

PROBLEME DER STOSSFESTIGKEIT VON TRENNSCHALTERN IN MITTELSPANNUNGS-INNENRAUMANLAGEN

Von

A. CSERNÁTONY-HOFFER

Lehrstuhl für Elektroenergie der Technischen Universität, Budapest

(Eingegangen am 20. November 1959)

I.

Die Erfüllung der Anforderungen, die die Koordination der Isolation in Hochspannungsanlagen an die Stoßfestigkeit der Trennschalter stellt, stößt auf zahlreiche Schwierigkeiten. Diese Schwierigkeiten entstammen dem Umstande, daß man aus der dielektrischen Festigkeit, die in einem stark inhomogenen Feld bei einer Spannung von 50 Hz in Erscheinung tritt, kaum auf die dielektrische Festigkeit gegen Stoßwellen mit steiler Stirn zu folgern vermag. Da aber bei einem Trennschalter sowohl zwischen den Polen und der Erde als auch z. B. zwischen den geöffneten Kontakten ein stark inhomogenes Feld besteht, ist es verständlich, daß die Stoßfestigkeit der Trennschalter, deren Isolation vorwiegend für eine Inanspruchnahme von 50 Hz dimensioniert ist, im allgemeinen nicht ausreicht.

Die Anforderungen, die die Koordination an die Stoßfestigkeit der Trennschalter stellt, können kurz wie folgt zusammengefaßt werden:

Die Trennschalter müssen — als Bestandteile der Hochspannungsanlagen — zwischen

- a) den Polen und der Erde
- b) den Phasen und
- c) den offenen Kontakten

eine bestimmte Stoßfestigkeit besitzen.

Da aber ein Durchschlag der Trennstrecken unter allen Umständen vermieden werden muß, müssen die unter a), b) und c) angeführten drei maßgebenden Stoßfestigkeiten *abgestuft* werden, u. zw. in der Weise, daß der für die Stoßfestigkeit der Trennstrecken vorgeschriebene Wert die beiden anderen unbedingt übersteige. (Siehe die kontinuierlich ausgezogenen Linien in Abb. 1.) Diese Forderung wird sowohl in den älteren (1, 2) wie auch in den neueren (4, 5, 6) Regeln und Leitsätzen beachtet.

Infolge der Natur der Koordination stellen jedoch alle drei vorgeschriebenen Werte *untere Grenzwerte* dar, das heißt, *oberhalb* der vorgeschriebenen Minima dürfen die Festigkeitswerte eine beliebige Höhe annehmen, und es

entspringt hieraus nicht die geringste Störung, solange das *Verhältnis* der effektiven Festigkeitswerte nicht kleiner wird als das Verhältnis der vorgeschriebenen Minima. Nach unseren Erfahrungen *verschiebt sich* jedoch mit den effektiven Werten auch das *Verhältnis der effektiven Festigkeiten von dem Verhältnis der vorgeschriebenen Minima in starkem Maße*. Ganz allgemein begegnen wir z. B. dem Fall, daß unter den drei maßgebenden Stoßfestigkeiten *die gegen die Erde den höchsten Wert aufweist*. (Siehe die gestrichelten Niveaulinien der Abb. 1.) Das bedeutet aber, daß die am Trennschalter eintreffende Stoßwelle nicht zur Erde überschlägt, wie es erwünscht wäre, vielmehr schreitet sie — die Trennstrecke überschlagend — fort, oder sie schlägt zu irgendeiner benachbarten Phase über. Die richtige Abstufung kann somit umgestoßen werden,

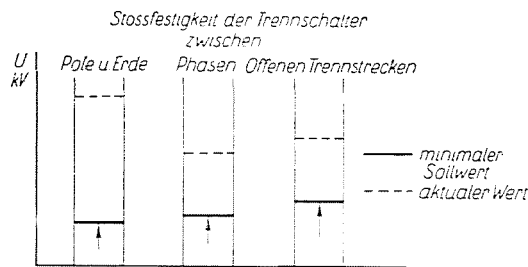


Abb. 1

ungeachtet dessen, daß die Stoßfestigkeit des Trennschalters den erfordernten minimalen Wert in jeder Hinsicht überschreitet, und z. B. den normgerechten IEC-Stoßfestigkeitstest mit Erfolg bestanden hat [4].

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die richtige Koordination der Trennschalter *durch die Festsetzung der zulässigen minimalen Werte der drei maßgebenden Stoßfestigkeiten allein nicht gesichert werden kann*.

Auf die richtige Koordination können wir uns erst verlassen, wenn die Trennschalter in sich selbst koordiniert sind, das heißt, wenn die Verhältnisse derart beschaffen sind, daß ein Überschlag der Trennstrecken a priori als ausgeschlossen gilt.

Unsere Messungen und Ergebnisse sprechen leider dafür, daß in dieser Hinsicht zahlreiche Typen, ja sogar Konstruktionen der letzten Jahre viel zu wünschen übrig lassen. Aller Wahrscheinlichkeit nach ist dies auf die noch bestehenden Unvollkommenheiten der Regeln und Vorschriften und auf die nicht immer konsequente Ausführung der Stoßprüfungen zurückzuführen.

II.

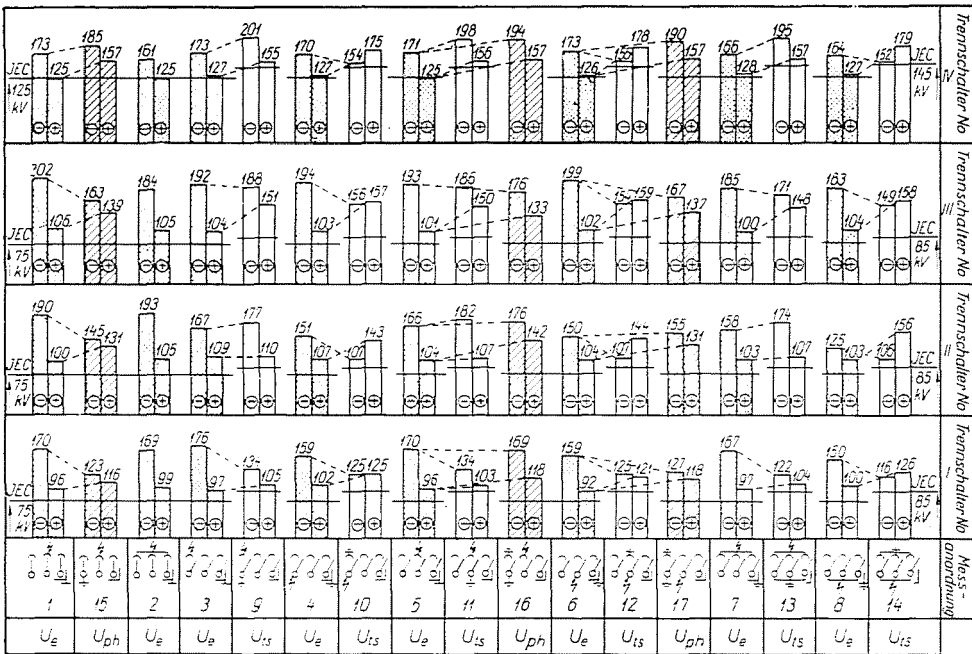
Zur Klärung der Koordinationseigenschaften von Innenraum-Mittelspannungstrennschalter klassischer Bauart wurden im Hochspannungslabo-

ratorium der Technischen Universität Budapest an mehr als 20 Typen zahlreiche Versuche unternommen.

An den Trennschaltern wurden jeweils alle technisch wichtigen Messungen durchgeführt, an dieser Stelle wollen wir jedoch für jeden Trennschalter lediglich diejenigen Meßergebnisse anführen, die zum Verständnis der zu erörternden Probleme erforderlich sind.

Wir wollen im folgenden die Meßergebnisse von vier Trennschaltern ins Auge fassen. In den Tabellen I und IV wurden die Meßergebnisse an zwei

Tabelle I—IV



50% Überschlagnspannungen der Trennschalter Nr. I—II—III und IV in kV

Trennschaltern inländischer Erzeugung (10 kV—600 A bzw. 20 kV—600 A) zusammengestellt. Die in den Tabellen II bzw. III angeführten beiden Trennschalter von 10 kV—400 A bzw. 10 kV—200 A sind Erzeugnisse zweier europäischer Weltfirmen.

Am untersten Teil der Tabellen I—IV reihen sich Abbildungen an, die den Charakter der Messungen veranschaulichen. Das Rechteck in der unteren rechten Ecke der Abbildungen deutet das Gestell der Trenner an. Unter den Abbildungen sind die laufenden Nummern der Messungen angeführt. Die 50% Überschlag- bzw. Durchschlagspannungen sind durch maßgerechte vertikale Kolonnen veranschaulicht, wobei die Höhe der Spannungen in kV über den Kolonnen angeführt ist. In jeder Kolonne sind auch die von der IEC (3,4)

vorgeschlagenen minimalen Werte durch horizontale Linien angedeutet. (Zu beachten ist, daß sich diese Werte auf nullprozentige Überschlagsspannungen also auf Haltespannungen beziehen.)

Die Kolonnen und Abbildungen in den Tabellen I—IV sind deshalb nicht in der Reihenfolge der laufenden Nummern angeordnet, damit die in der Folge miteinander zu vergleichenden Messungen nebeneinander zu liegen kommen (z. B. Messungen Nr. 3—9, 5—11—16, usw.).

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sind die Stoßfestigkeitswerte zwischen den Polen und der Erde, U_{e_s} , durch graue Kolonnen, die Stoßfestigkeitswerte der Trennstrecken, U_{ts} , durch weiße Kolonnen, die Stoßfestigkeitswerte zwischen den Phasen, U_{ph_s} , durch schraffierte Kolonnen dargestellt.

Aus den Tabellen geht deutlich hervor, daß zwischen den 50% Überschlagsspannungen der Trennschalter und den von der IEC vorgeschriebenen minimalen Stoßhaltespannungen im allgemeinen ein genügend weiter Spielraum besteht. Eine Ausnahme bildet allein der Trennschalter IV, auf den wir später noch weiter eingehen wollen.

Eine um so größere Unzulänglichkeit macht sich demgegenüber bemerkbar hinsichtlich jener Anforderung der Koordination, die sich auf die relativen Größen der drei maßgebenden Stoßfestigkeiten bezieht. Im Interesse der richtigen Koordination sollte nämlich unter den maßgebenden Stoßfestigkeitswerten diejenige zwischen den Polen und der Erde *den geringsten Wert* aufweisen, damit ein Überschlag ausschließlich zur Erde, nicht aber zwischen den Phasen und insbesondere nicht über die Trennstrecken stattfinden könne. Die Meßergebnisse weisen hingegen eben darauf hin, daß im allgemeinen der Stoßfestigkeit zwischen den Polen und der Erde der höchste Wert zukommt: die grauen Kolonnen überragen die weißen und die schraffierten meist ziemlich weit.

Nach Ausweis der Tabellen I—IV liegt die Wurzel dieses Fehlers nicht in einem zu niedrigen Wert der Stoßfestigkeit der Trennstrecken, *liegen doch die U_{ts} Werte überall oberhalb des vorgeschriebenen Minimums*. Die falsche Abstufung verursacht der zu hohe Wert der Stoßfestigkeit zwischen den Polen und der Erde, wobei der Fehler einseitig *nur für den Fall der Stoßwellen negativer Polarität auftritt*.

Wollen wir nun eine richtige Koordination der Trennschalter verwirklichen, ohne an der Konstruktion zu ändern, (was besonders im Hinblick auf die große Zahl der, in den Schaltanlagen eingebauten und falsch koordinierten Trennschalter zweckmäßig erscheint), dann liegt es auf der Hand, daß die allzu hohe Überschlagsfestigkeit der Stützer bei Stoßwellen negativer — *und nur bei negativer* — Polarität reduziert werden muß.

Um dieses Ziel zu erreichen, wollen wir die Eigentümlichkeiten der Stoßfestigkeit der Stützer näher untersuchen.

Der Umstand, daß die Überschlagsfestigkeit der Stützer polaritätsabhängig ist, stellt eine natürliche Folge der asymmetrischen Form des statischen Feldes dar.

Über den für uns wichtigsten Schnitt des Feldes zwischen den Polen des Trennschalters und der Erde gibt uns die Aufnahme des Feldes im elektrolytischen Trog annähernd Aufschluß. Die Abb. 2 stellt einen solchen Schnitt dar und läßt erkennen, daß das Feld demjenigen zwischen Spitze und Ebene nahe verwandt ist.

Die Phänomenologie der polaritätsabhängigen Festigkeit der Elektrodenanordnung Spitze-Ebene ist allgemein bekannt. Zwar sind die Einzelheiten des Polaritätseffektes physikalisch noch bei weitem nicht geklärt,

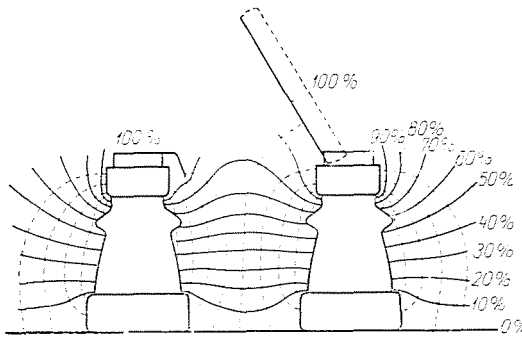


Abb. 2

doch liegt der Grund hierfür möglicherweise darin, daß sich — gleichviel ob die Spitze die negative und die Ebene die positive Elektrode darstellt oder ob das Gegenteil der Fall ist — in der Umgebung der Spitze stets eine positive Raumladung ausbildet. Diese positive Raumladung fördert das Vorwachsen von Streamern im Falle einer positiven Spitze, hindert es dagegen im Falle einer negativen Spitze. Infolgedessen liegt die Durchschlagspannung bei der Anordnung negative Spitze—positive Ebene höher als bei positiver Spitze—negativer Ebene.

Aus diesem Grunde liegt auch die negative Überschlagspannung der Stützer stets höher als die positive, so daß in einigen Fällen (siehe Tabelle III) die negative Überschlagspannung nahezu das Doppelte der positiven beträgt.

Auf Grund der Tatsache, daß die Überschlagspannung in einem asymmetrischen Feld in der Hauptsache von der Form des Feldes um die positive Elektrode abhängt, wollen wir nun folgenden Versuch vornehmen:

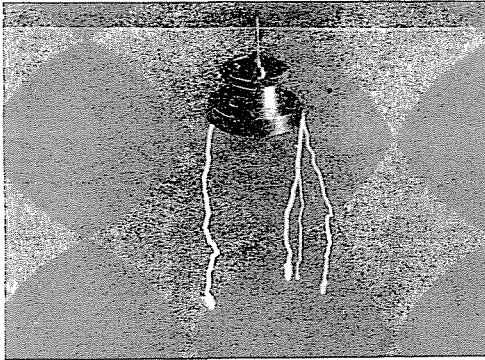
Über einer ausgedehnten ebenen Elektrode sei eine andere, kreisförmige Plattenelektrode mit geringerer Fläche so angeordnet, daß die Ebenen der beiden Elektroden einander parallel seien. Ist der Durchmesser der Plattenelektrode z. B. $D = 50$ mm und ihr Abstand von der Ebene $H = 100$ mm, so

wird sich ein stark asymmetrisches statisches Feld ausbilden, wobei die Form des Feldes derjenigen des Feldes zwischen der oberen Kappe eines Stützers und der Erde ähneln wird.

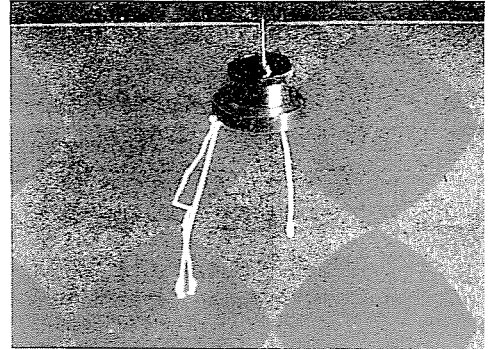
Mißt man die Stoßfestigkeit der skizzierten Anordnung, so erhält man:

für eine positive Plattenelektrode $U_{-s} = 86 \text{ kV}$,

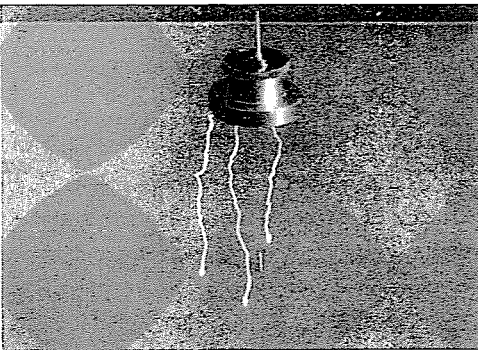
für eine negative Plattenelektrode $U_{-s} = 170 \text{ kV}$,



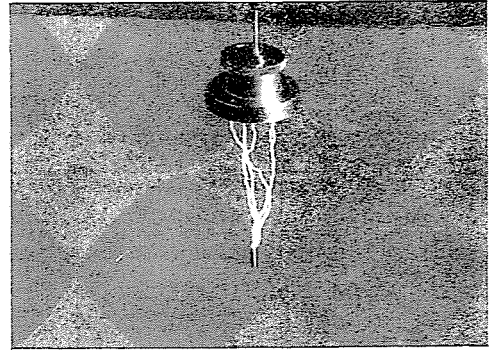
a



b



c



d

Abb. 3

das heißt, die Durchschlagspannung ist wegen der Asymmetrie des Feldes stark polaritätsabhängig.

Die Photographien 3/a und 3/b wurden an Hand dieser Messungen aufgenommen. Aufnahme 3/a zeigt die Durchschläge bei positiver Plattenelektrode und negativer Ebene, während Aufnahme 3/b die Durchschläge bei negativer Plattenelektrode und positiver Ebene darstellt. Aus beiden Abbildungen

geht hervor, daß sich der Durchschlag stets zwischen verschiedenen Punkten der Elektroden ausbildet.

Wir wollen nun an der ausgedehnten Ebene, unter der Plattenelektrode eine $h = 10$ mm hohe Spitze ausbilden und abermals die Durchschlagsspannungen messen. Wir erhalten

- für eine positive Plattenelektrode $U_{+s} = 86$ kV
- für eine negative Plattenelektrode $U_{-s} = 80$ kV

Es ist auffallend, daß die positive Durchschlagsspannung unverändert bleibt, während die negative um mehr als die Hälfte der ursprünglichen abnimmt. Der Grund für diese Erscheinung erhellt aus den Aufnahmen 3/c und 3/d.

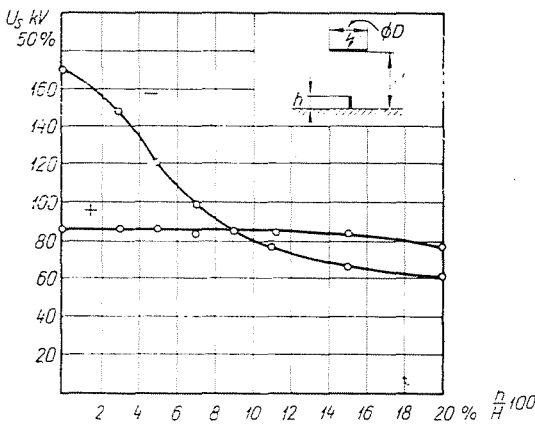


Abb. 4

Die Aufnahme 3/c zeigt die Durchschläge für positive Plattenelektrode und negative Ebene. Aus der Photographie ist deutlich zu erkennen, daß jeder Durchschlag einen anderen Fußpunkt aufweist, und daß die an der Ebene ausgebildete Spitze in dem Durchschlag keine bestimmende Rolle spielt. Es leuchtet somit ein, daß die Größe der Durchschlagsspannung unverändert dieselbe bleibt, wie sie ursprünglich war.

Eine grundlegend andere Lage ergibt sich für den Fall einer negativen Plattenelektrode und positiven Ebene. Gemäß Photographie 3/d befindet sich der untere Fußpunkt der Durchschläge in jedem Fall auf der aus der Ebene herausragenden Spitze. Unter diesen Verhältnissen ist auch die Durchschlagsspannung geringer: An Stelle des im ursprünglichen Zustand gemessenen Wertes von 170 kV beträgt sie nur 80 kV.

In Abb. 4 ist die Durchschlagsspannung in Abhängigkeit von der Höhe h der an der ausgedehnten Ebene ausgebildeten kleinen Spitze dargestellt.

($H = 100$ mm, konstant) Die beiden Kurven, die sich auf positive und negative Stoßwellen beziehen, weisen darauf hin, daß die aus der Ebene herausragende Spitze — bis zu 20% des vollen Elektrodenabstandes „ H “ praktisch allein die Durchschlagspannung — U_s beeinflusst, wodurch der Ausgleich der ursprünglichen Polaritätsabhängigkeit der Anordnung Spitze—Ebene ermöglicht wird.

Der obige Versuch weist klar auf die einfachste Methode der richtigen Koordination von Trennschaltern hin. Gelingt es nämlich, die negative Überschlagfestigkeit der Stützer auf das Niveau der positiven herabzudrücken, so wird eine am Trennschalter einlaufende Stoßwelle in beliebiger Position des Trenners stets nur zur Erde überschlagen können.

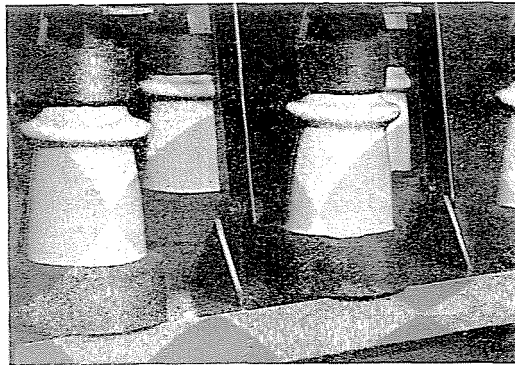


Abb. 5

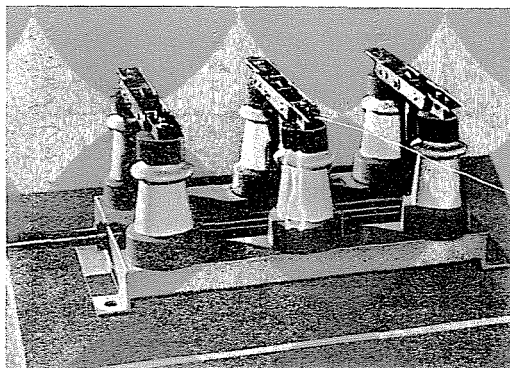
Die praktische Lösung der Aufgabe liegt auf der Hand. Am Gestell — das im asymmetrischen Feld des Trenners der Ebene der Versuchsanordnung entspricht — müssen an geeigneten Stellen irgendwelche Spitzen ausgebildet werden, wobei Größe und Ausbildungsart der Spitzen so beschaffen sein muß, daß sie die 50 Hz Überschlagfestigkeit wenig beeinflusst.

Die aus Abb. 5 ersichtliche Lösung wird diesem Gesichtspunkt in jeder Hinsicht gerecht. An das Gestell werden hiernach in der vertikalen Halbierungsebene zwischen den Phasen dreieckige Platten angeschweißt. An den 10 kV Trennern I, II und III beträgt die Höhe der Spitzen 60–70 mm, an dem 20 kV Trenner 90 mm.

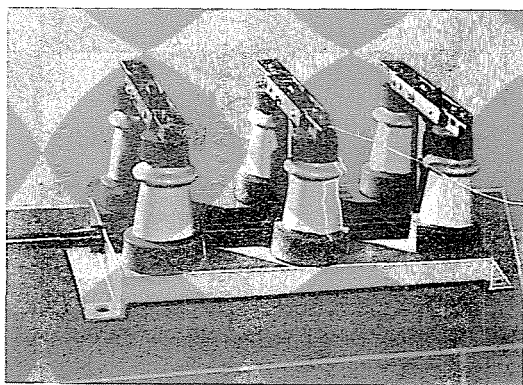
Diese Spitzen reduzieren nun die negative Überschlagspannung der Stützer — ohne die positiv polare zu beeinträchtigen — in dem gewünschten Maße, so daß ein Überschlag an den Trennschaltern ausschließlich zur Erde (zum Gestell) stattfinden kann. In vielen Positionen konnte sogar zwischen den fraglichen Polen ein unmittelbarer Durchschlag überhaupt nicht mehr hervorgerufen werden, was als ideal zu betrachten ist.

Wir wollen nun einige Photographien vorlegen, die im Laufe der Versuche aufgenommen wurden.

Die Aufnahmen 6 a und b betreffen den Trennschalter I, Abb. 6/a zeigt einen Überschlag bei positiver Stoßwelle, die Abb. 6/b hingegen einen solchen bei negativer Stoßwelle, beide im ursprünglichen Zustand des Trennschalters.



a



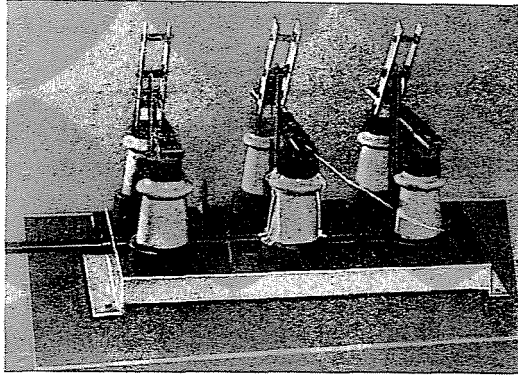
b

Abb. 6

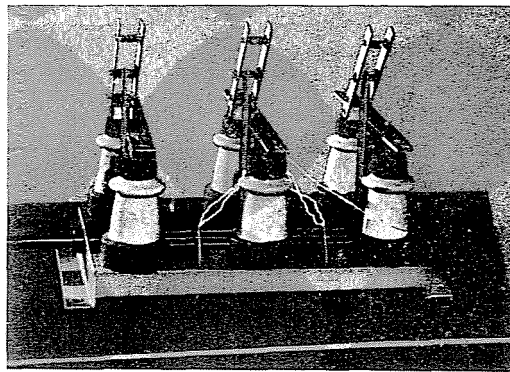
Dieselben Messungen veranschaulichen die Aufnahmen 7/a und 7/b, jedoch an den mit Spitzen versehenen Trennschaltern. Die Aufnahmen lassen deutlich erkennen, daß der Weg der positiven Überschläge unverändert blieb, während die negativen Stoßwellen ausschließlich zu den dreieckigen Spitzen überschlügen.

Es möge schließlich auch die Wirkung der Spitzen auf die 50 Hz Überschlagspannung nicht unerwähnt bleiben.

Bei der 50 Hz Überschlagspannung der mit hohen Kappen versehenen Trennschalter I, III und IV wurde durch die Spitzen nur eine Herabsetzung von 6%, 4,5% und 0% herbeigeführt, während bei dem auf innengekittete Stützer montierten Trennschalter II — erwartungsgemäß — eine Herabsetzung um 16% beobachtet wurde. (Indessen blieb die Überschlagspannung noch weit über dem Sollwert.)



a



b

Abb. 7

Was die günstige Wirkung der Spitzen auf die Stoßfestigkeit der Stützer anbelangt, so ist diese Lösung gar nicht als endgültig zu betrachten. Eine beruhigende Lösung kann nur durch die Anwendung neuer, polaritätsunabhängiger Stützern erreicht werden (7, 8). Die beschriebene Methode hat aber den Vorzug, daß die Spitzen auch nachträglich zu beliebiger Zeit montiert werden können, was die richtige Koordination der in den Schaltanlagen eingebauten zahlreichen Trennschalter älterer Bauart ermöglicht.

Die zweite Unzulänglichkeit der Trennschalter besteht — wie schon eingangs in diesem Abschnitt erwähnt — darin, daß ebenso wie Trennschalter Nr. IV auch andere 20 kV Typen die 50% Überschlagspannung der Stützer bei positiver Polarität ungefähr auf dem Niveau aufweisen, auf dem die Haltespannung sein sollte. Dasselbe wurde auch an mehreren 30 kV Typen festgestellt. Zum Glück aber ist nicht nur das Maß dieser Unzulänglichkeit geringer, sondern es kommt ihr auch eine geringere Bedeutung zu, wofür auch der Umstand spricht, daß bei Mittelspannungs-Innenraumtrennern selbst die neubearbeitete VDE 0111/1957 diese Stoßfestigkeitswerte nicht unbedingt als Haltespannungen vorschreibt.

III.

Nachdem in Abschnitt II gezeigt wurde, wie die Mängel der Koordination der Isolation von Trennschaltern durch günstige Beeinflussung des zwischen den Polen und der Erde bestehenden statischen Feldes am einfachsten

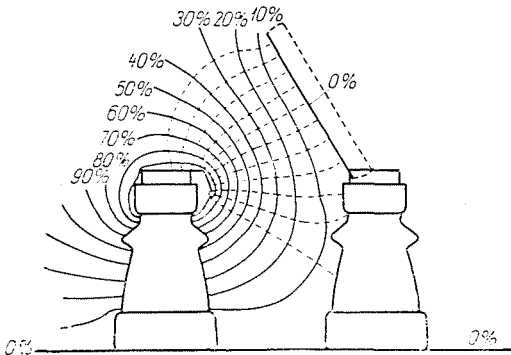


Abb. 8

eliminiert werden können, wollen wir über die Ergebnisse einiger Versuche berichten, die sich auf die Stoßfestigkeit der Trennstrecken beziehen und die bei der Ausbildung neuer Trennschalterttypen nicht außer acht gelassen werden können.

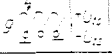
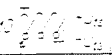
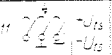
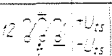

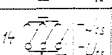
Bei einer Übersicht der Zahlenwerte für die Stoßfestigkeit der Trennstrecken in Tabelle V läßt sich eine starke Polaritätsabhängigkeit feststellen.

Über die Form des zwischen den offenen Kontakten bestehenden statischen Feldes sowie über den Grund der Polaritätsabhängigkeit gibt die im Elektrolyttrog aufgenommene Abb. 8 Aufschluß. Der Abbildung gemäß besteht zwischen den Kontakten ein stark asymmetrisches Feld, dessen Form an das Feld zwischen dem Elektrodenpaar Spitze—Ebene erinnert.

Die Meßergebnisse weisen darauf hin, daß der Polaritätsabhängigkeit der Durchschlagspannung in der Tat der dem Feldbild entsprechende Sinn zukommt, da bei den Messungen mit Stößen *von der Seite der festen Kontakte her* (Nr. 9, 11, 13 in Tab. V) die Durchschlagspannung *negativer* Polarität stets den höheren Wert aufweist: $-U_{ts} > +U_{ts}$.

Werden die Messungen mit Stößen *von der Seite der Kontaktmesser her* vorgenommen, dann wäre auf Grund des Feldbildes eine Umkehrung des Polaritätseffekts zu erwarten, entspricht doch jede der einen Elektrode zugeführte Stoßwelle beliebiger Polarität einer der anderen Elektrode zugeführten

Tabelle V

Mess- anordnung	Durchschlag- spannung	Trennschalter No			
		I 10kV/600A	II 10kV/400A	III 10kV/200A	IV 20kV/500A
9 	$+U_{ts}$	105	110	151	155
	$-U_{ts}$	134	177	186	201
10 	$+U_{ts}$	125	143	157	175
	$-U_{ts}$	125	107	155	154
11 	$+U_{ts}$	103	107	150	156
	$-U_{ts}$	134	182	186	198
12 	$+U_{ts}$	121	144	159	178
	$-U_{ts}$	125	107	154	155
13 	$+U_{ts}$	104	107	143	157
	$-U_{ts}$	122	177	171	195
14 	$+U_{ts}$	126	155	153	179
	$-U_{ts}$	116	105	149	152

50% Durchschlagspannung der Trennstrecken in kV

Stoßwelle entgegengesetzter Polarität. Es sollte also bei den Zahlenwerten der Messungen Nr. 10, 12, 14 der Tab. V allgemein $+U_{ts} > -U_{ts}$ gelten.

Dieser Umschlag tritt *bei allen Dreiphasenmessungen* (Nr. 14) und auch bei den Einphasenmessungen Nr. 10, 12, der Trenner II und IV klar hervor.

Bei den *Einphasenmessungen* der Trenner I und III kommt jedoch der Umschlag des Polaritätseffekts nicht zur Geltung, vielmehr findet man statt $+U_{ts} > -U_{ts}$ den Zusammenhang $+U_{ts} \approx -U_{ts}$.

Zu dieser Abweichung muß ausdrücklich bemerkt werden, daß sie in der ganzen umfangreichen Untersuchungsreihe allein bei Einphasenmessungen beobachtet wurde und ausschließlich bei Trennern mit niedrigem Nennstrom und dementsprechend schmalen Messern, eine Tatsache, die auch den Grund der Abweichung anweist.

Der Polaritätseffekt und die Gestaltung der Durchschlagspannungswerte wurde auf Grund des Feldbildes gemäß Abb. 8 erwartet. Bei der Aufnahme des Feldes im Elektrolyt wurde jedoch die Änderung des wahren Feldes in der dritten Dimension vernachlässigt, was zur Folge hat, daß Abb. 8 die wahren

Verhältnisse für einen Dreiphasenstoß der Trennschalter hinreichend, für einen Einphasenstoß jedoch nur in erster Annäherung deckt. Demnach ist es verständlich, daß die Gesltatung des Polaritätseffektes *bei Dreiphasenstößen den Erwartungen völlig entspricht*, bei Einphasenstößen jedoch eine Abweichung zu bemerken ist, und zwar eine *um so stärkere, je schmaler die Kontaktmesser sind, und je größer der Abstand zwischen den Phasenleitern bemessen war*.

In obigem wurde die Stoßfestigkeit der Trennstrecke eigentlich qualitativ, vom Gesichtspunkt des Sinnes der Polaritätsabhängigkeit aus betrachtet. Auf Grund des Felddbildes in Abb. 8 sollte sich aber nicht allein der Sinn des Polaritätseffektes umkehren, vielmehr sollten auch *die absoluten Werte der Durchschlagspannungen* ihre Rolle vertauschen, d. h. die von der einen Seite der Trennschalter her gemessene Durchschlagspannung positiver Polarität sollte mit der von der anderen Seite her gemessenen Durchschlagspannung negativer Polarität übereinstimmen und vice versa.

Ein Teil der Meßergebnisse entspricht in der Tat diesen Erwartungen. Ein Vergleich der zusammengehörenden Messungen Nr. 9—10, 11—12, 13—14 der Trennschalter II, III und IV bezeugt nämlich, daß die von der Seite der *festen Kontakte her* gemessenen Durchschlagspannungswerte *positiver Welle* innerhalb der Streuungsgrenzen mit den von der Seite *der Kontaktmesser her* gemessenen *negativen Werten* übereinstimmen: $+U_{ts9} = -U_{ts10}$, $+U_{ts11} = -U_{ts12}$, und $+U_{ts13} = -U_{ts14}$.

Der Rest der Meßergebnisse folgt jedoch — zum mindesten dem Anschein nach — unseren obigen Erwartungen nicht, da die von der Seite der *festen Kontakte her* gemessenen Durchschlagspannungswerte *negativer Welle* mit den von der Seite der *Kontaktmesser her* gemessenen Werten *positiver Welle* im allgemeinen nicht übereinstimmen. Es gelten vielmehr die Ungleichungen: $-U_{ts9} > +U_{ts10}$, $-U_{ts11} > +U_{ts12}$ und $-U_{ts13} > +U_{ts14}$.

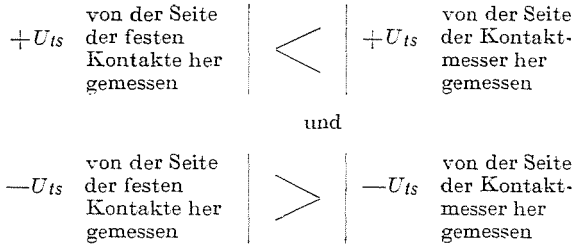
Die zahlenmäßigen Ergebnisse der Messungen deuten somit darauf hin, daß sich in gewissen Fällen Abweichungen von jenen Regelmäßigkeiten ergeben, die auf Grund der Abb. 8 erwartet wurden.

Diese Abweichungen erweisen sich aber — näher untersucht — keinesfalls als »Anomalien«. Die Folgerung nämlich, die wir aus der Form des statischen Feldes der Trennstrecken gezogen haben, kann mit anderen Worten auch so formuliert werden, daß bei einer Stoßprüfung von der Seite der festen Kontakte her die negativ polare Durchschlagspannung höher und die positiv polare niedriger, bei einer Stoßprüfung hingegen von der Seite der Kontaktmesser her die positiv polare Durchschlagspannung höher und die negativ polare niedriger sein muß.

Damit aber dieser Umschlag in den Werten der Durchschlagspannungen eintreten kann, muß bei der Stoßprüfung, die zuerst von der Seite der festen Kontakte her und danach von der Seite der Kontaktmesser her durchgeführt wird, der Wert der *negativen* Durchschlagspannung *abnehmen*, während der

Wert der *positiven* Durchschlagspannung *zunehmen* muß. In dieser Fassung weisen in der Tat *alle Trennschalter ein einheitliches Verhalten auf*. Zwar sprechen die Zahlenwerte der Tabelle V für sich, doch seien die Meßwerte der Trenner I und IV, die in der Gestaltung des Polaritätseffektes die äußeren Eigenschaften zu verkörpern scheinen, in Tabelle VI separat angeführt.

Die Regelmäßigkeit:



hat sich in der ganzen Versuchsreihe konsequent durchgesetzt, und ist *als allgemeingültig zu betrachten*.

Womit erklärt sich jedoch die Tatsache, daß die *regelrechte Tendenz* nicht in jedem Fall auch zahlenmäßig voll zur Geltung kommt?

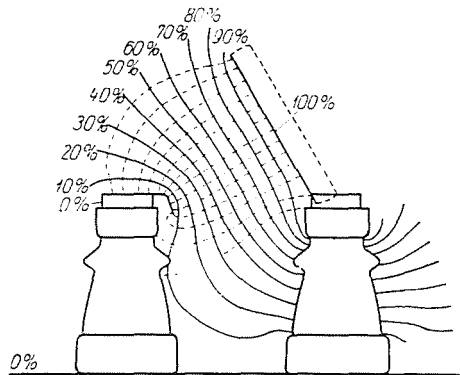


Abb. 9

Als wir im vorigen Abschnitt die Bemerkung machten, daß eine von der einen Seite her einlaufende Stoßwelle beliebiger Polarität einer von der anderen Seite her einlaufenden Stoßwelle entgegengesetzter Polarität entspricht, wurde stillschweigend vorausgesetzt, daß die Form des statischen Feldes bei den von beiden Seiten her vorgenommenen Messungen die nämliche bleibt.

Die Form des statischen Feldes ist jedoch nicht unabhängig davon, ob die Stoßwelle von den festen Kontakten oder von den Kontaktmessern her dem Trennschalter zuläuft. Bezüglich der einem beliebigen Kontakt zulaufenden Stoßwelle befindet sich nämlich die gegenüberliegende Elektrode und die

Umgebung auf dem gleichen (oder nahe dem gleichen) Potential, bei den von den verschiedenen Seiten her vorgenommenen Messungen nimmt somit bald das Messer, bald der feste Kontakt das Potential der Umgebung an, wodurch notwendigerweise auch die Form des statischen Feldes beeinflusst wird.

Werden die wichtigsten Schnitte der im Laufe der beiderlei Messungen entstehenden statischen Felder miteinander verglichen (vergleiche Abb. 8 und 9) so wird der Unterschied unmittelbar deutlich.

Tabelle VI

50% Durchschlagsspannung der Trennstrecken in kV					
Trennschalter No IV			Trennschalter No I.		
9			10		
11			12		
13			14		

Tabelle VII

α°			$+U_{15,12}$
	$-U_{11,11}$	$+U_{12,12}$	$-U_{11,11}$
60	182	144	0,79
45	135	110	0,81
30	98	78	0,88
			im idealen Fall 1,00

50% Durchschlagsspannung der Trennstrecken in Funktion der Öffnung α°

Es wäre der Mühe wert, auf den Unterschied der beiden Felder näher einzugehen, doch würde dies den Rahmen der vorliegenden Abhandlung überschreiten. Es sei aus diesem Grunde lediglich ein Versuchsergebnis angeführt, das einen anschaulichen Beweis dafür liefert, daß der erwartete Vorzeichenwechsel der Durchschlagsspannungen durch die Störwirkung der Erde beziehungsweise der Umgebung verhindert wird.

Der Einfluß der Umgebung auf das zwischen den offenen Kontakten bestehende statische Feld ist offenbar um so größer, je größer die Trennstrecke ist, und vice versa.

Wenn dies in der Tat so ist, dann kann durch Verringerung des Öffnungswinkels in zunehmendem Maße jener Zustand angenähert werden, in dem die

von der einen Seite her einlaufende Welle beliebiger Polarität der von der anderen Richtung her einlaufenden Welle entgegengesetzter Polarität entspricht. Die Abhängigkeit der Durchschlagspannung von dem Öffnungswinkel α (bei den Meßanordnungen 11–12 des Trennschalters II) ist in der Tabelle VII zusammengestellt.

Aus dieser Tabelle geht klar hervor, daß mit der Verringerung des Öffnungswinkels auch die störende Wirkung der Umgebung vermindert wird, so daß bei einem Öffnungswinkel von 30° der Wert $-U_{is11}$ dicht an den Wert $+U_{is12}$ heranrückt.

Die Polaritätsabhängigkeit der Stoßfestigkeit der Trennstrecken darf bei der Konstruktion eines Trennschalters nicht außer acht gelassen werden. Die von einer beliebigen Seite her gemessene Stoßfestigkeit zwischen den Kontakten und der Erde weist nämlich beim negativen Stoß stets einen höheren Wert auf, $-U_e > +U_e$, wogegen für die Stoßfestigkeit über die Trennstrecke die Feststellung gilt, daß, von der Seite der festen Kontakte her gemessen, $-U_{is} > +U_{is}$, von der Seite der Kontaktmesser her gemessen, $-U_{is} \leq +U_{is}$ ist.

Hieraus folgt, daß die Trennschalter gegenüber den von der Seite der festen Kontakte her einlaufenden Stoßwellen oft befriedigende Eigenschaften aufweisen, da in diesem Fall die höhere negative und die niedrigere positive Festigkeit zwischen den Kontakten und der Erde mit der ebenfalls höheren negativen und niedrigeren positiven Stoßfestigkeit der Trennstrecke zusammenfällt, so daß letzten Endes ein Überschlag ausschließlich zur Erde stattfinden kann.

Für die von den Kontaktmessern her einlaufenden Stoßwellen gilt hingegen $-U_{is} \leq +U_{is}$, wodurch aber $-$ mit Rücksicht auf den unveränderten Charakter $-U_e > +U_e$ der Stoßfestigkeit der Stützer — ein Durchschlag durch die Trennstrecke bedingt wird.

Bei der Dimensionierung der Trennstrecke ist also folgendes zu beachten: Die ungünstigste Situation entsteht, wenn eine Stoßwelle negativer Polarität von der Seite der Kontaktmesser her dem Trennschalter zuläuft, da die Stoßfestigkeit der Stützer unter solchen Umständen hoch, die Stoßfestigkeit der Trennstrecke aber relativ am niedrigsten liegt. Die Trennstrecke ist also so zu bemessen, daß ihre Stoßfestigkeit auch in diesem Falle unbedingt höher sei als die Stoßfestigkeit der Stützer. Wird dieses Prinzip zur Geltung gebracht, so entspricht — nach unseren zahlreichen Untersuchungen — die Stoßfestigkeit der Trennstrecken unter allen Umständen den Erfordernissen der Koordination.

IV.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß viele Trennschalter die Koordinationserfordernisse nicht befriedigen, und daß der Grund für die Mängel vornehmlich in der Polaritätsabhängigkeit ihrer Stoßfestigkeit liegt. Da eine

radikale Umformung der Trennschalter vermieden werden soll, muß in erster Linie die Eliminierung bzw. Reduzierung des Polaritätseffektes angestrebt werden.

Es sei an dieser Stelle bemerkt, daß die Methode, die zur Eliminierung der Polaritätsabhängigkeit der Stützer vorgeschlagen wurde, nicht unbekannt ist. Wie aus (9) und (10) hervorgeht, wurde ein solches Verfahren von einigen Firmen bereits angewendet, ohne daß sie allerdings die Grundlagen der Lösung mitgeteilt hätten.

Es sei schließlich der Dank des Autors an Dr. J. Eisler, Professor an der Technischen Universität Budapest, ausgesprochen, der ihm mit seinen wertvollen Ratschlägen stets zur Seite stand.

Auch den Unternehmen, die die Versuchsobjekte dem Autor zur Verfügung stellten sei an dieser Stelle verbindlichst gedankt.

Zusammenfassung

Zur Klärung der Koordinationseigenschaften von Innenraumtrennern klassischer Bauart wurden umfangreiche Versuche unternommen. Es stellte sich heraus, daß die Abstufung der Isolation selbst bei vielen neuen Konstruktionen falsch ist. Der Grund für diese Mängel liegt hauptsächlich in der Polaritätsabhängigkeit der Stoßfestigkeit der verschiedenen Isolationsstrecken.

Die Grundlagen einer Methode, die von einigen Firmen zur Eliminierung des Polaritätseffektes in der Überschlagnspannung der Stützer — ohne weitere Angaben — angewandt wird, werden erörtert.

Der Polaritätseffekt in der Durchschlagspannung der Trennstrecke wird eingehend behandelt, und eine allgemeingültige Regelmäßigkeit festgestellt. Demnach bildet bei Trennern klassischer Bauart stets eine von der Seite der Kontaktmesser her einlaufende negative Stoßwelle den ungünstigsten Fall.

Die Meßergebnisse werden an vier Trennern demonstriert, von denen zwei ungarischer Herkunft, zwei hingegen Erzeugnisse europäischer Weltfirmen sind.

Literatur

1. SEV Publikation 183 (erste Auflage) »Regeln und Leitsätze für die Koordination der Isolationsfestigkeit in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen« Bull. SEV 1947 S 869.
2. VDE 0111 Leitsätze für die Bemessung und Prüfung der Isolation elektrischer Anlagen von 1 kV und darüber ETZ 1951 S 671.
3. IEC Publication 71 Recommendations for Insulation Coordination 1954.
4. IEC TC 17/A Proposed Specification for Alternating Current Isolators (Disconnecting Switches) and Earthing Switches 1958.
5. Zweite Auflage der SEV Publikation 183, Bull. SEV 1956 S 941.
6. Neubearbeitung der VDE 0111 1957.
7. SCHERB, E.: Probleme bei Schaltapparaten und Meßwandlern im Zusammenhang mit der Koordination der Isolation Bull. SEV 1957 S 1113.
8. SIROTINSKI, L. I.: Hochspannungstechnik Berlin, Verlag Technik 1955.
9. MATARÉ, H.: Die Koordination der Druckluft-Schnellschalter und Trennschalter BBC Mitteilungen 1943 S 267.
10. ASEA Journal 1957 S 136.

A. CSERNÁTONY-HOFFER, Budapest, XI., Műegyetem rakpart 3, Ungarn.