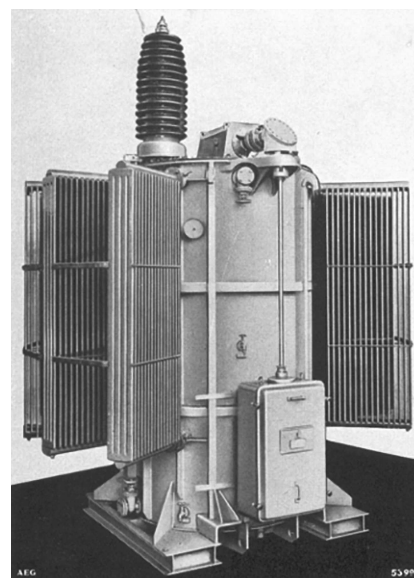


Bild 10:
Tauchkernspule,
AEG

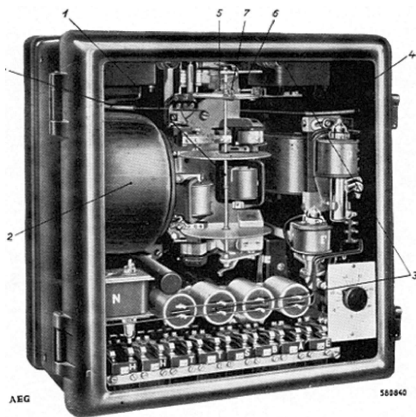


Bild 11: Resonanzregler, Kramer, AEG

überwacht die Unsymmetriespannung des Netzes und bei Unterschreitung eines eingestellten Wertes regelt er auf seinen Maximalwert. Bei dieser Stellung ergibt sich die beste Abstimmung, da die Resonanzspannung eingeregelt ist.

1981 bringt Spezialelektra (A) den ersten μ P-gesteuerten Verstimmungsgradregler EZR2 (Bild 12) auf den Markt. Den Resonanzregler SRK mit 6-Bit-Rechner (Bild 13) fertigt die AEG 1992.

Im Jahre 2004 führt die TEAG mit dem 2001 von A. Eberle auf den Markt gebrachten REG-DP (Bild 14) eine Parallelregelung von verteilten Petersenspulen im Thüringer 110-kV-Netz ein [16].

Um für die Erdschlussrichtungserfassung den Reststrom zu erhöhen werden die Petersenspulen neben der 100-V-Messwicklung mit einer 400-V-Leistungswicklung ausgestattet. Eine spezielle Nutzung dieser Wicklung erfolgt 1979 mit der Einführung der Pulsortung durch Gossen und der Entwicklung der Kurzzeitigen Überkompensation, KÜK, 1983 durch EK Cottbus. Bild 15 zeigt die Realisierung im UW Waltershausen, EK Erfurt.

Die Reststromkompensation

1926 wurden Klagen laut, dass trotz einwandfreier Erdschlusskompensation ein Löschen des Erdschlussstromes nicht immer zustande käme. Von der AEG wurde daraufhin in Zusammenarbeit mit E. Hueter, TH Darmstadt, der Erdschlussreststrom untersucht. Sie ermittelten als Bestandteil des Erdschlussstromes eine Blindkomponente – als Merkmal der Über- bzw. Unterkompensation – und in einen Watt- oder Wirkreststrom – Wirkanteile der Spule und des Netzes – sowie einen auf Oberschwingungen entfallenden Anteil [8]. Mehrere Verfahren zur Verringerung des Wirkreststromes wurden von Petersen angegeben. Beim bekanntesten Vorschlag wird in Reihe mit der Erdschlussspule eine Zusatzspannung eingeführt, die der Spannung des erdschlussbehafteten Leiters um 90° nacheilt und dem Betrag das Netz-Wirkreststromes entspricht. Weitere Lösungen entwickelten A.v. Schaubert, und H. Piloty (1926) und nach dem 2. Weltkrieg W. Kramer. Piloty kompensiert die Oberschwingungen durch einen besonderen Resonanzkreis, indem parallel zur Erdschlussspule abgestimmt auf z. B. 5. Oberwelle eine weitere Petersenspule in Reihe mit einer Kapazität angeschlossen wird. Die Schaltung

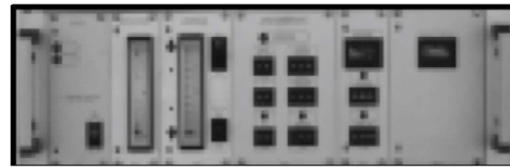


Bild 12: Verstimmungsgradregler EZR2, Spezialelektra

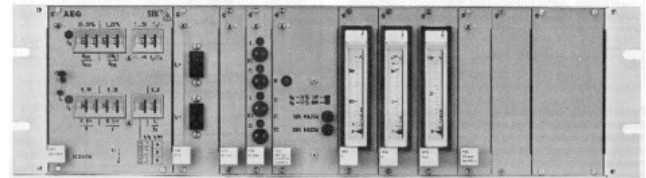


Bild 13: Verstimmungsgradregler SRK, AEG

wurde in den Netzen des UW Hohenlohe-Oehringen, der Thüringer Elektrizitäts-Lieferungsgesellschaft, der Lechwerke und des Überlandwerkes Oberhessen verwendet. [8]

Die erste Anlage zur Reststromkompensation RCC, Swedish Neutral, wird 1992 auf der Insel Gotland (S) in Betrieb genommen. In Deutschland wird 1994 die erste Reststromkompensations- und Erdschlussuchanlage RCC (Bild 16), Swedish Neutral, im UW Weding, SCHLESWAG und UW Tessin, HEVAG, in Betrieb genommen.

Erdschlussversuche

Zur erstmaligen Funktionskontrolle bzw. zur Ermittlung des richtigen Spuleneinstellwertes wurde die „Herstellung von Erdschlüssen“ bereits 1937 als zweckmäßig betrachtet. Um eine Begrenzung des Kurzschlussstromes beim Auftreten eines Doppelerdschlusses zu erreichen, nahm man anfänglich eine Erdung über Widerstand vor.

Im 100-kV-Netz des Bayernwerkes hatten in den 1920er Jahren Versuche zur Nachprüfung der Netzkompensation in einem rechnerisch ermittelten Wert von 246 A ergeben, dass die Löschfähigkeitsgrenze bei etwa $\pm 8\%$ Über- oder Unterkompensation liegt. Die Bedeutung der richtigen Kompensation war bewiesen [17]. Unter Teilnahme von Fachleuten aus Luxemburg, Frankreich und Belgien testet 1933 (Bild 17) CEGEDEL (L) eine 140-kVA-Spule und wattmetrische Erdschlussrichtungsrelais Nr.232, AEG. [18]

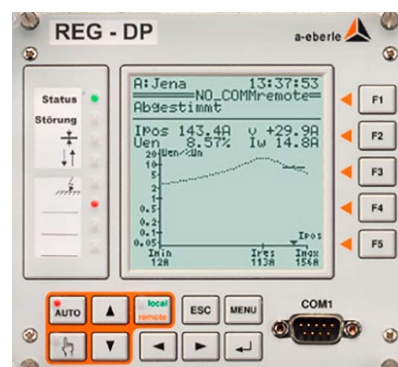


Bild 14: Verstimmungsgradregler REG-DP, A. Eberle

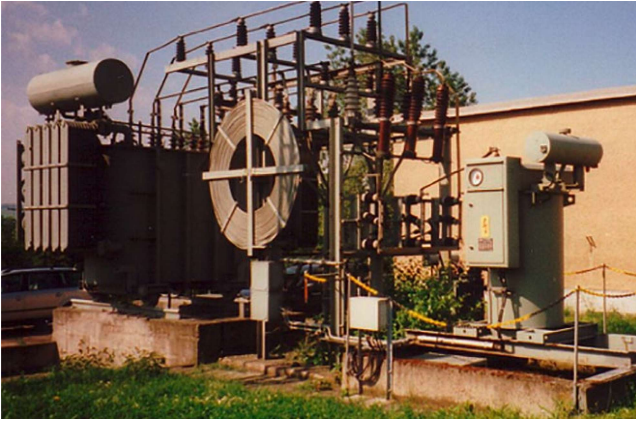


Bild 15: Kurzeitige Überkompensation, KÜK

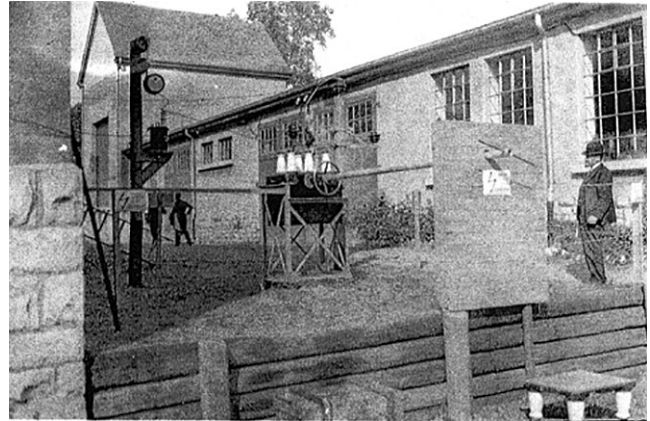


Bild 17: Testaufbau Erdschlusslöschung, CEGEDEL

Im Sommer 1941 werden ausgedehnte Versuche der von BBC entwickelten automatischen Steuerung der Löserspule an der im Kraftwerk Piottino der A.T.E.L. (CH) am Ausgangspunkt der Gotthardfernleitung aufgestellten 12.000-kVA-Löserspule (Bild 18) durchgeführt. Diese wurde von Hand verstellt und die Rückregulierung erfolgte äußerst zuverlässig und in denkbar einfachster Weise durch Wattmeter-Relais. Auch die Änderung der Einstellung bei Ab- und Zuschaltung der Leitungsstrecken geschah immer absolut fehlerfrei. Die Versuche haben die Zweckmäßigkeit der automatisch gesteuerten Löserspule voll und ganz bewiesen. [19]

Mit der Elektrischen Wiedervereinigung Deutschlands im Jahre 1995 ist das galvanisch verbundene 110-kV-Netz, 16 2/3 Hz, der DB und ÖBB mit inzwischen einer Gesamtlänge von etwa 21.000 km das größte gelöschte betriebene Hochspannungsnetz der Welt. Bei einem I_{Ce} von nunmehr 1600 A machte sich der Einsatz einer Erdschluss-Vollschutzanlage mit Erdschlussreststromkompensation in Borken erforderlich. Bei einem Test 2003 wurde ein am Boden bereits erkennbarer Schwelbrand während des Betriebes der Reststromkompensation unterbunden [20]. Bild 19 zeigt die verteilte Anordnung der Erdschlussspulen im 110-kV-DB-Netz.

Bei Erdschlussversuchen der e.dis und A. Eberle 2001 im 110-kV-Netz, UW Großbeeren, (Bild 20) und 2003 im 20-kV-Netz, UW Seelow, werden neben einem Test der Erdschlussrichtungsrelais insbesondere die Auswirkung einer Fehlkompensation auf die Brandgefahr bei Freileitungs- und Kabelerdfehlern sehr eindrucksvoll demonstriert.

Die guten Betriebserfahrungen mit der Resonanz-Sternpunktterdung der 110-kV-Netze in Deutschland waren ausschlaggebend dafür, dass auch für das 220-kV-Netz Erdschlussspulen gefertigt (Bild 21) und eingesetzt wurden. Im Jahre 1948 wird sogar vorgeschlagen, im zukünftigen 400-kV-Netz Resonanzsternpunktterdung einzuführen. Durch die Koronaverluste und Ausdehnung des 400-kV-Netzes war aber die Löschfähigkeit nicht mehr gegeben. In Bild 22 macht Roser Angaben zu Grenzrestströmen für eine Löschung bei 400 kV [21]. Das Anwachsen des Erdschlussreststromes führte jedoch dazu, dass in Netzen ab 220-kV 1950 in Schweden, 1952 in der BRD, 1957 in Österreich und 1960 in der DDR die Umstellung auf starre Sternpunktterdung begonnen wurde.



Bild 16: Reststromkompensations- und Erdschlusssuchanlage RCC, von Klaus Winter, Swedish Neutral

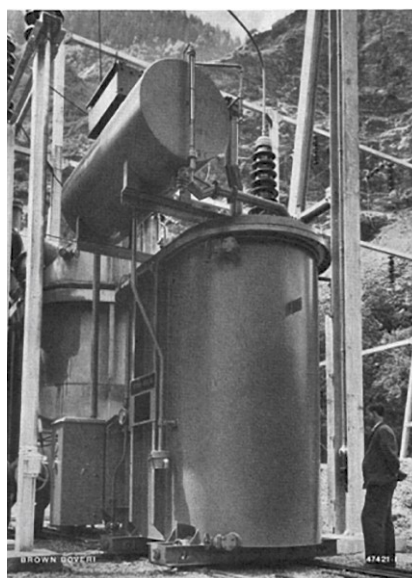


Bild 18: 12000-kVA-Spule zum Schutz der Gotthardleitung

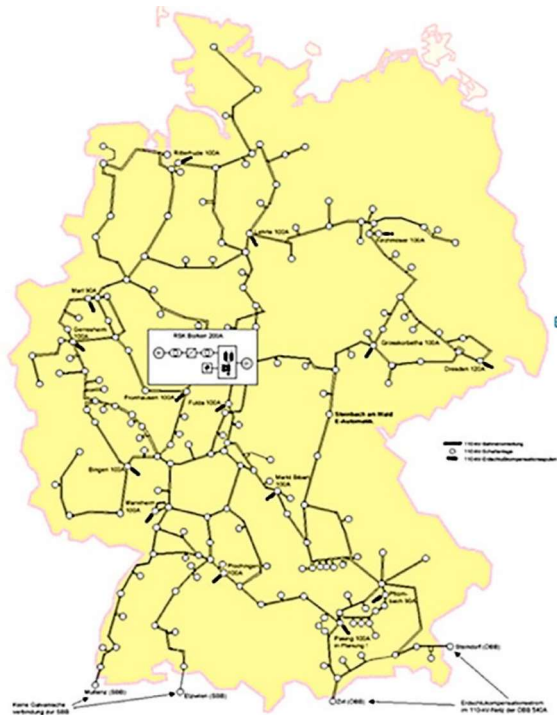


Bild 19: Erdschlusskompensationsanlagen im 110-kV-Netz der DB

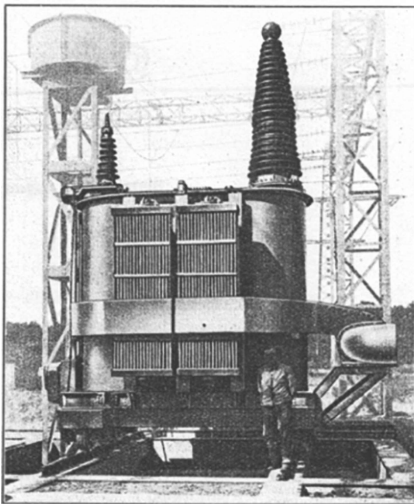


Bild 21: 220-kV-Erdschlussspule, 1.500 kVA

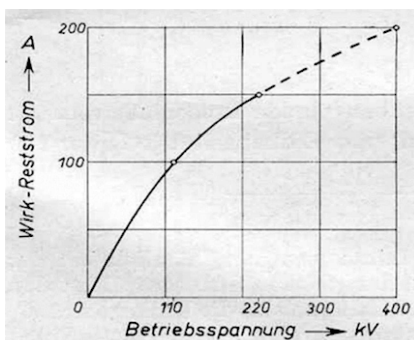


Bild 22: Grenz-Reststrom der Erdschlusslöschung nach Roser



Bild 20: 110-kV-Erdschlussversuch, e.dis

Literatur

- [1] Neidhöfer, G.: Michael von Dolivo-Dobrowolsky und der Drehstrom. Reihe Geschichte der Elektrotechnik. Bd. 19, Ausg. 2008, VDE Verlag
- [2] Voigt, M.: Die Erdung des neutralen Punktes in Drehstromanlagen. Bulletin SEV VI(1915)4,49-59
- [3] Titze, H.: Fehler und Fehlerschutz in elektrischen Drehstromanlagen. Springer-Verlag Wien: Bd. 1 1951 u. Bd. 2 1953
- [4] Pundt, H.: Grundlagen der Sternpunktbehandlung. TU Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik. 21 S. und 20 Beilagen
- [5] Petersen, W.: Beseitigung von Freileitungsstörungen durch Unterdrückung des Erdschlußstromes und -lichtbogens. EuM 36(1918)26,297-303
- [6] Petersen, W.: Unterdrückung des aussetzenden Erdschlusses durch Nullwiderstände und Funkenableiter. ETZ 39(1918)35,341-343
- [7] Waldemar Petersen – Pionier der Hochspannungstechnik, Erfinder der Petersen-Spule. Festschrift zum 100. Geburtstag. TH Darmstadt 1982, 47 S.
- [8] Schweder, B.: Forschen und Schaffen. Beiträge der AEG zur Entwicklung der Elektrotechnik bis zum Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg. Band 1, Hrsg. AEG, Berlin 1965
- [9] Ohtsuki, T.: On the Grounding of a Long-Distance Transmission Line Compensated through Petersen Coils. The selected papers from the journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, No. 14, September, 1927
- [10] Mazon, A. J.; Zamora, I.; Zabala, L.; Antepará, F.; Amantegui, J.; Saenz, J. R.: First Resonant Neutral Grounding Implementation in Spanish Distribution System. Paper accepted for presentation at PPT 2001, 2001 IEEE Porto Power Tech Conference 13-15 September, Porto, Porto
- [11] Juston, Ph.; Griffel D.: Die Erdung des MS Sternpunktes von Verteilungsnetzen in ländlichen Regionen – Die französische Lösung. B.1.1., Sternpunktbehandlung in Verteilungsnetzen - Zukunftsaussichten. Internationales

Symposium NMT 7.-8. November 1995 in Mulhouse,
Frankreich; SEE, VDE, SEV

- [12] Willheim, R.: Das Erdschlußproblem in Hochspannungsnetzen. Berlin. 1936; Verlag von Julius Springer / Printed by Printforce, the Netherlands, ISBN 978-3-540-01239-9
- [13] Halden: Relaissysteme der Staatlichen Kraftwerke Schwedens. ETZ 46(1925)45,1699-1700
- [14] Biggest ground fault neutralizer.
<http://americanhistory.si.edu> vom 25.07.2005
- [15] Lippa, E.: Der Erdschlußschutz in den Hochspannungs-Verteilnetzen der Wiener städtischen Elektrizitätswerke. EuM 55(1937)20,233-238 / 21,249-252
- [16] Hirndorf, F.: Erdschlusskompensation im Thüringer 110-kV-Netz immer optimal. etz (2004)8,52-56
- [17] Menge, A.: Das Bayernwerk und seine Kraftquellen. Berlin: 1925, Verlag von Julius Springer
- [18] Essais de bobine Petersen effectués dans le réseau 15000 V. de la Compañie Grand Ducale d'Electricité du Luxembourg (Cégédel) le 15.9.33. RAPPORT
- [19] Sachs, W.; Noack, W. G.: Rückblick auf die Entwicklung der Brown Boveri-Konstruktionen im Jahre 1941. Brown Boveri Mitteilungen XXIX(1942)1/2/3,1-83
- [20] Krämer, S.; Schmidt, R.; Winter, K.: Erdschluss-Vollschutzanlage für das 110-kV-Bahnstromnetz. eb 100(2002)8,353-362
- [21] Roser, H.: Die technischen Probleme der Drehstrom-Fernübertragung mit 400 kV. ETZ 69(1948)1,7-11

www.walter-schossig.de



*Dipl.-Ing. Walter Schossig,
VDE Thüringen*