Beeinflussungsprobleme bei Mehrfachleitungen

Autor(en): **Läderach, Serge / Köppl, Georg**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **93 (2002)**

Heft 7

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-855393

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Beeinflussungsprobleme bei Mehrfachleitungen

Leitungen verschiedener Spannungsebenen, die auf einem gemeinsamen Gestänge geführt werden, beeinflussen sich gegenseitig. In den meisten Fällen muss dies keine störenden Auswirkungen haben. Im Hinblick auf die zunehmende Trassennot und den Trend zu Kompaktleitungen wird im vorliegenden Beitrag am Beispiel der über den San Bernardino führenden Mehrfachleitung 380 kV/50 kV gezeigt, welche Probleme dennoch auftreten können und wie man sie behebt.

Serge Läderach, Georg Köppl

Das 50-kV-Netz *Misox* hat eine kleine räumliche Ausdehnung mit einer gesamten Leitungslänge von rund 140 km. 98% der Leitungen sind als Freileitungen ausgelegt. Abhängig vom Wasserangebot speisen vier Hydrokraftwerke mit insgesamt neun Maschinengruppen und einer Gesamtleistung von etwa 110 MVA in dieses Netz ein. In Soazza erfolgt die Energieübertragung mittels zweier Transformatoren (63 MVA) über das 220-kV-Netz. Auf der 50-kV-Seite wird ein gekuppelter Zweischienenbetrieb gefahren und jeder 220/50-kV-Trafo ist auf eine der beiden 50-kV-Sammelschienen geschaltet. Das vollständige Netzschema ist in Bild 1 dargestellt.

Der Sternpunkt des 50-kV-Netzes ist über Erdschlusskompensationsdrosseln geerdet. Der am besten dafür geeignete Ort sind die beiden ständig angeschlossenen Transformatoren 220/50 kV in Soazza. Jeder der beiden Transformatoren hat seine eigene Kompensationsdrossel, die zwischen 2,5 und 13 A regelbar, aber auf Grund früherer Erfahrungen fest eingestellt ist, und zwar auf 2,5 A für das *obere* bzw. 8,5 A für das *untere Misox*.

Bei Erdschlüssen werden die Sammelschienen getrennt; damit möchte man sofort eine Aussage, in welchem Netzteil sich der Fehler befindet. Eine Besonderheit des Netzteils *oberes Misox* ist die Parallelführung einer 50-kV-Freileitung mit der 380-kV-Freileitung *San Bernardino* über eine Länge von 9,15 km, wie in Bild 2 gezeigt[1].

Das typische Mastbild für die gemeinsame Strecke zwischen Soazza und dem *oberen Misox* ist in Bild 3 dargestellt. Der Mast ist an sich für eine Doppelleitung 380 kV ausgelegt.

Aufgetretene Probleme und durchgeführte Messungen

Bereits vor längerer Zeit wurde festgestellt, dass bei einem Erdschluss im 50-kV-Netz *unteres Misox* nach Auftrennung

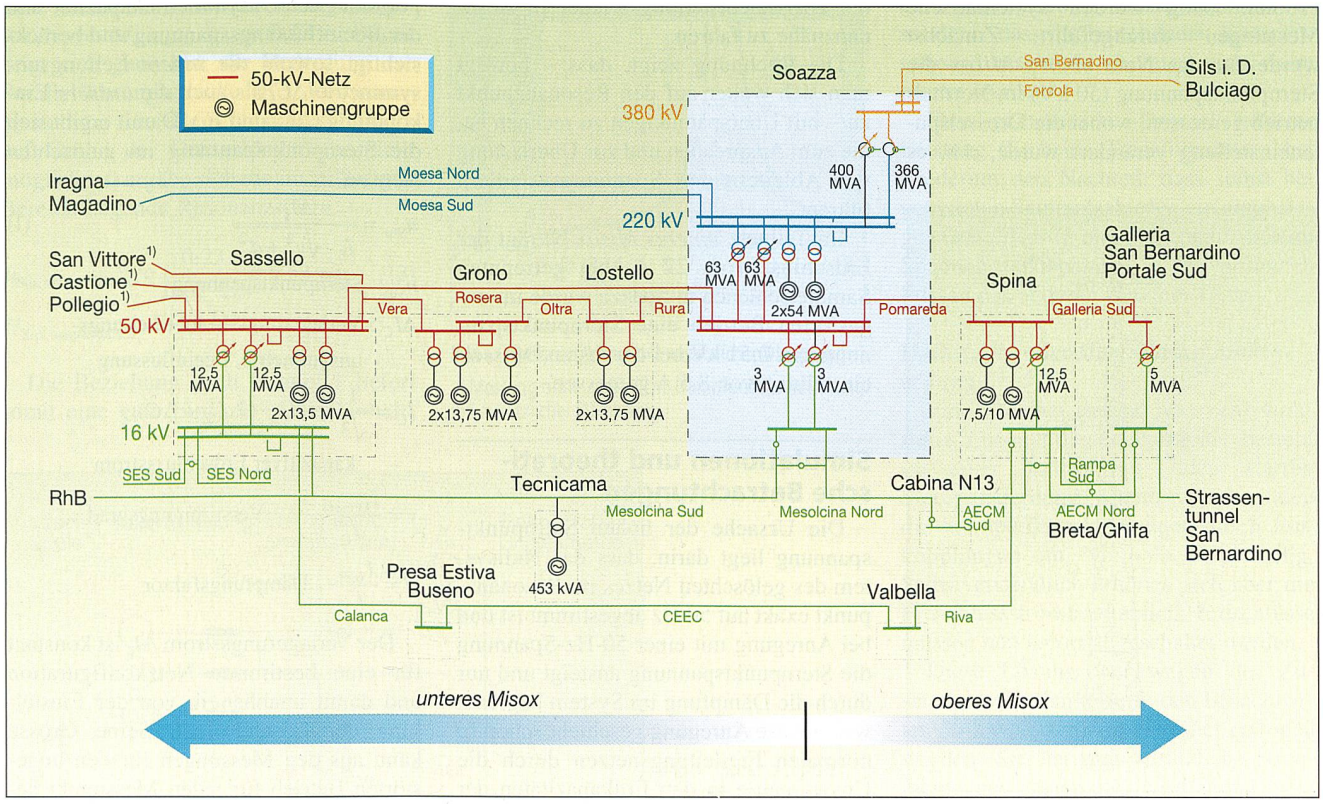


Bild 1 Vollständiges Netzschema für *oberes* und *unteres Misox*

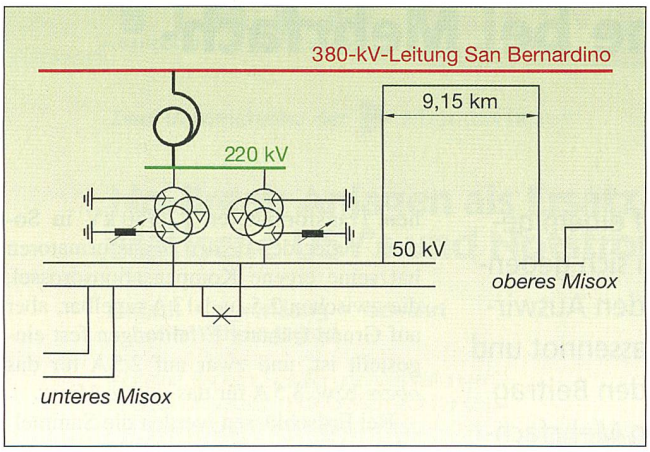


Bild 2 Vereinfachtes Netzschema für die Strecke *oberes Misox*

der 50-kV-Sammelschienen die Erdschlussanzeige für den Bereich *oberes Misox* bestehen bleibt, obwohl dort kein Erdfehler vorhanden ist; die damit beabsichtigte Fehlereingrenzung war somit wirkungslos. Sie funktionierte hingegen bei einem Erdschluss im Bereich *oberes Misox*.

Auch im ungestörten Betrieb registrierte man von Zeit zu Zeit unsymmetrische Leiter-Erde-Spannungen und sogar das Ansprechen der Erdschlussanzeige. Die Probleme traten verstärkt im *oberen Misox* auf, wenn die Sammelschienen in Soazza getrennt betrieben wurden. Dies führte dann zu der festen Einstellung der Erdschlusskompensationsdrosseln.

Als Ursache der Probleme wurde die Parallelführungsstrecke vermutet; zur Problemlösung wurden systematische Messungen durchgeführt. Zunächst wurde für das Netz *oberes Misox* die Sternpunktspannung (50 kV) im Normalbetrieb gemessen, wobei die Drosselspuleneinstellung verändert wurde, d.h. es wurde die Resonanzkennlinie des Teilnetzes *oberes Misox* aufgenommen mit den in Bild 4 (Kurve a) erzielten Resultaten.

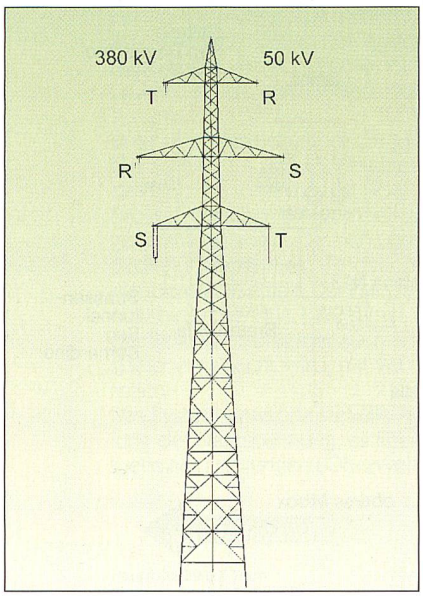


Bild 3 Mastbild Doppelleitung 380/50 kV

Bei einer Drosseleinstellung von rund 8,5 A wird eine Resonanzspitze erreicht, die man nicht hat messen können, da sonst die maximal zulässige Sternpunktspannung bei weitem überschritten worden wäre. Es ist klar, dass der Resonanzwert von 8,5 A auch dem Erdschlussstrom des Teilnetzes entspricht. Das praktische Verfahren bestand darin, sich von unten dem Resonanzpunkt zu nähern, dann die Sammelschienen zu kuppeln, die Drossel des Trafos T201 (rechter Trafo in Bild 2) in die Maximalstellung zu fahren, die Sammelschiene wieder zu trennen und dann von der oberen Drosseleinstellung wieder in Resonanznähe zu fahren.

Die Rechnung zeigt, dass – bewegt man sich weiter auf den Resonanzpunkt zu – mit Überspannungen zu rechnen ist, die zum Ansprechen und zur Überlastung von Ableitern und Spannungswandlern führen.

Im Teilnetz *unteres Misox* beträgt der Erdschlussstrom 22 A; bei getrennten Sammelschienen in Soazza wurde im ungestörten Betrieb eine Sternpunktspannung von 0,51 kV bei der festen Drosseleinstellung von 8,5 A gemessen.

Simulationen und theoretische Betrachtungen

Die Ursache der hohen Sternpunktspannung liegt darin, dass das Nullsystem des gelöschten Netzes im Resonanzpunkt exakt auf 50 Hz abgestimmt ist und bei Anregung mit einer 50-Hz-Spannung die Sternpunktspannung ansteigt und nur durch die Dämpfung im System begrenzt wird. Diese Anregung geschieht schon in normalen Freileitungsnetzen durch die Unsymmetrie in den Erdkapazitäten der drei Phasen und die treibende Leiter-Erde-Spannung. Bei Parallelführungsstrecken wird dieser Effekt noch verstärkt durch die unsymmetrisch eingekoppelte Spannung des fremden Systems (Bild 5).

Die unsymmetrischen Leitungsimpedanzen und -kapazitäten lassen sich auf Grund der geometrischen Daten der Leitungen (Bild 3) ermitteln[2].

Die Resultate der durchgeführten Simulationsrechnungen decken sich vorzüglich mit den Messungen, womit das Modell als hinreichend genau betrachtet werden kann (Kurve b in Bild 4). Die damit berechnete Resonanzspitze liegt bei etwa 90 kV. Selbstverständlich käme es bereits weit vor Erreichen dieses Wertes zu Defekten und Überschlägen im 50-kV-Netz. Die heutigen festen Drosseleinstellungen liegen zwar für den Normalbetrieb des Netzes genügend weit vom Resonanzpunkt des Gesamtnetzes und auch der Teilnetze nach Sammelschienentrennung in Soazza entfernt; wegen der Unterabstimmung der Drosseln sind aber bei störungs- oder betriebsbedingten Leitungsabschaltungen resonanznahe und damit kritische Zustände möglich.

Die im Rechenmodell verwendeten Impedanz- und Kapazitätsmatrizen der Freileitungen und die entsprechenden Kopplungen sind wenig anschaulich. Einen besseren Einblick liefert der in [2] zur Behandlung von Unsymmetrien und von Beeinflussungsspannungen eingeführte Verlagerungsstrom ΔI_c. Er ist proportional der Unsymmetriekapazität und der Beeinflussungsspannung und berücksichtigt sowohl die *innere* Leitungsunsymmetrie ΔC_i als auch die *äussere* Einkopplung (ΔC_a und E_a). Damit ergibt sich die Sternpunktspannung im gelöschten Netz zu

$$u_{Stp} = \frac{\Delta I_C}{I_C \cdot \sqrt{v^2 + d^2}} \qquad (1)$$

u_{Stp}: Sternpunktspannung

ΔI_C: Verlagerungsstrom ~ Leitungsunsymmetrie, Beeinflussung

$$I_C = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot U_n \cdot (3 \cdot C_E + \Delta C)$$

kapazitiver Erdschlussstrom

$$v = \frac{I_{Drossel}}{I_C} - 1 \quad \text{Verstimmungsgrad}$$

$$d = \frac{I_{wirk}}{I_C} \quad \text{Dämpfungsfaktor}$$

Der Verlagerungsstrom ΔI_c ist konstant für eine bestimmte Netzkonfiguration und damit unabhängig von der Einstellung der Löschdrossel. Seine Grösse kann aus den Messungen für den ungestörten Betrieb für jeden Messpunkt bestimmt werden, da Sternpunktspannun-

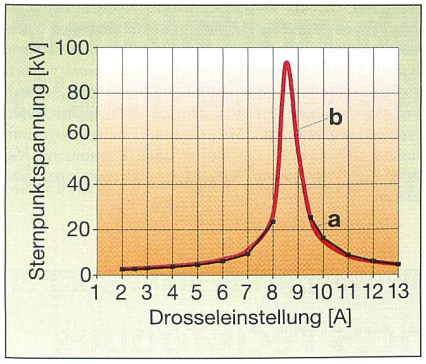


Bild 4 Resonanzkurve für das Teilnetz *oberes Misox*
a: Messung; b: Berechnung

gen u_{Stp} und Verstimmung v bekannt sind und der Dämpfungsfaktor d abgeschätzt werden kann ($d \approx 0{,}02$); letzterer spielt im Übrigen erst bei sehr kleiner Verstimmung eine Rolle. Man erhält als Mittelwert der Messungen für das Netz *oberes Misox* ΔI_c = 0,62 A. Für die Resonanzabstimmung $v = 0$ wird somit

$$u_{Stp} = \frac{\Delta I_C}{d \cdot I_C} = \frac{0{,}62}{0{,}02 \cdot 8{,}58} = 3{,}61\ p.u. \qquad (2)$$

$$U_{Stp} = 104\ \text{kV}$$

was sich wiederum mit den Simulationsrechnungen gut deckt.

Für das Netz *unteres Misox* resultiert für den Messpunkt I_{Dr} = 8,5 A eine Sternpunktspannung von nur 0,51 kV; dies ergibt für das vergleichsweise grössere Netz einen sehr kleinen Verlagerungsstrom von $\Delta I_{c,\ \text{unteres Misox}}$ = 0,23 A. Damit zeigt sich ganz klar die Bedeutung der Parallelführungsstrecke. Bei Resonanzeinstellung (die allein für dieses Teilnetz auf Grund der Drosseldaten gar nicht möglich ist) ergäbe sich die im zulässigen Bereich liegende Resonanzspitze

$$u_{Stp,\ \text{unteres Misox}} = \frac{0{,}23}{0{,}02 \cdot 22} = 0{,}53\ p.u. \qquad (3)$$

$$U_{Stp,\ \text{unteres Misox}} = 15{,}3\ \text{kV}$$

Die Beziehung nach Formel 1 liefert somit eine gute Einsicht in die Verhältnisse unter ganz unterschiedlichen Bedingungen.

Mögliche Abhilfen

Die möglichen Abhilfen gegen die extrem hohen Resonanzspannungen des Teilnetzes *oberes Misox* ergeben sich ebenfalls aus Formel 1.

Eliminierung bzw. Reduktion des Verlagerungsstroms

Dies ist gleichbedeutend mit der Vermeidung der Einkopplung der 380-kV-Leitung, d.h. die 380-kV-Leitung müsste auf der Parallelführungsstrecke verdrillt werden. Wie entsprechende Simulationen zeigen, würde der Verlagerungstrom für das Teilnetz *oberes Misox* dadurch auf 0,042 A reduziert und die Resonanzspitze der Sternpunktspannung auf völlig unkritische 0,24 p.u. oder 7,1 kV begrenzt. Der Aufwand für diese Massnahme ist jedoch jenseits der wirtschaftlich tragbaren Grenzen.

Erhöhung der Dämpfung

Für den Dämpfungsfaktor spielen sowohl die Querableitung auf den Freileitungen und Kabeln wie auch die Drosselverluste eine Rolle. Beeinflussbar sind nur die Drosselverluste. Um diese zu erhöhen, käme ein Parallelwiderstand zur Drossel in Frage. Um im Resonanzfall die Sternpunktspannung nicht höher ansteigen zu lassen als auf 0,7 p.u., müsste der Dämpfungsfaktor mindestens 0,107 betragen, was einen Parallelwiderstand zur Drossel von rund 32 kΩ ergäbe. Im Fall eines einphasigen Erdschlusses im 50-kV-Netz würde der Widerstand mit 27 kW belastet, d.h. man müsste Erdschlüsse relativ rasch abschalten. Die für diesen Widerstand berechnete Resonanzkurve ist in Bild 6 gezeigt. Auch diese Massnahme ist nicht sehr attraktiv.

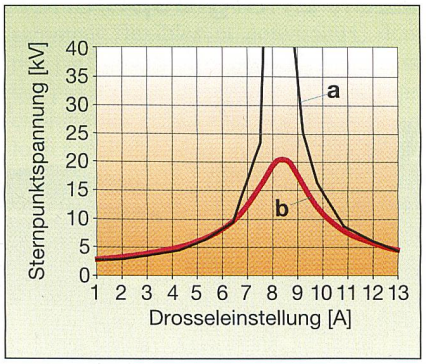


Bild 6 Resonanzkurve mit zusätzlicher Dämpfung
a: Messung ohne zusätzliche Dämpfung; b: Rechnung mit zusätzlicher Dämpfung

Betrieb der Drossel im überabgestimmten Bereich

Eine hohe Verstimmung des Kompensationskreises reduziert ebenfalls die Sternpunktspannung. Die Unterabstimmung ($I_{Drossel} < I_C$) scheidet aus, weil bei Leitungs- und Kabelabschaltungen dann doch Resonanznähe auftreten kann.

Der Grenzfall der Unterabstimmung ist der isolierte Sternpunkt ($v = -1$). Er eliminiert zwar das Resonanzproblem, hat jedoch andere Nachteile, wie die Gefahr von hohen transienten Überspannungen bei intermittierenden Erdschlüssen oder die Möglichkeit von Kippschwingungen.

Ein gemeinsamer Betrieb der beiden Teilnetze im überabgestimmten Bereich ist nicht möglich, da die Summe der Erdschlussströme mit 22 A + 8,5 A grösser ist als 2×13 A (maximaler Drosselstrom). Ein solcher Betrieb liesse sich nur für das Teilnetz *oberes Misox* realisieren und würde dauernde Trennung der 50-kV-Sammelschienen in Soazza bedeuten, es sei denn, dass die bestehenden Kompensationsdrosseln durch leistungsstärkere ersetzt würden.

Eine gemeinsame Drossel höherer Leistung für beide Transformatoren hat wiederum den Nachteil, dass selbst bei getrennten Sammelschienen ein einphasiger Erdschluss in einem Netzteil auch zu Spannungsanhebungen in den gesunden Phasen des anderen Netzteils führt.

Halbstarre oder starre Sternpunkterdung

Eine gänzlich andere, aber sehr wirksame Lösung dieses Problems besteht in einer halbstarren oder starren Sternpunkterdung. Damit verschwinden die Sternpunktverlagerungen durch Einkopplungen im Normalbetrieb völlig. Selbstverständlich erhöhen sich aber die Erdschlussströme erheblich; Erdschlüsse müssen nun sofort abgeschaltet werden.

Diese Lösung war wegen der Zusammenschaltbarkeit mit den benachbarten 50-kV-Netzen bereits früher erwogen worden. Sie hat nun zusätzliche Argumente gewonnen und wird in nächster Zukunft realisiert werden, und zwar in

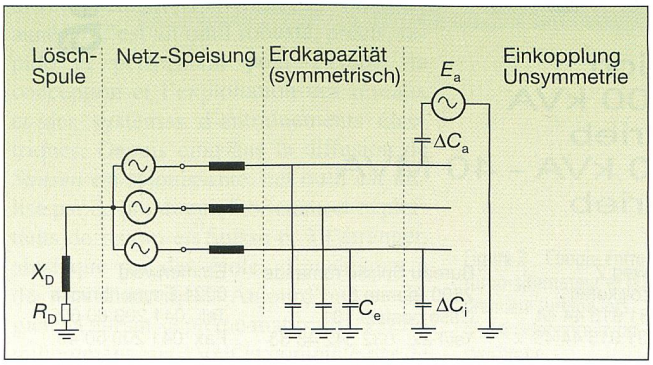


Bild 5 Schema für die Einkopplung einer Unsymmetrie

Form einer halbstarren Reaktanzerdung mit einer Drossel von rund 15 Ω; dies führt zu einem maximalen einphasigen Kurzschlussstrom von etwa 2 kA, der gut erfasst und lokalisiert werden kann. Andererseits muss bei schneller Abschaltung nicht mit zu hohen Berührungsspannungen oder gravierenden Fehlerschäden gerechnet werden.

[1] Die 380-kV-Leitung ist mit Zweierbündel 2×550 mm² Aldrey in Vertikalanordnung beseilt; die 50-kV-Leitung mit 1×550 mm² Aldrey. Das Erdseil ist aus Stahl und hat einen Querschnitt von 93,3 mm².

[2] Im vorliegenden Fall wurden die Gleichungen von Carson und Pollaczek verwendet. Die Berechnungen wurden mit dem Unterprogramm «Line Constants» des Alternative Transients Program ATP [1] durchgeführt. Daraus resultieren symmetrische Matrizen mit 6×6 Elementen der Widerstände, der Reaktanzen und der Kapazitäten, die als Π-Glieder in das Rechenprogramm eingegeben werden. Die übrigen dreiphasigen Netzkomponenten wie Einspeisungen, Transformatoren, Kabel, Lasten und auch die Sternpunktdrossel wurden ebenfalls im Rechenprogramm berücksichtigt, womit ein physikalisch korrektes Modell des beschriebenen Netzes gegeben ist. Mit diesem Rechenprogramm lassen sich sowohl die auftretenden Phänomene wie auch die Wirkung von Verbesserungsmassnahmen studieren.

Referenzen

[1] Electromagnetic Transients Program, Alternative Transients Program. Rule Book, Bonneville Power Administration, Juni 1984.

[2] *H.-J. Haubrich:* Der Verlagerungsstrom als Kriterium für die Löschfähigkeit von Hochspannungsnetzen. etz Archiv, Bd. 10 (1988), H. 9. S. 281–288.

Adressen der Autoren

Georg Köppl, Dipl. Ing. TU München, Ingenieurbüro für elektrische Energietechnik, Wettingen

Serge Läderach, Dipl. El.-Ing. ETH, Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG, Laufenburg

Problèmes d'influences réciproques de lignes multiples

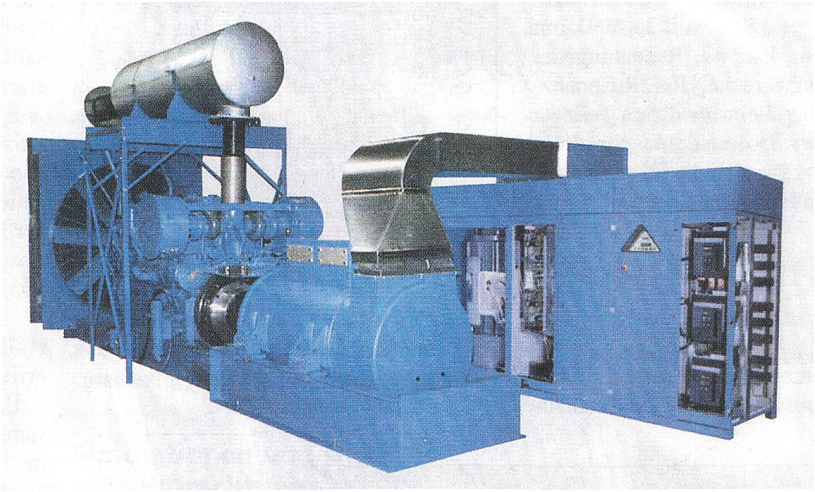
Les lignes de divers niveaux de tension sur un tracé commun s'influencent réciproquement. Dans la plupart des cas, cela n'a guère de conséquences gênantes. Etant donné que les tracés deviennent de plus en plus rares et que l'on cherche à réaliser des lignes compactes, l'article montre, à l'exemple de la ligne multiple 380 kV/50 kV sur le San Bernardino, les problèmes qui se posent et la manière de les résoudre.

Was nützen teure Betriebsmittel wenn kein Strom vorhanden ist?

USV

Sicherheit für Ihre wichtigen Anwendungen

Statische oder dynamische Systeme mit oder ohne integriertem Diesel- oder Gas-Motor und Kurzzeit Energiespeicher(Powerbridge)



gebrüder meier ag
elektrische maschinen und anlagen

Leistungsbereich
statisch 3 - 4000 kVA
bei Parallelbetrieb
dynamisch 150 kVA - 40 MVA
bei Parallelbetrieb

Althardstrasse 190
8105 Regensdorf
Tel. 01 870 93 93
Fax 01 870 93 94

Buchsweg 2
3052 Zollikofen
Tel. 031 915 44 44
Fax 031 915 44 49

Bureau Suisse romande
2500 Bienne 6
Case postale 101
Tel/Fax. 032 342 48 63

Emmenweid
6021 Emmenbrücke
Tel. 041 209 60 60
Fax 041 209 60 40