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: 7

Artikel: Beeinflussung von Transformatorgeräuschen durch vagabundierende Bahnströme

Autor: Vorwerk, Hans-Joachim / Biasiutti, Gianni

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903103

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: 20.02.2026

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

Beeinflussung von Transformatorgeräuschen durch vagabundierende Bahnströme

Hans-Joachim Vorwerk und Gianni Biasiutti

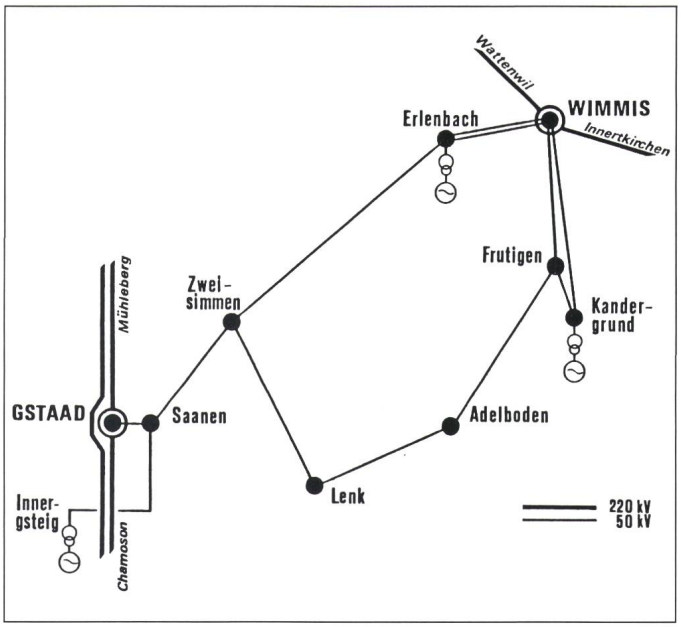
Eine Transformatorengruppe wies zeitweilig erhöhte Leerlaufgeräusche auf. Ausgehend von den gegebenen Netzverhältnissen ging man dem Phänomen nach; vagabundierende Gleichströme der lokalen Bahnlinie stellten sich als Ursache heraus. Verschiedene untersuchte Abhilfemassnahmen werden diskutiert, und die gewählte Lösung, ein Thyristor-Spannungsbegrenzer, wird erläutert.

Un groupe transformateur présentait par intervalles des bruits à vide accrus. En prenant comme point de départ les conditions de réseau présentes, on s'occupa de ce phénomène; des courants vagabonds émis par la ligne de chemin de fer locale étaient à l'origine de cette perturbation. Divers remèdes examinés sont discutés et la solution retenue, un limiteur de tension à thyristor, est expliquée.

Adresse der Autoren:
Hans-Joachim Vorwerk, dipl. Ing., und *Gianni Biasiutti*, Dr. sc. tech., Bernische Kraftwerke AG, Viktoriaplatz 2, 3000 Bern 25

Nach der Inbetriebnahme der neuen Unterstation Gstaad wurde festgestellt, dass der Lärmpegel der dort vorhandenen 220/50-kV-Transformatorengruppe grösseren Schwankungen unterworfen war als dies normalerweise im Betrieb bei Spannungsänderungen und bei geräuscharmen Transformatoren unter Laständerungen zu erwarten ist. Dabei lagen die höchsten Schallpegel mit 75 dB(A) weit über dem erwarteten Wert von etwa 50 dB(A), bezogen auf einen Abstand von 5 m. Im Hinblick auf die mit der Baubewilligung verknüpften Auflagen bezüglich Schallpegel und die gestörten Magnetisierungsverhältnisse im Transformator musste nach Abhilfemassnahmen gesucht werden.

Bild 1
200-kV- und 50-kV-Leitungsnetz im Bereich der Unterstation Gstaad



Netz- und Anlagenkonfiguration

Die Unterstation Gstaad ist in einen Strang der doppelsträngigen 220-kV-Leistung Chamoson-Mühleberg eingeschlauft, wobei ein 75-MVA-Transformator die Verbindung zum bestehenden 50-kV-Netz herstellt (vgl. Bild 1). Sie dient neben der Unterstation Wimmis als weiterer Stützpunkt für das 50-kV-Netz der Region, in das einige Wasserkraftwerke kleinerer Leistung einspeisen. Das 220-kV-Netz wird mit direkt geerdetem Sternpunkt betrieben. Beim 50-kV-Netz ist der Sternpunkt isoliert.

Die Schaltung der neuen Unterstation ist in Bild 2 dargestellt. Demnach handelt es sich um eine relativ einfache Anlage. Aus Transportgründen besteht der 75-MVA-Transformator aus drei Einzelpolen, die über die im Dreieck geschaltete Unterspannungswicklung magnetisch miteinander verkettet sind. Die 220-kV-Schaltanlage ist in SF_6-Technik ausgeführt, die 50-kV-Anlage in konventioneller Freiluftechnik.

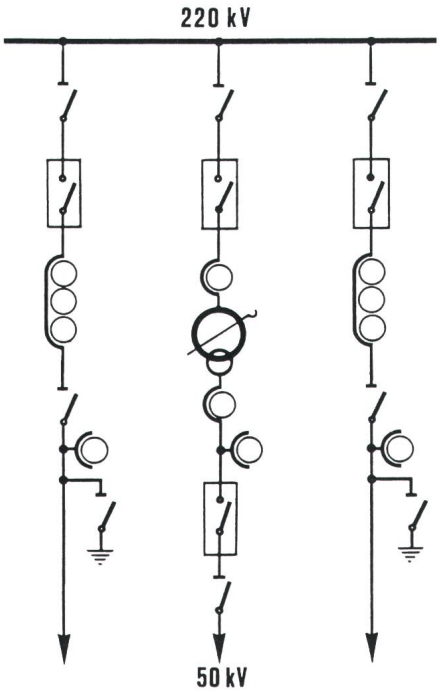


Bild 2 Einpoliges Schaltbild der Unterstation Gstaad

Ein entsprechendes Messergebnis für Schaltung *1*, dem normalen Betriebszustand der Anlage, ist in Bild 3 enthalten und der Schallpegelmessung gegenübergestellt. Aus dieser sich über einen Tag erstreckenden Aufzeichnung erkennt man, dass tatsächlich ein nennenswerter Gleichstrom variabler Amplitude und Richtung durch den Sternpunkt des Transformators fliesst, wobei er sich – wie entsprechende Messungen gezeigt haben – zu gleichen Teilen auf die drei Einzelpole aufteilt.

Ein Vergleich der Verläufe des Schallpegels und des Gleichstromes in Bild 3 zeigt eine eindeutige Korrelation bezüglich der nächtlichen Beruhigung, und für die übrige Zeit kann man eine solche zumindest vermuten. Dabei ist für das Anschwellen und Abklingen der Geräusche sicher nicht nur die Amplitude des Gleichstromes massgebend, sondern bestimmt auch die Polarität und der Polaritätswechsel.

Die Erklärung der erhöhten Geräusche infolge des Gleichstroms ist in einer Störung der Magnetisierung des Transformators zu sehen. Angesichts seines kleinen Leerlaufstromes von rund 0,5 A Scheitelwert (3×0,17 A) erscheint ein derartiger Einfluss des bis zu 3 A grossen Gleichstromes verständlich. Dabei ist es insbesondere die einpolige Bauweise des Transformators, welche das Auftreten eines solchen Phänomens begünstigt, indem eine gegenseitige Kompensation des in allen Schenkeln entstehenden zusätzlichen Flusses nicht erfolgen kann.

Im weiteren wurde die Gleichstrommessung in den Schaltzuständen *2*, *3* und *4* von Bild 5 fortgesetzt. Bei Schaltung *2* – d.h. bei dem unterspannungsseitig erregten und von den angrenzenden 220-kV-Stationen abgetrennten Transformator – verschwand der Gleichstromanteil, und der Geräuschpegel lag bei normalen Werten. Schaltung *3* ergab ähnliche und Schaltung *4* gleiche Messergebnisse wie Schaltung *1*. Anschliessend wurde in Schaltung *1* der Sternpunkt der 220-kV-Wicklungen vorübergehend isoliert, was erwartungsgemäss – wie in Schaltung *2* – zum Verschwinden des Gleichstromes führte. Schliesslich ergab die Erdung des Sternpunktes mittels einer Impedanz von 10 Ω eine Reduktion des Gleichstromes auf rund ⅕ der ursprünglichen Werte.

Aufgrund dieser Versuche stand der Gleichstromanteil als Verursacher der erhöhten Transformatorgeräusche fest. Der Gleichstrom wird offenbar durch das Erdungsnetz der Unterstation Gstaad sowie durch die angrenzenden, über Erdseile verbundenen Maste der 220-kV-Leitung aufgenommen und fliesst in dieser Leitung zunächst zu den über 50 km entfernten Stationen in Mühleberg und Chamoson und durch die Sternpunkte der dortigen und eventuell anderer Transformatoren wieder zurück ins Erdreich. Der ohmsche Widerstand dieses ausgedehnten Strompfades – die Leitungen Gstaad–Mühleberg und Gstaad–Chamoson parallelgeschaltet – beträgt lediglich etwa 2 Ω.

Analyse des Geräuschproblems

In einer Reihe von Versuchen wurde die Ursache der erhöhten Transformatorgeräusche identifiziert. Eine während vieler Tage vorgenommene Aufzeichnung des Geräuschpegels leitete dabei den Verdacht auf vagabundierende Gleichströme der in der Nähe vorbeiführenden Bahnlinie Montreux–Berner Oberland (MOB). Die Geräusche fluktuierten nämlich in einem sich weitgehend gleichartig wiederholenden Tagesrhythmus, wobei sich stets zwischen etwa 23.30 und 05.00 Uhr eine stabile Beruhigung einstellte (vgl. Bild 3), welche mit dem nächtlichen Unterbruch des Bahnbetriebes korrelierte. Die geographische Lage der Unterstation und der 220-kV-Leitung im Hinblick auf die erwähnte Bahnlinie mit ihren regionalen Umformerstationen (1000 Volt Gleichspannung) ist in Bild 4 dargestellt.

Mit den folgenden Versuchen wollte man obigen Verdacht erhärten und den Pfad der vermuteten vagabundierenden Bahnströme kennenlernen. Dazu wurde für die vier in Bild 5 dargestellten Schaltzustände jeweils der Gleichstromanteil durch den Sternpunkt des Transformators gemessen und über mehrere Tage aufgezeichnet.

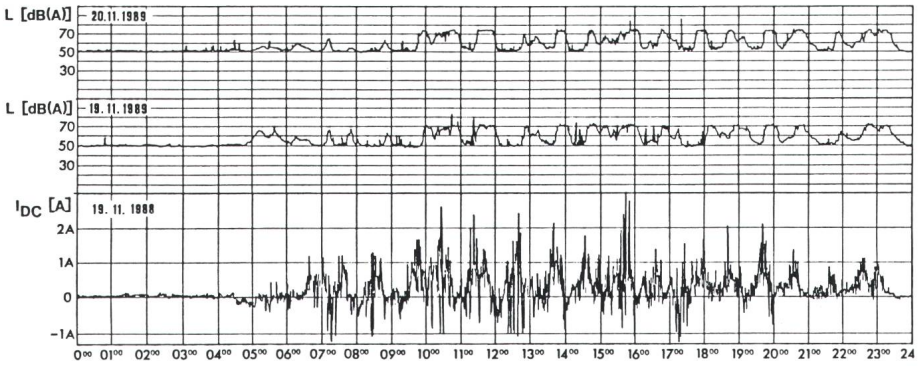


Bild 3 Geräuschpegel und Gleichstrom im Sternpunkt des Transformators

L Geräuschpegel; Tagesgänge gemessen in 5 m Distanz zum mittleren Transformatorpol am 19./20.11. 1989

I_{DC} Gleichstrom im Sternpunkt des Transformators; Tagesgang gemessen am 19.11. 1989

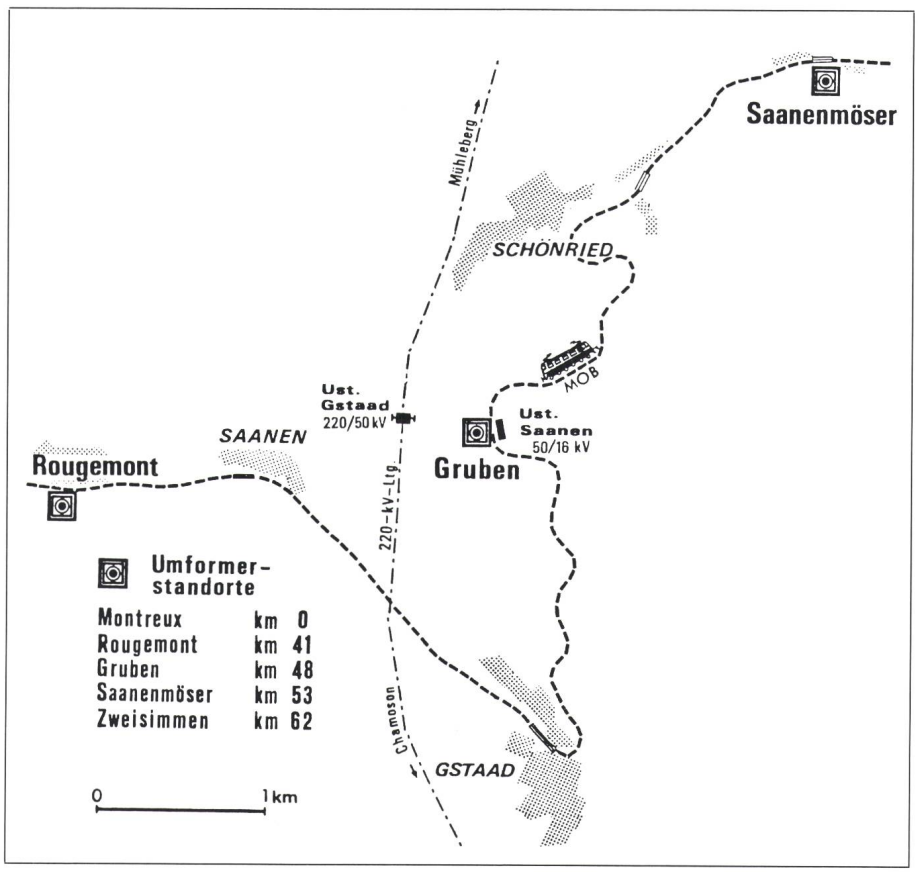


Bild 4 Geographische Lage der Unterstation Gstaad bezüglich der Bahnlinie und ihrer Umformer-Stationen

Abschliessend wurde ein Funkkontakt zu einer modernen, mit Rekuperationseinrichtung ausgestatteten Lokomotive der MOB erstellt. In einem Zeitabschnitt, während welchem sich in der Region nur dieser eine Zug in Fahrt befand, konnte leicht festgestellt werden, dass rund 0,1% des Fahrstromes durch den Sternpunkt des Transformators in Gstaad fliesst; Traktions- und Rekuperationsstrom ergaben dabei gegensinnigen Stromfluss. Die Fahrströme dieser Lokomotive bewegten sich im Bereich von +1800 ... −800 A.

Abhilfemassnahmen

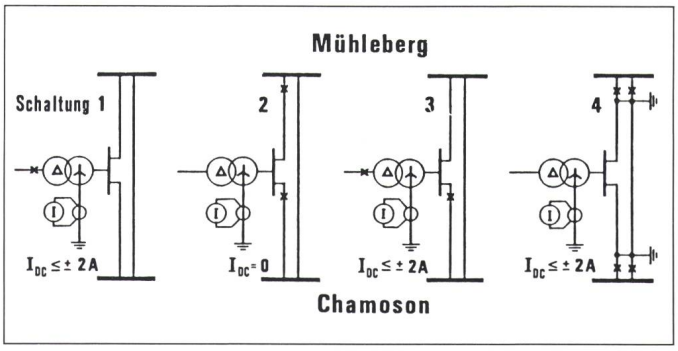
Zur Unterdrückung des störenden Gleichstroms musste nach einer geeigneten Behandlung des Sternpunktes gesucht werden. Die einfachste Lösung, nämlich eine blosse Trennung des Sternpunkts von Erde, schied wegen seiner reduzierten Isolation (Blitzstosshaltespannung 95 kV) und im Hinblick auf das starr geerdete 220-kV-Netz zum vornherein aus. Stattdessen wurden die drei folgenden Beschaltungen des Sternpunkts in Betracht gezogen:

a) Erdung mittels Widerstand
b) Isolierung, Spannungsbegrenzung mittels MO-Ableiter
c) Isolierung, Spannungsbegrenzung mittels Thyristoren.

Der rechnerisch ermittelte Fehlerstrom im Sternpunkt des Transformators bei nahem Erdkurzschluss beträgt knapp 2 kA. Dies setzt dem Widerstand für Variante *a)* eine obere Grenze bei rund 10 Ω, damit im Fehlerfall die Sternpunktspannung hinreichend tief bleibt. Die beschriebenen Versuche hatten allerdings bereits gezeigt, dass ein Widerstand dieser Grösse zwar eine markante, gemessen am Magnetisierungsstrom des Transformators jedoch nicht genügende Minderung des Gleichstromanteils erbringt. Variante *a)* wurde deshalb verworfen.

In Variante *b)* müssten die Metalloxyd-Ableiter die Funktion von Spannungsbegrenzern nicht nur in bezug auf kurzzeitige, transiente Überspannungen, sondern vor allem auch in bezug auf die vergleichsweise lang andauernden erdschlussbedingten Verlagerungsspannungen des Sternpunkts übernehmen. Dabei erwies sich das begrenzte Energieaufnahmevermögen der Ableiter als entscheidende Hürde: Zur Führung eines Stromes von 2 kA während etwa 0,6 s (Fehler-Abschaltzeit und Zeitdauer der Wiedereinschaltung) ist nämlich die Parallelschaltung von mehreren hundert Ableiterelementen erforderlich, wobei unter Annahme eines eingeprägten Stromes vor allem das Energieaufnahme- und -abgabevermögen der einzelnen Elemente und nicht die gewählte Begrenzungsspannung massgebend ist. Eine Parallelschaltung von Ableiterelementen im genannten Umfang wäre bei einer niedrigen Begrenzungsspannung durchaus praktikabel; durch Einspannen von aufeinander abgestimmten MO-Scheiben zwischen zwei Kontaktplatten könnten Blöcke mit je z.B. 100 Scheiben gebildet werden. Im Hinblick auf die gemessene, durch Leitungsunsymmetrien verursachte betriebliche Sternpunktspannung von 50 bis 250 V, je nach Schaltzustand, wäre eine Nennspannung der MO-Scheiben von 0,5 ... 1 kV zweckmässig. Schliesslich müsste noch abgeklärt werden, ob allenfalls der Einschaltvorgang mit seinen durch den Sternpunkt fliessenden, nur langsam abklingenden Ausgleichsströmen bis in die Grössenordnung des Nennstromes eine kritische Beanspruchung des Begrenzers darstellt.

Bild 5 Gleichstromfluss im Sternpunkt des Transformators bei verschiedenen Schaltzuständen



1 ... 4 verschiedene Schaltzustände des angrenzenden Netzes
x bedeutet «Schalter aus»

Eine Prüfung der unkonventionellen Variante *c)*, für welche man sich schliesslich entschied, liess rasch deren klare Vorzüge erkennen: Moderne hochsperrende Leistungsthyristoren können in einfacher Weise als Spannungsbegrenzer für hohen Ladungsdurchsatz eingesetzt werden. Ein Paar antiparallel geschalteter Elemente wirkt als trägheitsloser Schalter, welcher den Strom zu leiten beginnt, sobald über den Hauptelektroden Spannung liegt und die Steuerelektroden einen Impuls geringer Intensität erhalten. Wenn der Stromfluss unter etwa 0,1 A absinkt oder einen Nulldurchgang durchläuft, gehen die Thyristoren wieder in den sperrenden Zustand über. Der Steuerimpuls wird in einer speziellen, auf einen polaritätsunabhängigen Spannungspegel kalibrierten Zündeinrichtung generiert. Die Zündspannung kann innerhalb der Sperrfestigkeit der Thyristoren frei gewählt werden; im vorliegenden Fall wurde sie auf 4 kV festgelegt, die volle Sperrfestigkeit der eingesetzten Thyristoren (CS 682, ABB) ausnützend. Höhere Begrenzungsspannungen könnten durch Serieschaltung mehrerer Thyristoren realisiert werden.

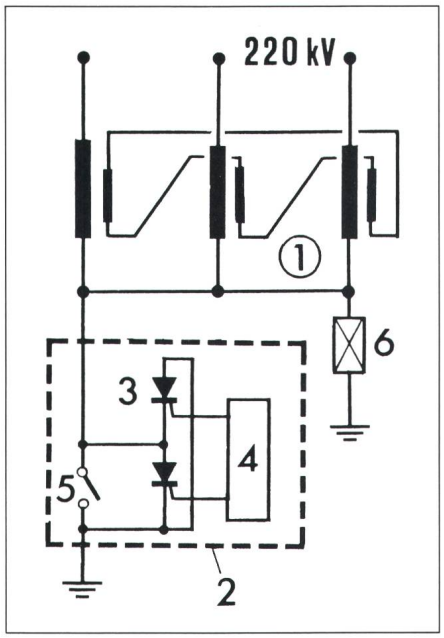


Bild 6 3poliges Schaltbild der Transformatorengruppe mit Thyristor-Begrenzer

1 220/50-kV-Transformator
2 Begrenzer
3 Thyristoren
4 Zündeinrichtung
5 Überbrückungs-Trenner
6 MO-Ableiter 6 kV

In der beschriebenen Weise kann ein Überspannungsbegrenzer gebaut werden, der trotz Verwendung elektronischer Elemente autark ist und praktisch keine Restspannung (2,5 V bei 2 kA), und damit, verglichen mit klassischen Ableitern, nur sehr wenig Verlustleistung erzeugt. Letzteres war für die vorliegende Anwendung das ausschlaggebende Merkmal, weil es eine einfache, kleine und kostengünstige Bauweise des Begrenzers erlaubt. Bei der zu Grunde gelegten Beanspruchung von 2 kA während 0,6 s, hervorgerufen durch einen nahen Erdkurzschluss, weist das Thyristor-Paar noch eine grosse Belastbarkeitsreserve auf, so dass auf eine spezielle Kühlung verzichtet werden kann.

Neben dem oben genannten Fehlerfall muss der Begrenzer auch bei transienten Vorgängen infolge Schalthandlungen und Blitzeinwirkungen aktiv werden. Dank seiner kurzen Zündverzugszeit von rund 1 µs ist er in der Lage, unter Mithilfe eines kleinen MO-Ableiters, sämtliche Arten von Überspannungen abzudecken.

Für die Bestätigung der Funktionstüchtigkeit des Begrenzers wurden Einrichtungen zur Aufzeichnung von Sternpunktspannung und -strom angebracht. Inbetriebnahmeversuche in Form von oberspannungsseitigem Einschalten des Transformators haben gezeigt, dass der Begrenzer beim Erreichen einer Spannung von etwa 4 kV den Sternpunkt zuverlässig erdet.

Wie schliesslich eine Langzeit-Aufzeichnung obiger Messgrössen gezeigt hat, reagiert der Begrenzer ein- bis fünfmal täglich auf Netzunruhen. In den meisten Fällen ist die Ursache eine Schalthandlung im 220-kV-Netz oder die Verstellung des Stufenschalters, wobei Ströme zwischen 50 und 100 A fliessen. Ein naher Erdschluss ist bisher zweimal aufgetreten; die Ströme lagen in der erwarteten Grössenordnung, und der Begrenzer arbeitete einwandfrei.

Bild 7 Anordnung des Thyristor-Begrenzers

Ergebnis

Mitte 1989 wurde der Sternpunkt der drei Transformator-Einzelpole in der Unterstation Gstaad von Erde gelöst und über eine auf tiefem Isolationsniveau gehaltenen Sammelschiene auf das geerdete Thyristor-Element geführt (Bilder 6 und 7). Erwartungsgemäss wurde dadurch der Gleichstrom unterbrochen und das Leerlaufgeräusch blieb auf konstant tiefem Niveau.