Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 81 (1990)

Heft: 19

Artikel: Ableiterdefekte infolge Ferroresonanz einer Transformatorbank in einer 220/65-kV-Schaltanlage

Autor: Sander, Bernhard / Dobša, Josip / Grandl, Josef

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903167

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ableiterdefekte infolge Ferroresonanz einer Transformatorbank in einer 220/65-kV-Schaltanlage

Bernhard Sander, Josip Dobša und Josef Grandl

Nach Inbetriebnahme einer 90-MVA-Transformatorbank kam es beim Abschalten einer leerlaufenden 220-kV-Leitung zu Ableiterdefekten. Mit Hilfe einer rechnergestützt durchgeführten Systemanalyse fand man Transformator-Ferroresonanz und Leistungsschalterrückzündungen als Ursache für hohe transiente Überspannungen. Wirksame Abhilfe gelang durch den Einbau eines Stern/Dreieck-Kompensationstransformators und den Ersatz der 220-kV-Funkenstrekkenableiter durch Metalloxidableiter.

Suite à la mise en service d'un banc de transformateurs de 90 MVA, des défauts de parafoudre se sont produits lors du déclenchement d'une ligne 220 kV à vide. Une analyse du système effectuée par ordinateur à permis d'établir que des surtensions transitoires élevées avaient été causées suite à une ferrorésonance du transformateur et par des réamorçages du disjoncteur.

Adressen der Autoren
Bernhard Sander, Dipl. El.-Ing. ETHZ, Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG, Abt. Betrieb, 4335 Laufenburg,
Josip Dobša, Dipl. El.-Ing., Koeppl Power Experts, 5242 Lupfig, und
Josef Grandl, Dipl. Ing., ABB Hochspannungstechnik AG, Abt. ASG, 8050 Zürich

Ausgangslage

In den Jahren 1964/65 haben die Kraftwerke Mattmark AG mit ihren Zentralen Zermeiggern und Stalden im Kanton Wallis den Betrieb aufgenommen. Das starke Vorstossen des Allalingletschers Anfang der achtziger Jahre deckte mehrere Wasserfassungen zu und machte im Jahr 1987 die Inbetriebnahme der Pumpstation Zermeiggern als Ergänzung der oberen Kraftwerksstufe Mattmark-Zermeiggern notwendig, um die fehlenden Zuflüsse wieder dem Stausee Mattmark zuzuführen.

Daher wurden auch die elektrischen Anlagen in Zermeiggern unter anderem um eine 90-MVA-Transformatorbank, eine gasisolierte 65-kV-Innenraumschaltanlage und zwei Pumpmotor-Transformator-Blöcke zu je 27 MVA erweitert. Um die Zuverlässigkeit der Energieversorgung des elektrischen Eigenbedarfs der Werkanlagen und auch der Gemeinden des Saastales zu erhöhen, wurde gleichzeitig eine 65-kV-Leitungsverbindung zum neuen 65/16-kV-Unterwerk Saas der Walliser Elektrizitäts-Gesellschaft AG ergänzt. Erst diese neu entstandene Netzkonfiguration (Bild 1) ermöglichte die Schalthandlung, welche die im folgenden näher beschriebenen Phänomene und Ableiterdefekte verursachte.

Der Störungsablauf präsentierte sich wie folgt: Ausgehend vom Betriebszustand Parallelbetrieb 220/65-kV-Netz (220kV-Verbundnetz und 65-kV-Netz Oberwallis über 90-MVA-Transformatorbank und weitere 220/65-kV-Transformatoren parallelgeschaltet) sowie kein Generator- oder

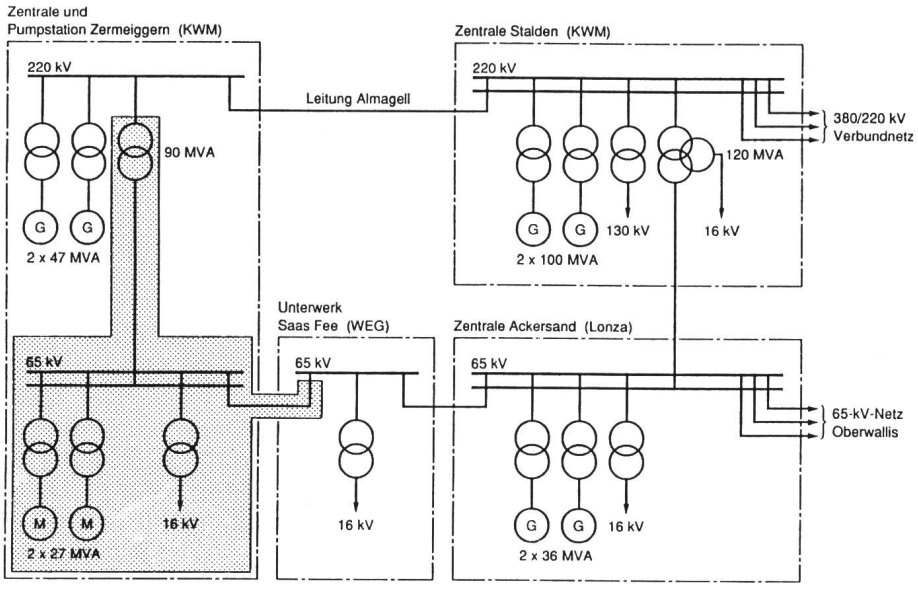


Bild 1 Übersichtsschema 220/65-kV-Netz
KWM Kraftwerke Mattmark AG
WEG Walliser Elektrizitäts-Gesellschaft AG
Ergänzung Pumpstation Zermeiggern

Bild 2
Schadensbild 220-kV-Funkenstreckenableiter

Pumpbetrieb in Zermeiggern, wurde zuerst der Leistungsschalter der 220-kV-Leitung Almagell in Stalden geöffnet. Sowohl auf der 220-kV- als auch auf der 65-kV-Seite wurden in der Folge in Zermeiggern relativ hohe Betriebsspannungen festgestellt, da nun die kapazitative Last der leerlaufenden 220-kV-Leitung Almagell wirksam wurde. Als kurz danach der Leistungsschalter der 220-kV-Leitung Almagell in Zermeiggern geöffnet, also die leerlaufende Leitung abgeschaltet wurde, kam es infolge einpoligen Kurzschlusses zu einer Schutzabschaltung der 90-MVA-Transformatorbank. Eine Kontrolle der Anlage ergab keine Hinweise auf etwaige Defekte und liess die Vermutung zu, dass diese nach wie vor intakt sei. Es ist allerdings erwähnenswert, dass die Vorschübe der Ansprechzähler der 220-kV-Transformator-Funkenstreckenableiter nicht registriert wurden. Als nämlich die 90-MVA-Transformatorbank wieder unter Spannung gesetzt wurde, blies der 220-kV-Transformatorableiter Phase L1 aus und wurde, wie auch der zugehörige Ansprechzähler, zerstört. Erneut kam es zu einer Schutzabschaltung infolge des durch den Ableiter verursachten einpoligen Kurzschlusses.

Die erste Vermutung, dass ein Defekt des 220-kV-Druckluft-Leistungsschalters Phase L1 zu Schalt-Überspannungen geführt haben könnte, wurde durch eine mechanische Schalterkontrolle nicht bestätigt. Das Schadensbild des Ableiters wies auf einen länger dauernden Abbrand der Funkenstrecken und der Siliziumcarbid-Widerstände infolge thermischer Überlastung mit einem Strom in der Grössenordnung von 100 A hin (Bild 2). So stellte sich nun die Frage, ob der Ableiter möglicherweise bereits vor dem Vorfall angeschlagen war und ob die Störung nach dem erfolgten Ersatz des Ableiters überhaupt nochmals auftreten würde. Als dann die Schaltsequenz wiederholt wurde, konnte das Verhalten der ersten Störung reproduziert werden. Zusätzlich wurde nun nach der ersten der beiden Schutzabschaltungen der 90-MVA-Transformatorbank der Ableiter-Ansprechzähler abgelesen und ein Vorschub von 10, also ein mehrfaches Ansprechen des Ableiters, festgestellt. Die vermutlich stromschwache Beanspruchung zeigte jedoch am Ableiteräusseren noch keine Spuren. Wie zuvor blies der Ableiter Phase L1 wiederum erst beim Zuschalten des leistungsstarken 220-kV-Netzes aus. Die Zerstörung wurde aus grosser Entfernung beobachtet. Ausserdem wurde entlang der 220-kV-Leitung Almagell, die mit Einfachseilen $1 \times 600\ mm^2$ Ad belegt ist, von starken Koronageräuschen berichtet. Dies dokumentiert auch die hohe verkettete Spannung von ungefähr 250...260 kV, welche an den Voltmetern in Zermeiggern verbunden mit niederfrequenten Pendelungen abgelesen wurde.

Von weiteren Versuchen wurde zunächst Abstand genommen, da man die Beanspruchung der Isolation der neuen 90-MVA-Transformatorbank durch Überspannungen mit steilen Flanken wegen des Ableiteransprechens für unnötig riskant hielt. Der Durchführung einer Studie wurde der Vorzug gegeben.

Es sei darauf hingewiesen, dass all die durchgeführten Schalthandlungen auch im normalen Netzbetrieb möglich sein müssen.

Systemnachbildung

Die Systemanalyse beinhaltete eine Reihe von Simulationen, die mit Hilfe des EMTP-Rechenprogramms durchgeführt worden sind [1]. Das dreiphasige Simulationsmodell erfasste das in Bild 1 dargestellte Netz. Besonders genau wurden Netzelemente, die sich in unmittelbarer Nähe der Fehlerstelle befanden, modelliert: 90-MVA-Transformatorbank, 220-kV-Freileitung Almagell und 220-kV-Funkenstreckenableiter.

Transformatorbank Zermeiggern:

Bauart	3 Einphaseneinheiten
Nennleistung	30 MVA/Phase
Übersetzung	$245/\sqrt{3}$ / $67{,}5 \pm 11 \times 0{,}9/\sqrt{3}$ kV
Schaltung	YNyn0
Frequenz	50 Hz
Leerlaufströme Phasen L1-L2-L3	0,19–0,20–0,22% I_N
Leerlaufverluste	26 kW
Lastverluste	105 kW
Kurzschlussspannung	10%

Der 220-kV-Sternpunkt ist starr geerdet, der 65-kV-Sternpunkt dagegen isoliert. Das 65-kV-Netz wird mit niederohmiger Reaktanzerdung betrieben. Die 90-MVA-Transformatorbank wurde wie folgt modelliert:

- je Phase verschiedene Magnetisierungskennlinien
- Ersatzwiderstand für Eisenverluste
- Wicklungswiderstände und Streuinduktivitäten
- 220-kV-Sammelschienenkapazität

220-kV-Freileitung Almagell: Es wurde das vollständige Dreiphasenmodell verwendet. Die Betriebskapazität der 19 km langen Leitung beträgt 0,214 µF/Phase.

220-kV-Funkenstreckenableiter: Für die Simulation wurde die genaue UI-Kennlinie mit einem Mindestansprechwert von 570 kV (50-Hz-Scheitelwert) berücksichtigt.

Simulationsergebnisse

Die Hypothese, dass Überspannungen, verursacht durch Ferroresonanz, für die Zerstörung der Ableiter verantwortlich waren, hat sich im Laufe der Analyse bestätigt. Es galt, zuerst die massgebende Ersatzschaltung unter Berücksichtigung des Einflusses der einzelnen Elemente auf den Ferroresonanzvorgang zu ermitteln. Bei allen Simulationen wurde die Schaltsequenz des Störfalls angewendet, das heisst:

1. Stationärer Zustand
2. Abschaltung der 220-kV-Leitung Almagell durch den Leistungsschalter in Stalden
3. Abschalten der 220-kV-Leitung Almagell durch den Leistungsschalter in Zermeiggern

Die Rechenergebnisse wurden durch Spannungs- und Stromplots dargestellt.

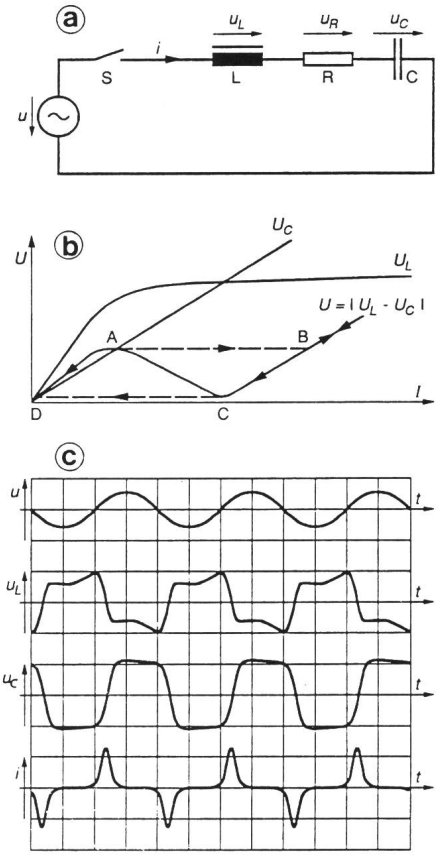


Bild 3 Ferroresonanzkreis

a Grundschaltung
b UI-Kennlinie
c Spannungs- und Stromverläufe

Grundsätzliches über Ferroresonanz

Das Bild 3 zeigt einen Serie-Schwingkreis, bestehend aus einer sättigbaren Induktivität, einer Kapazität und einem Widerstand. Wird dieser Kreis durch eine 50-Hz-Spannungsquelle angeregt, so können grundsätzlich zwei abnormale Zustände auftreten: die *subharmonische Schwingung* oder die *Ferroresonanz*.

Die subharmonische Schwingung [2] kann nur durch eine Stosserregung (Zuschalten von Schalter *S* in Bild 3) und bei bestimmten Anfangsbedingungen ausgelöst werden. Es erscheinen Stromkomponenten, deren niedrigste Frequenz eine Submultiple von 50 Hz (meistens 50/3 Hz, seltener 50/2 Hz), aber nicht 50 Hz ist.

Die Ferroresonanz dagegen tritt bei einer kontinuierlichen Spannungssteigerung über den Punkt *A* der resultierenden UI-Kennlinie des Schwingkreises (*R*-Wert ist sehr klein) auf (Bild 3, *b*). Während jeder Spannungshalbwelle kommt es zu einem Stromsprung von Punkt *A* auf Punkt *B*. Die Grundfrequenz des Stromes ist 50 Hz. Bild 3, *c*, zeigt Spannungen und Ströme bei stationärer Ferroresonanz. Wie in jedem schwachgedämpften Serie-Resonanzkreis sind auch hier die Teilspannungen U_C und U_L gegenüber der Quellenspannung *U* wesentlich verstärkt. Ob diese Zustände überhaupt auftreten können, ob sie stationär bleiben oder nur transient oder gar stochastisch erscheinen, hängt von folgenden Faktoren ab: Schaltmoment, Amplitude der Quellenspannung, Kenngrösse und Anfangsbedingungen der Kreiselemente.

Ferroresonanz äussert sich in der Regel im gesamten galvanisch verbundenen Netz durch Erdfehlermeldungen, Brummen von sättigbaren Induktivitäten (Spannungswandlern, Transformatoren usw.) sowie durch Pendelungen der Spannungsanzeigen.

Ersatzschaltung

Ein Serie-Ferroresonanzkreis gemäss Bild 3, *a*, konnte im vorliegenden Fall mit 50-Hz-Kennlinien nicht gefunden werden. Die Simulationen ergaben, dass folgende Elemente des Simulationsmodells den Ferroresonanzvorgang wesentlich beeinflussen:

- 65-kV-Netzlast
- Kapazität C_{AL} der 220-kV-Leitung Almagell
- 220-kV-Wicklungs- und Sammelschienenkapazität C_{OS}, Magnetisierungskennlinien und 65-kV-Sternpunktkapazität C_{SP} der 90-MVA-Transformatorbank.

Die Analyse der Vorgänge bei Abschaltung der 220-kV-Freileitung Almagell zeigt, dass es zu einem zweimaligen Sprung der 65-kV-Sternpunktspannung kommt, zuerst nach Stromunterbruch im erstlöschenden Schalterpol und dann nach Stromunterbruch in den beiden verbleibenden Schalterpolen. Diese Spannungssprünge erzeugen im 65-kV-Sternpunkt sowie auf der 220-kV-Seite Überspannungsspitzen, die unabhängig von Ferroresonanz auftreten ($C_{OS} = C_{SP} = 0$). Dies führt dazu, dass nach Abschaltung der Freileitung eine der Leitungsphasen eine hohe Restspannung von ungefähr 450 kV Scheitelwert aufweist.

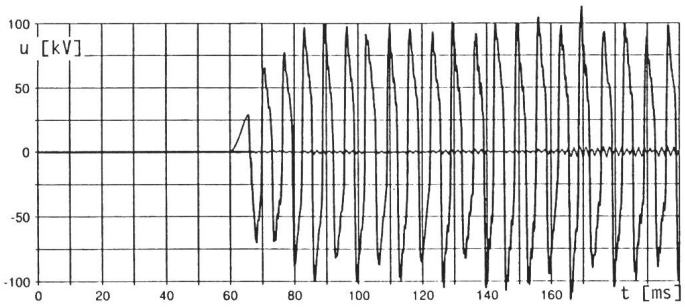
Wenn dagegen C_{OS} und C_{SP} endliche Werte aufweisen, kann während des zweiten Sprunges der Sternpunktspannung die Ferroresonanzbedingung für die 3. Harmonische (150 Hz) erfüllt sein. Die in den Phasenspannungen der 65-kV-Wicklungen bestehende 3. Harmonische wird verstärkt. Es kommt zu einer 150-Hz-Schwingung der 65-kV-Sternpunktspannung von über 100 kV Scheitelwert.

Überspannungen infolge Ferroresonanz

Die Entdeckung einer 150-Hz-Sternpunktschwingung der 65-kV-Wicklung der 90-MVA-Transformatorbank war das wichtigste Ergebnis der Analyse (Bild 4). Diese Sternpunktschwingung überträgt sich auf die 220-kV-Seite (Bild 5). Dadurch entstehen dreiphasige Überspannungen mit einer dominanten Frequenz von 150 Hz. Die Amplituden erreichen Werte von 600... 700 kV, und die Funkenstreckenableiter sprechen an (Bild 6). Innerhalb von ein bis zwei Perioden danach verschwinden die Überspannungen. Bild 7 zeigt die Auswirkung der wichtigsten Einflussgrössen auf den Verlauf der Überspannungen. Es wird ersichtlich, dass sich in Bild 7 von *a* bis *d* sukzessive die Dauer der Überspannungen reduziert, während die Amplituden etwa gleich bleiben. Bei *a* treten die Überspannungen stationär, bei *b* temporär und bei *c* und *d* transient auf.

Bild 4 150-Hz-Sternpunktsschwingung

u Spannung am 65-kV-Sternpunkt
t Zeit



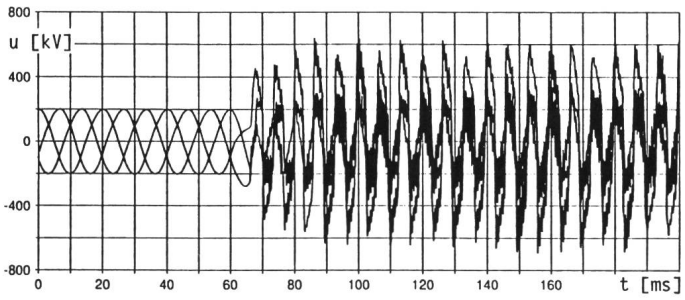


Bild 5
Überspannungen an Transformatorbank (unbeeinflusst)
u 220-kV-seitige Phasenspannung der 90-MVA-Transformatorbank
t Zeit

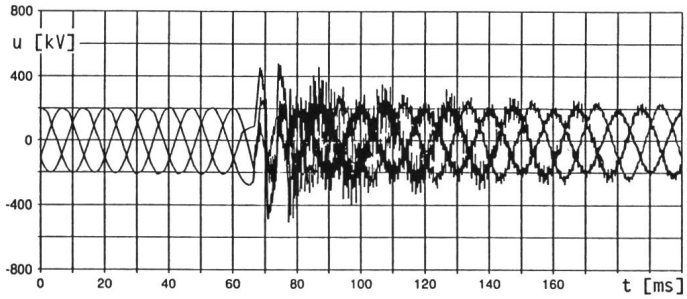


Bild 6
Überspannungen an Transformatorbank (mit Ansprechen eines Funkenstreckenableiters)
u 220-kV-seitige Phasenspannungen der 90-MVA-Transformatorbank
t Zeit

Diskussion der Ergebnisse

Die berechneten maximalen Sternpunktspannungen von über 100kV Scheitelwert sind für die 65-kV-Wicklung ungefährlich, da diese für eine 50-Hz-Stehwechselspannung von 220 kV Scheitelwert gegen Erde ausgelegt ist. Die 65-kV-Sternpunkt-Funkenstreckenableiter, deren 50-Hz-Ansprechspannung bei ungefähr 110 kV Scheitelwert liegt, bleiben unwirksam. Gefährlich wären dagegen die 220-kV-seitigen Überspannungen von 600...700 kV, da die 220-kV-Wicklungen für eine 50-Hz-Stehwechselspannung von 650 kV Scheitelwert gegen Erde dimensioniert ist. Hier müssen die 220-kV-Transformatorableiter ansprechen. Wie Bild 6 zeigt, trifft dies zu. Die 220-kV-Wicklung wäre damit geschützt.

Wie die Simulationsergebnisse zeigen, spricht der Ableiter nur einmal an, wird also thermisch nicht gefährdet. Diese Feststellung führte zur Überlegung, dass es weitere Vorgänge geben muss, die zur Zerstörung der Ableiter beigetragen haben.

Kontrolliert man die Spannung über der öffnenden Schaltstrecke der 220-kV-Druckluft-Leistungsschalter, so findet man Werte von über 1000 kV Scheitelwert (Bild 8). Ein Vergleich mit der 50-Hz-Stehwechselspannung der offenen Schaltstrecke von 720 kV Scheitelwert zeigt, dass Leistungsschalterrückzündungen auftreten müssen. Führt man eine Simulation mit einmaliger Rückzündung durch, so stellt man bereits mehrfaches Ansprechen der 220-kV-Ableiter fest. Die berechneten Ableiter-Stossströme von rund 200 A vermögen einen Funkenstreckenableiter thermisch zu zerstören, falls die Überspannungsbeanspruchung etwa 1s dauert. Mit Hilfe dieser Feststellungen wurde die Ermittlung geeigneter Abhilfemassnahmen möglich.

Abhilfemassnahmen

Folgende Abhilfemassnahmen im Bereich der 90-MVA-Transformatorbank wurden durch Simulationen auf ihre Wirksamkeit geprüft:

1. Einbau einer Ausgleichswicklung
2. Niederohmige Reaktanzerdung des 65-kV-Sternpunktes
3. Kompensationstransformator
4. Hochohmige Widerstandserdung des 65-kV-Sternpunktes
5. Einsatz von 220-kV-Metalloxidableitern

Grundsätzlich haben alle Massnahmen ihre Tauglichkeit bewiesen. Die Wahl fiel auf die gleichzeitige Anwendung der Massnahmen 3 und 5.

Der Einbau einer Ausgleichswicklung verhindert die Entstehung der Ferroresonanz äusserst wirksam, weil sie für eine natürliche Magnetisierung sorgt. Dadurch verschwindet die 3. Harmonische aus den Phasenspannungen und aus der Nullspannung vollständig. Da aber diese Massnahme praktisch nicht durchführbar war, hat man sich für den Einbau eines Kompensationstransformators in Stern/Dreieck-Schaltung entschieden. Die 65-kV-Sternpunkte beider Transformatoren sind verbunden (Bild 9). Die Optimierung der Baugrösse des Kompensationstransformators führte zu einer Nennleistung von nur 400 kVA. Dies ist dadurch zu erklären, dass er im Normalbetrieb grundsätzlich nur die fehlende Magnetisierungsleistung der 90-MVA-Transformatorbank liefern muss. Gegenüber einer echten Ausgleichwicklung von z.B. 10 MVA Phasenleistung ist seine Wirkung etwas schwächer, aber ausreichend.

Bei Metalloxidableitern setzt im Vergleich mit Funkenstreckenableitern die dämpfende Wirkung auf den Ferroresonanzvorgang sehr früh ein. Bei Simulation einer Leistungsschalterrückzündung sprechen sie im Gegensatz zu Funkenstreckenableitern nur einmal an und sind thermisch nicht gefährdet.

Die gleichzeitige Anwendung beider Abhilfemassnahmen gewährleistet einen äusserst wirksamen Schutz. Die maximal zu erwartenden Überspannungen werden ungefähr auf 350 kV Scheitelwert reduziert.

Realisierung der Massnahmen

Folgende Anpassungen der 90-MVA-Transformatorbank wurden notwendig:

- Einbau des Kompensationstransformators inklusive der zugehörigen Schutz- und Überwachungseinrichtungen
- Ersatz der 220-kV-Funkenstreckenableiter durch Metalloxidableiter

Beim 65/0,4-kV-Kompensationstransformator handelt es sich um eine Spezialausführung. Es wurde der gleiche Lieferant wie für die 90-MVA-Transformatorbank gewählt. Die Schaltgruppe der Dreiphaseneinheit ist YNd5, die relative Kurzschlussspannung beträgt 4%. Die geringe Nennleistung von 400 kVA erübrigte den Anbau von Kühlern. Der ölisolierte Transformator wurde mit druckfestem Kessel ausgeführt. Auf der 0,4-kV-Seite wurden vier Anschlüsse der bei Normalbetrieb geschlossenen Dreieckwicklung herausgeführt, um wenn nötig Strom- und Spannungsmessungen durchführen zu können. Mittels vier 65-kV-Einleiter-Kunststoffkabeln vom Typ GKT konnte der Anschluss an die 90-MVA-Transformatorbank relativ einfach bewerkstel-

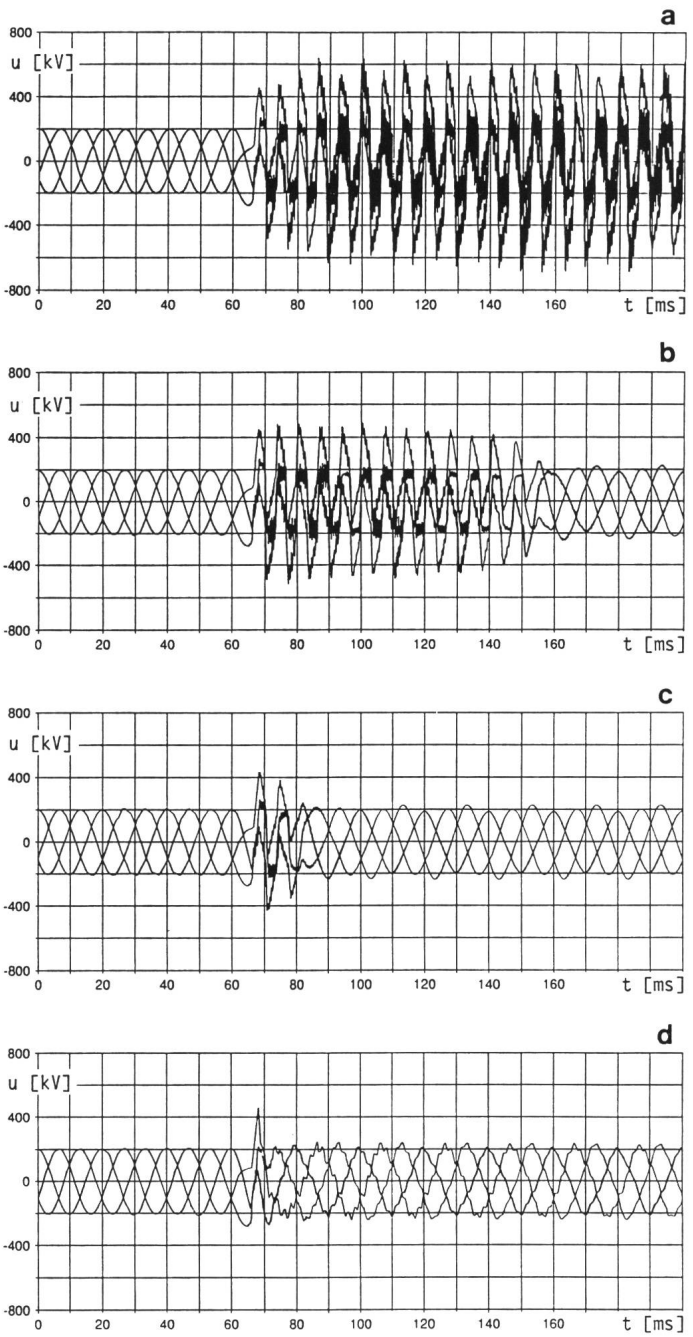


Bild 7
Phasenspannungen der 90-MVA-Transformatorbank (unbeeinflusst) bei unterschiedlichen Netzparametern

a S=10MVA, C_{SP}=15nF, C_{OS}=5nF
b S=10MVA, C_{SP}=5nF, C_{OS}=5nF
c S=50MVA, C_{SP}=15nF, C_{OS}=5nF
d S=10MVA, C_{SP}=15nF, C_{OS}=2nF
S *65-kV-Netzlast bei cos phi = 0,9 induktiv*
C_{SP} 65-kV-Sternpunktkapazität
C_{OS} 220-kV-Wicklungs- und Sammelschienen-Kapazität

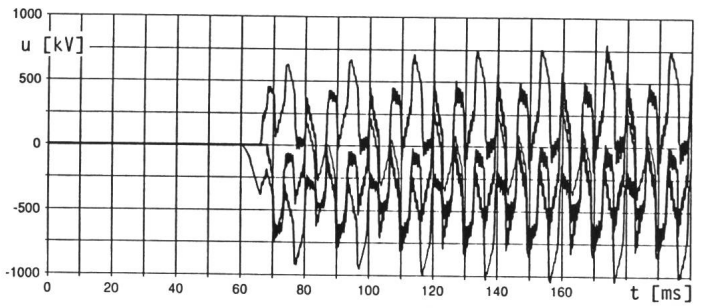


Bild 8
Spannungen über 220-kV-Leistungsschalter der Leitung Almagell in Zermeiggern
u Spannung über dem öffnenden 220-kV-Leistungsschalter
t Zeit

ligt werden. Der Transformatoreinbau inklusive der nötigen Ölauffangwanne war direkt neben der 90-MVA-Transformatorbank möglich (Bild 10). Dem Schutz und der Überwachung des Kompensationstransformators dienen ein Buchholzrelais sowie eine zweistufige Wicklungs- und Öltemperaturüberwachung. Als Überspannungsschutz genügen auf der 65-kV-Seite die vorhandenen Funkenstreckenableiter zwischen den Phasen und Erde sowie zwischen Sternpunkt und Erde; 0,4-kV-seitig wurde ein Punkt der Dreieckwicklung geerdet und die anderen beiden mittels Metalloxidableitern geschützt.

Der nachträgliche Einbau der 220-kV-Metalloxidableiter war problemlos. Erwähnenswert ist einzig deren um etwa 1 m niedrigere Bauhöhe, verglichen mit den Funkenstreckenableitern, welche eine entsprechende Erhöhung der Apparategerüste nötig machte. Die Ansprechzähler wurden beibehalten.

Das gesamte Umbauprojekt inklusive Inbetriebnahme und Überprüfungsmessungen nahm rund 14 Monate in Anspruch und konnte ohne Energieproduktionseinbussen durchgeführt werden.

Messungen

Zweck der Messungen war, die Unterdrückung von Ferroresonanz nachzuweisen. Um sicherzugehen, wurden sowohl 220-kV-Leitungs- als auch Generatorabschaltungen durchgeführt und mehrmals wiederholt.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei Messungen von Ferroresonanz die im folgenden aufgeführten Punkte zu beachten sind: Der Frequenzbereich der Messanordnung sollte sich zwischen Gleichspannung und ungefähr 10 kHz befinden. Bei Schalthandlungen treten elektromagnetische Störungen auf, die das Messsignal beeinflussen können. Der Aufwand, den man für die Schirmung der Messgeräte treiben muss, hält sich normalerweise in Grenzen, da die zu messenden Signale im unteren Frequenzbereich angesiedelt sind. Ein gewisser hochfrequenter Störpegel kann also durchaus akzeptiert werden, solange das Messsignal nicht grundsätzlich verfälscht und die Geräte in ihrer Funktion nicht beeinträchtigt werden.

Für die simultane Aufzeichnung der 220-kV-Phasenspannungen und der 65-kV-Sternpunktspannung wurden 4 Kanäle benutzt. Eine digitale Verar-

beitung und Speicherung hat sich als vorteilhaft erwiesen. Der Informationsgehalt einer Messung ist dabei wesentlich höher als bei analogen Messungen. Die digitale Speicherung ermöglicht eine beliebige Weiterverarbeitung der Daten, wie z. B. Dehnung bestimmter Bereiche, Frequenzanalyse, Verknüpfung verschiedener Kurven usw.

Die Grundschaltung der Ferroresonanzmessungen zeigt Bild 9. Folgende Geräte wurden verwendet:

- 3 Tastköpfe Übersetzung 1:10, maximale Spannung 400 V
- Hochspannungsteiler, maximale Spannung 100 kV
- Digitales Speicheroszilloskop, 4 Kanäle, mit eingebautem Plotter
- Netzfilter

Für die Messung am Sternpunkt wurde der 100-kV-Hochspannungsteiler verwendet, die Ausgangsspannung der drei Messwandler wurde mit den 400-V-Tastköpfen abgegriffen.

Die Messungen bestätigen die Wirksamkeit der getroffenen Massnahmen, in keinem Fall war Ferroresonanz zu beobachten.

Schlussfolgerungen

Der Betrieb einer 90-MVA-Transformatorbank 220/65 kV in Stern/Stern-Schaltung ohne Dreieck-Ausgleichswicklung kann - wie gezeigt - in besonderen Schaltfällen Schwierigkeiten bereiten, insbesondere wenn der 65-kV-Sternpunkt isoliert betrieben wird. Beim Ausschalten kleiner Kapazitäten auf der 220-kV-Seite und alleiniger Speisung der Transformatorbank aus dem 65-kV-Netz kann die resultierende 65-kV-Sternpunkt-Spannungsschwingung infolge Ferroresonanz auf der 220-kV-Seite hohe Überspannungen von 600...700 kV Scheitelwert zwischen Phase und Erde sowie von rund 1000 kV Scheitelwert über der unterbrechenden Schaltstrecke bewirken. Diese führen unweigerlich zu Leistungsschalter-Rückzündungen und zum mehrfachen Ansprechen der Funkenstreckenableiter. Die Anregung weiterer Schwingungen und die Zerstörung von Funkenstreckenableitern ist die Folge. Letztere eigenen sich deshalb für diese Aufgabe nicht, Metalloxidableiter können jedoch aufgrund ihrer Charakteristik einen wirksamen Schutz bieten. Zusammen mit dem Einbau eines 65/0,4-kV-Kompensationstransformators in Stern/Dreieck-Schaltung können, wie rechnerisch und messtechnisch nachgewiesen wurde, die Überspannungen bereits in ihrer Entstehung wirksam unterdrückt werden. Zur Klärung der Störungsursache sowie der aufgetretenen transienten Vorgänge liefert eine vorgängige Systemanalyse unter Einsatz des international bewährten EMTP-Rechenprogramms wertvolle Dienste.

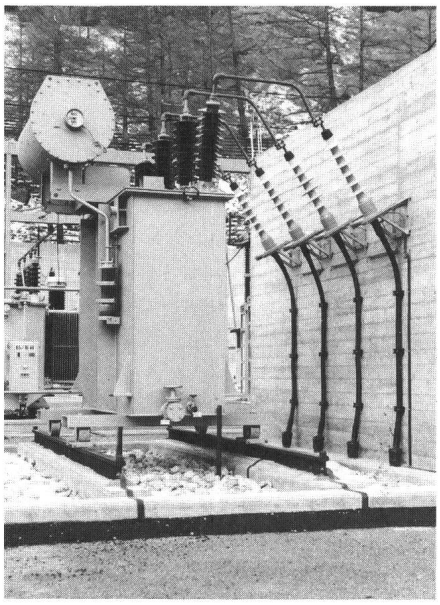


Bild 10 Ansicht des Kompensationstransformators

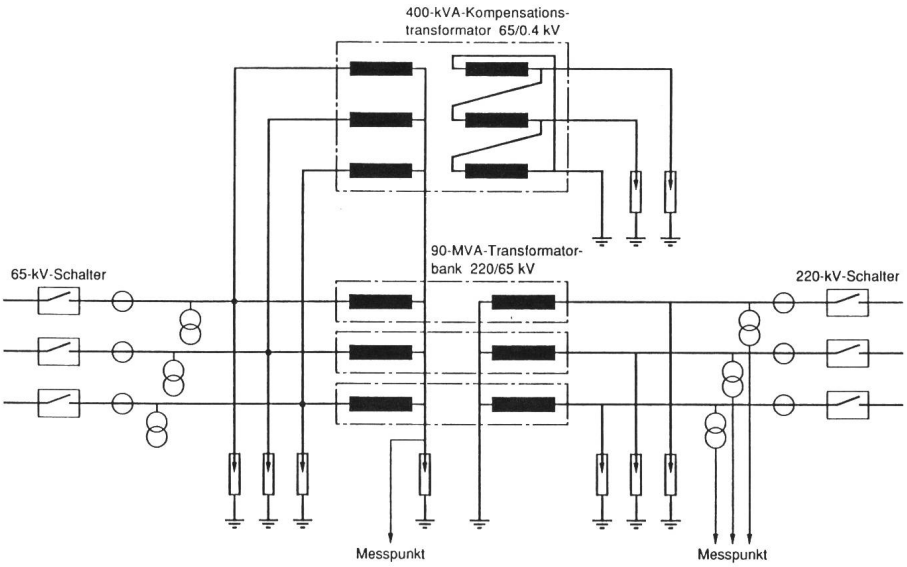


Bild 9 Schaltung des Kompensationstransformators und Messpunkte

Literatur

[1] Electromagnetic transients programm (EMTP). Rule book. Portland/Oregon, Bonneville Power Administration, June 1984.

[2] *J.D. McCrumm:* An experimental investigation of subharmonic currents. AIEE Trans. 60(1941), p.533...540.