

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 19 (1928)
Heft: 9

Artikel: Über die Notwendigkeit einer einheitlichen internationalen Definition der Abschaltleistung von Ölschaltern
Autor: Kopeliowitsch, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057028>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke } REDAKTION { Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Verlag und Administration } Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G. { Editeur et Administration
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet | Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XIX. Jahrgang
XIX^e Année

Bulletin No. 9

Mai I 1928
Mai I

Ueber die Notwendigkeit einer einheitlichen internationalen Definition der Abschaltleistung von Oelschaltern.

Von Dr. J. Kopeliowitsch, Baden.

621.317.35(007)

Der Autor zeigt, dass die Abschaltspannung und der Abschaltstrom, damit also auch die Abschaltleistung von Oelschaltern in Deutschland, England, Frankreich, der Schweiz und den Vereinigten Staaten von Nordamerika verschieden definiert werden, wodurch ausser technischen Nachteilen auch unangenehme Folgen für den internationalen Geschäftsgang entstehen und die gegenseitige Verständigung erschwert wird. Es ist daher zu wünschen, dass auch auf diesem Gebiete einheitliche Definitionen international festgelegt werden.

L'auteur montre que des définitions différentes sont en usage en Allemagne, en Angleterre, aux Etats-Unis, en France et en Suisse pour le courant de rupture, la tension de rupture et par conséquent aussi pour la puissance de rupture des disjoncteurs dans l'huile. Il en résulte, indépendamment de difficultés techniques, des désagréments dans la conduite internationale des affaires, ce qui rend plus laborieuse une entente entre le fournisseur et le client. Il est par conséquent très désirable que, dans ce domaine également, interviennent des définitions internationales unificomes.

Die Oelschalterfrage beschäftigt immer breitere, mit der elektrotechnischen Industrie in Berührung stehende Fachkreise. In Erkennung der betriebstechnischen Bedeutung der Oelschalter wurden neuzeitig in verschiedenen Ländern Vorschriften für die Wahl und die Prüfung dieser Apparate in besonderen Richtlinien oder Regeln durch Landeskommissionen zusammengefasst.

An der letzten Versammlung der „Commission Electrotechnique Internationale“ in Bellagio, im September 1927, wurde ein Komitee, bestehend aus Delegierten von 7 Ländern, gegründet, dessen Aufgabe die internationale Regelung der mit der Oelschalterfrage verknüpften Bestimmungen sein soll.

„La Conférence Internationale des grands réseaux à haute tension“ hat ihrerseits bereits im Sommer 1925 beschlossen, eine Umfrage über Oelschalter zwecks Klärung verschiedener technischer Fragen durchzuführen. An der letzten Versammlung wurde das Schweizerische Nationalkomitee beauftragt, die durch das Sekretariat der Conférence Internationale eingeleiteten Arbeiten weiterzuführen und an der nächsten Sitzung im Sommer 1929 darüber einen Bericht zu erstatten.

Wie sehr diese Fühlungnahme und die Zusammenarbeit verschiedener Länder auf dem verhältnismässig neuen Gebiet des Oelschalterbaues für grosse Abschaltleistungen zu begrüssen ist, kann am besten aus einer vergleichenden Betrachtung der bestehenden Vorschriften geschlossen werden. Durch nachstehende Ausführungen, die nur die Frage einer einzigen, besonders wichtigen Begriffsbestimmung, derjenigen der *Abschaltleistung*, behandeln, möchten wir die dringende Notwendigkeit der Einführung einer *internationalen Definition der Abschaltleistung* von Oelschaltern

erörtern und einen positiven Vorschlag zur allgemeinen Diskussion unterbreiten. Die angeführten Beispiele geben in krassen Zahlen darüber Aufschluss, wie verschieden heute die Berechnungsmethoden des an und für sich fiktiven Begriffes der Abschaltleistung sind, indem aus einem und dem gleichen Oszillogramm sich kVA-Zahlen ableiten lassen, die im Verhältnis 1:2,3 und darüber stehen können.

1. Kurze Erläuterung der Vorgänge bei Kurzschluss.

Die Gründe, welche die Einführung einer einheitlichen Definition der *Abschaltleistung* erschweren, rühren von den während eines Kurzschlusses auftretenden Ausgleichsvorgängen her. Eine genaue Vorausberechnung der Kurzschlussströme und ihr Abklingen, sowie der in jedem Augenblick im Kurzschlusskreise wirksamen EMK, bereitet schon in Anlagen mit einem einzigen Generator grosse Schwierigkeiten. In weit vermaschten Netzen mit zahlreichen Zentralen kann von einer genauen Berechnung keine Rede sein. Es ist jedoch möglich, durch vereinfachte Berechnungsmethoden¹⁾, oder durch einen Versuch an einem Netzmodell²⁾ für die Praxis genügend angenäherte Werte des Kurzschlussstromes am Anfang und im Dauerzustand zu bekommen. Auch sein Abklingen kann man in erster Annäherung mit Zuhilfenahme experimenteller Kurven leicht bestimmen³⁾.

Bevor zum Vergleich und zur kritischen Betrachtung der einzelnen Vorschriften geschritten wird, scheint es am Platze zu sein, an Hand zweier Oszillogramme, die zwei extreme Fälle von Kurzschlüssen darstellen, die Begriffe und die Vorgänge noch einmal zu erläutern.

Die Fig. 1 gibt Strom- und Spannungsverlauf bei einem Kurzschluss an den Klemmen eines 25000 kVA-Turbogenerators wieder. Die Klemmspannung U , ebenso wie der Kurzschlussstrom I_k klingen sehr rasch ab, wobei die

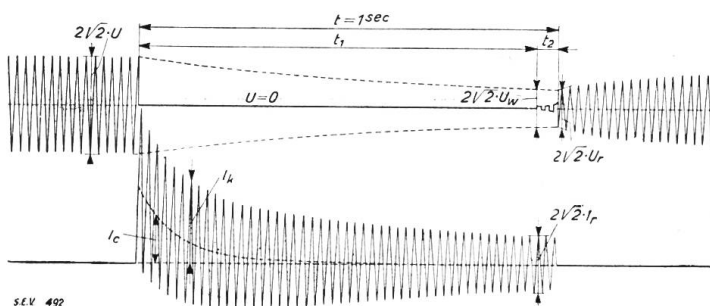


Fig. 1.

Strom- und Spannungsverlauf bei einem Kurzschluss an den Klemmen eines 25000 kVA-Turbogenerators.

- U = Spannung vor dem Kurzschluss.
- U_r = Abschaltspannung = 38% von U .
- U_w = Induzierte Spannung im Moment der Kontakttrennung (Effektivwert).
- I_k = Totaler Kurzschlussstrom = $\sqrt{I_c^2 + I_r^2}$.
- I_c = Gleichstromkomponente des Kurzschlussstromes.
- I_r = Effektivwert der Wechselstrom-Komponente.
- t = Totale Kurzschlussdauer = 1 sec.
- t_1 = Verzögerung der Abschaltung.
- t_2 = Lichtbogendauer.

Die *wiederkehrende Spannung* U_r , d. h. die Spannung, die nach der Abschaltung des Kurzschlusses sofort an den Klemmen erscheint, unterscheidet sich umsomehr von der Spannung vor dem Kurzschluss, je länger der Kurzschluss andauert und

die Umrechnung kann jedoch dadurch der Wirklichkeit besser angepasst werden, dass die Spannungsänderung nach einer Exponentialkurve entsprechend dem weiteren Verlauf der Wechselstromkomponente des Kurzschlussstromes angenommen wird.

Die *wiederkehrende Spannung* U_r , d. h. die Spannung, die nach der Abschaltung des Kurzschlusses sofort an den Klemmen erscheint, unterscheidet sich umsomehr von der Spannung vor dem Kurzschluss, je länger der Kurzschluss andauert und

1) E. M. Hewlett, J. M. Mahoney & G. A., Burnham: Rating & Selection of Oil Circuit Breakers Proc. AIEE 1918 XXXVII p. 48. Richtlinien für die Wahl der Schalter in Wechselstromanlagen, Bull. S. E. V. 1924, H. 5.

2) Einige Angaben über eine Widerstands-Schalttafel zur angenäherten Bestimmung von Kurzschlussstromstärken in Verteilungsnetzen. Bull. S. E. V. 1927, S. 713.

3) Proceedings of the AIEE 1918, Vol. XXXVII, p. 48.

der Unterschied ist am grössten, wenn im Dauerkurzschluss abgeschaltet wird. Auch die *induzierte*, bzw. *wirksame Spannung* U_w , welche im Augenblick der Kontakt-trennung den Strom im Kreise treibt, unterscheidet sich beträchtlich von der wieder-kehrenden Spannung U_r (vergl. Tabelle II), wenn die Lichtbogen- und die totale Kurzschlussdauer gleicher Grössenordnung sind, was bei Hoch- und Höchstspannungs-anlagen bei allen Schalterkon-struktionen, namentlich bei Mo-mentaustlösung, der Fall ist.

Das in Fig. 2 dargestellte Oszillogramm bezieht sich auf einen Kurzschluss an einer Ab-zweigleitung eines sehr starken Netzes (Maschinenleistung ca. 350 000 kVA, Kurzschlussleistung im Abzweig 40 000 kVA). Hier ist die Abklingung praktisch Null und der Dauerzustand tritt fast sofort nach der Entstehung des Kurzschlusses ein. Die Span-nung vor dem Kurzschluss U ist auch bei verzögerter Aus-lösung beinahe gleich der wie-derkehrenden Spannung U_r und der induzierten Spannung U_w . In gleicher Weise verhält sich der Kurzschlussstrom, indem von Anfang an sich ein konstanter Wert I_k einstellt.

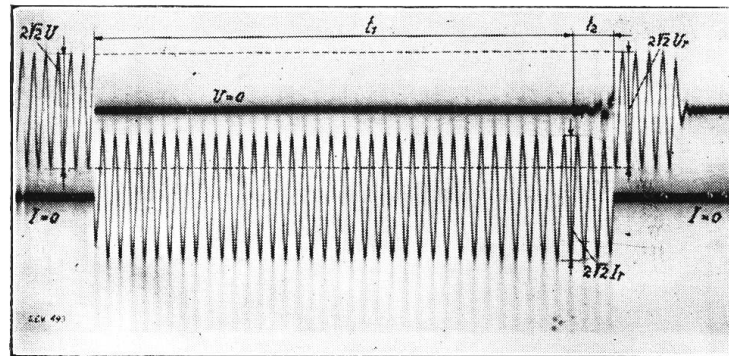


Fig. 2.
Strom- und Spannungsverlauf bei einem Kurzschluss an einer Abzweigleitung.
 U = Spannung vor dem Kurzschluss (8 kV).
 $U_r = U_w = U$ = Abschaltspannung ist gleich der Betriebsspannung.
Anfangskurzschlussstrom ist gleich dem Dauerkurzschlussstrom.

Das Abklingen des Kurzschlussstromes hängt von den charakteristischen Kon-stanten des Kurzschlusskreises ab und ist verschieden, je nachdem, ob langsam-oder raschlaufende Generatoren den Kreis speisen. In praktischen Verhältnissen wird man sich meistens eher in der Nähe des erst angeführten Beispielen befinden.

2. Vergleich verschiedener Vorschriften.

Die Bestimmungen des Abschaltstromes, der Abschaltspannung und der Abschalt-leistung, wie sie in verschiedenen Vorschriften gegeben sind, können aus der Tabelle 1 ersehen werden. Diese Zusammenstellung ist auf Grund folgender Unterlagen gemacht:
Deutschland: Regeln für die Konstruktion, Prüfung und Verwendung von Wechsel-strom-Hochspannungsgeräten für Schaltanlagen REH 1928 ETZ Nr. 23/24, 1927.
Vereinigte Staaten: Standards of the AIEE: Oil Circuit Breakers Adopted June 25, 1925.

Frankreich: Règles de normalisation du gros appareillage électrique, arrêtées par USE le 4 juillet 1923, modifiées le 4 juin 1924.

England: British Standard Specification for Oil Immersed Switches & Circuit Brea-kers for Alternating current circuits, BESA, VIII, 1923.

Schweiz: Richtlinien für die Wahl der Schalter in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen und Erläuterungen zu denselben, Bulletin S. E. V., H. 5, 1924 und H. 2, 1925.

Unter Einführung der in Fig. 1 angegebenen Bezeichnungen lassen sich die verschiedenen Abschaltleistungen, die in der Tabelle 1 angeführt sind, wie folgt schreiben:

Deutschland:	$P_{D1} = I_D U_w$	für Einphasenstrom	}	in kVA
	$P_{D3} = \sqrt{3} I_D U_w$	für Drehstrom		
Vereinigte Staaten:	$P_{A1} = I_k U$	für Einphasenstrom	}	in kVA
	$P_{A3} = \sqrt{3} I_k U$	für Drehstrom		
Schweiz:	$P_{S1} = I_r U_r$	für Einphasenstrom	}	in kVA
	$P_{S3} = \sqrt{3} I_r U_r$	für Drehstrom		

	Abschaltspannung	Abschaltstrom	Abschaltleistung	Bemerkungen
Deutschland	§ 27. . . . die im Stromkreis wirksame Spannung bei Beginn der Trennung der Schaltstücke . . .	§ 27. Der Ausschaltstrom ist der Effektivwert des Stromes, der zu Beginn der Trennung der Schaltstücke im Schaltgerät fliesst (grösste Halbwellen).*)	§ 27. Die Ausschaltleistung eines Schalters in kVA ist das Produkt des Ausschaltstromes und der im Stromkreis wirksamen Spannung bei Beginn der Trennung der Schaltstücke, beide in Effektivwerten gemessen, mit dem Zahlfaktor der Stromart multipliziert (bei Drehstrom $\sqrt{3}$). Bei kurzer Lichtbogendauer ist die wirksame Spannung nahezu gleich der wiederkehrenden Spannung nach vollendetem Ausschalten.	*) Auszug aus den Erläuterungen zu § 27: „Unter Umständen kann die Unterbrechung kurz vor dem Durchgang des Stromes durch Null erfolgen, so dass zunächst eine kleine Welle entsprechend dem Reststrom auftritt, der dann erst eine grosse Halbwellen bei wieder ansteigendem Strom folgt. In diesem Falle ist also nicht die erste, sondern die zweite Halbwellen zugrunde zu legen“. Der Effektivwert der grossen Halbwellen ist nicht näher definiert.
England	Keine Angaben.	S. 8 § 30–31. „ . . . the actual current at the time of separation of the contacts . . .“.	S. 8. § 30–31. „The breaking (interrupting or rupturing) capacity of an oil immersed switch is the maximum R.M.S. current at rated working voltage which the switch will break, under prescribed conditions, at stated intervals, a specified number of times. The breaking (interrupting or rupturing) capacity of an oil immersed circuit breaker is the maximum kVA which the circuit breaker will break, under prescribed conditions, at stated intervals, a specified number of times. The value of the max. kVA is the product of the working voltage in kV, and the actual current at the time of separation of the contacts, multiplied by 1, 1.73 or 2 for single phase, three-phase or two-phase systems respectively“.	
Frankreich	Keine Angaben.	Keine Angaben.	S. 27. § 1059. „On appelle pouvoir de coupure d'un interrupteur le courant max. que cet interrupteur peut couper sous une tension déterminée. Le pouvoir normal de coupure d'un interrupteur est défini par le courant max. que cet interrupteur peut couper sous sa tension normale“.	
Schweiz	S. 4. § 2. „Abschaltspannung ist der Effektivwert der Spannung, welche bei der Abschaltung an der unter Spannung verbleibenden Leitung auftritt, unmittelbar nachdem die Abschaltlichtbogen in allen Phasen gelöscht haben“.	S. 4. § 2. „Abschaltstromstärke ist der Effektivwert des Wechselstromanteils, der bei der Abschaltung im Moment der Öffnung der Kontakte durch den Schalter fliesst“.	S. 19. § 4b. „Aus Kurzschlussstrom und Abschaltspannung ergibt sich dann die Abschaltleistung, z. B.: für Dreiphasennetze zu: $P_{kd} = I_{kd} V_{ad} \sqrt{3}$; *) für Einphasennetze zu: $P_{kd} = I_{kd} V_{ad}$.*) V_{ad} = Abschaltspannung bei Dauerkurzschluss. I_{kd} = Abschaltstrom bei Dauerkurzschluss“.	*) Für die Berechnungen kann man in erster Annäherung annehmen, dass während des Ausgleichsvorganges die Abschaltspannung U_t proportional mit dem Kurzschlussstrom I_t abklingt. Die am Kurzschlussanfang induzierte Spannung ist beinahe gleich der Betriebsspannung U_n , die Abschaltspannung kann somit für jeden Zeitpunkt nach der Formel $U_t = U_n \frac{I_t}{I_{t0}}$ (I_{t0} = Anfangskurzschlussstrom) bestimmt werden.
Vereinigte Staaten	Keine Angaben.	S. 7. § 19–104. „The interrupting rating of an oil circuit breaker is a rating based upon the highest r. m. s. current at normal voltage the breaker can interrupt under the operating duty specified. The current value taken shall be that existing during the first half cycle of arc between contacts during the opening stroke“.	S. 7. § 19–104. „The interrupting rating of an oil circuit breaker is rating based upon the highest r. m. s. current at normal voltage the breaker can interrupt under the operating duty specified. The current value taken shall half cycle of arc between contacts during the opening stroke“.	

Auswertung einiger Abschaltversuche nach verschiedenen Vorschriften.
Dreiphasige Kurzschlüsse an Turbogeneratoren und in Netzen. Oelschalter verschiedener Herkunft.

Tabelle II.

No.	Spannung vor dem Versuch $U_k V_{eff.}$	Abschaltstrom					Wiederk. Spannung U_r kV _{eff./Ph.}	Wirks. Spannung U_w kV _{eff./Ph.}	$100 \frac{U_w}{U_r}$ %	Abschaltleistung kVA					Kurzschlussdauer sec.		
		I_r	I_{Dm}	$100 \frac{I_{Dm}}{I_r}$	I_{km}	$100 \frac{I_{km}}{I_r}$				$3 I_r U_r$	$3 I_{Dm} U_w$	$100 \frac{P_{D3}}{P_{S3}}$	$\sqrt{3} I_{km} U$	$100 \frac{P_{A3}}{P_{S3}}$	Total	Lichtbogen	$100 \frac{t_2}{t}$
		$A_{eff.}$	$A_{eff.}$	%	$A_{eff.}$	%				P_{S3}	P_{D3}	%	P_{A3}	%	t	t ₂	%
1	9,20	2 336	3 483	149	3 186	137	4,26	5,11	120	29 800	53 100	178	50 800	171	0,087	0,06	69
2	9,30	2 007	2 790	138	2 598	130	4,21	5,05	120	25 390	42 400	167	41 800	165	0,095	0,062	65
3	9,30	2 145	3 190	149	3 051	142	4,38	4,95	113	28 200	47 250	168	49 100	174	0,106	0,07	66
4	7,95	5 516	6 713	122	6 815	123	2,48	3,80	153	41 000	76 400	187	94 000	229	0,086	0,047	55
5	7,86	5 540	8 323	150	7 968	144	2,50	3,13	125	41 500	78 400	189	108 600	262	0,08	0,042	53
6	7,92	5 530	6 130	111	6 630	120	2,56	3,23	126	42 500	59 500	140	91 000	213	0,08	0,04	50
7	9,10	6 250	8 290	133	8 963	142	2,92	3,45	118	54 700	85 800	157	111 150	258	0,065	0,025	38,5
8	9,56	7 060	9 307	132	10 228	145	2,94	3,93	134	62 300	110 000	177	131 450	211	0,08	0,04	50
9	9,70	7 800	9 300	119	9 088	115	3,21	4,34	135	75 000	121 000	162	153 000	204	0,062	0,038	61
10	9,50	8 037	10 260	128	8 644	108	3,07	4,11	134	73 850	126 500	171	142 350	193	0,09	0,06	66
11	7,58	5 367	7 690	144	7 120	133	2,34	3,18	136	37 600	73 300	195	93 600	249	0,083	0,04	48
12	8,51	8 140	10 990	135	12 873	158	3,47	4,11	119	85 000	135 000	159	190 000	224			
13	8,51	8 366	10 207	122	11 666	140	3,6	3,71	103	90 000	113 660	126	172 000	191	0,045	0,02	44,5
14	8,51	8 560	9 993	117	11 672	136	3,76	4,03	107	96 500	121 000	125	172 000	179	0,05	0,025	50
15	8,07	6 470	7 347	114	9 830	153	2,80	2,88	103	54 200	63 500	117	137 500	254	0,055	0,022	40
16*	9,14	7 503			10 080	134	3,32			74 800			159 700	212	0,04	0,015	37,5
17	9,63	8 333	12 167	146	11 865	143	3,81	5,04	132	95 000	184 000	194	198 100	191	0,04	0,02	50
18	9,67	6 843	8 713	127	8 993	131	3,77	4,64	123	77 500	121 000	156	151 600	195	0,08	0,04	50
19	7,6	5 746	8 843	154	8 717	152	2,54	3,02	119	43 700	80 400	184	114 800	262	0,07	0,03	43
20	7,62	5 686	7 755	137	7 540	133	2,88	3,72	129	49 200	86 600	176	99 600	202	0,06	0,035	58,3
21	7,62	5 360	6 173	115	7 424	139	2,77	3,04	110	44 500	56 600	127	98 000	220	0,08	0,04	50
22*	6,10	4 650			6 310	136	2,36			33 000			66 750	202	0,06	0,03	50
23	6,56	4 570	6 747	148	6 463	145	2,32	2,62	113	31 000	53 000	171	73 450	237	0,08	0,03	37,5
24	8,94	6 575	8 567	130	7 677	117	3,05	3,66	120	60 000	94 300	157	119 000	198	0,085	0,03	35,3
25	8,07	5 486	5 787	105	5 644	102	2,90	4,06	140	48 000	70 500	147	78 000	165	0,065	0,03	46
26	9,65	6 163	6 910	112	6 435	105	3,25	4,13	127	60 000	85 700	143	107 500	178	0,08	0,03	37,5
27	15,00	4 550			4 550	100	6,65	6,85	103	90 500	93 500	103	118 000	130	0,15	0,1	66,6
28	15,35	8 050			8 050	100	6,77	7,35	109	163 000	177 500	109	214 000	131	0,13	0,09	69,3
29	15,35	6 540			6 540	100	7,5	8,1	108	147 000	158 000	108	174 000	118	0,1	0,08	80
30	15,35	6 080			6 320	103,8	7,3	7,55	104	133 000	143 000	107,5	169 000	127	0,11	0,09	82
31	108,1	2 893			2 893	100	32,2	43,4	134,5	279 000	376 000	134,5	545 000	195	0,346	0,12	29
32	108	1 977			1 977	100	31,5	36,5	115,5	186 500	216 000	115,5	370 000	198,5	0,27	0,07	26

* Auf den Oszillogrammen existiert für Phase I resp. Phase II keine „nächstfolgende grösste Halbwellen“. Der Abschaltstrom kann deshalb nach den „REH“ nicht bestimmt werden.

wobei wir mit I_k den Effektivwert des Abschaltstromes unter Berücksichtigung der Gleichstromkomponente, wenn eine solche vorhanden ist, also $I_k = \sqrt{I_c^2 + I_r^2}$, und mit I_r den Effektivwert des Wechselstromes allein im Augenblick der Kontakttrennung bezeichnet haben.

Der Effektivwert der „grössten Halbwelle I_D “ wird durch Aufzeichnung der quadratischen Stromkurve bestimmt. Für diese Definition ist es sehr wichtig, unterscheiden zu können, in welchem Fall die zu Beginn der Kontakttrennung auftretende grosse Halbwelle und wann die zweite darauffolgende grosse Halbwelle in die Rechnung eingeführt werden muss. Diesbezüglich enthält die Vorschrift keine Angaben.

Um die Abschaltleistung in kVA zu bekommen, wird man die Spannung in kV einsetzen.

Bei Drehstrom sollte naturgemäss I_k bzw. I_D an allen 3 Phasen, die am Kurzschlussanfang verschiedene Asymmetrie aufweisen, gemessen werden und der arithmetische Mittelwert I_{km} bzw. I_{Dm} in die Formel eingeführt werden.

Die Definition des Abschaltstromes in französischen und englischen Vorschriften ist nicht deutlich genug, um entscheiden zu lassen, ob Gleichstromanteil berücksichtigt werden soll oder nicht.

3. Verhältnisse bei Kurzschlussversuchen.

Trotz vielen Forschungsarbeiten, die auf dem Gebiete des Oelschalterbaues geführt werden und die den Zweck haben, ein generelles, analytisches Berechnungsverfahren zu entwickeln, gibt es heute noch keine allgemeingültige Formel, die alle Schalterkonstruktionen zu erfassen erlaubt. Zur Feststellung der Leistungsfähigkeit eines Oelschalters stellt man deshalb in der letzten Zeit immer öfters Abschaltversuche mit grossen Leistungen an. Trotz des grossen Interesses, welches solche Prüfungen für Werkleitungen bieten, gelingt es nur selten, besonders in Europa, genügend starke Netze für diesen Zweck frei zu machen. Meistens ist man deshalb genötigt, die Ausschaltung so rasch wie möglich nach der Einleitung des Kurzschlusses zu bewirken, damit der Schalter noch am Anfang des Ausgleichvorganges abschaltet. Auf diese Weise gelingt es, mit einem verhältnismässig bescheidenen Maschineneinsatz relativ grosse Abschaltleistungen und entsprechende Schalterbeanspruchungen zu erzielen. Dieser Kunstgriff findet ganz besonders bei Abschaltversuchen an Kurzschlussgeneratoren Anwendung, wobei die Trennung der Schalterkontakte manchmal bereits 0,01 oder 0,02 sec. nach dem Kurzschlussanfang eingeleitet wird. Wie ein solcher Versuch nach verschiedenen Vorschriften auf Grund eines und des gleichen Oszillogrammes bewertet wird, zeigt Fig. 3. Bei der Berechnung ist angenommen worden, dass der Augenblick der Kontaktöffnung sich zeitlich verschiebt und dass die Lichtbogendauer des erstlöschenden Poles immer 0,04 sec. beträgt. Die einphasige Kurzschlussleistung wurde ausserdem unter Annahme der vollkommenen Asymmetrie gerechnet. Die Abweichungen zwischen den auf diese Weise erhaltenen kVA-Zahlen, bezogen auf die schweizerischen Normen, erreichen am Kurzschlussanfang 227 bzw. 207% und nach 0,09 sec. immer noch 190 bzw. 135%.

Diesem Beispiel kann entgegengehalten werden, dass es auf einem theoretischen Oszillogramm aufgebaut ist. Wir haben jedoch dieses letztere entsprechend der wirklichen, bei Versuchen festgestellten Dämpfung des Kurzschlussstromes aufgezeichnet,

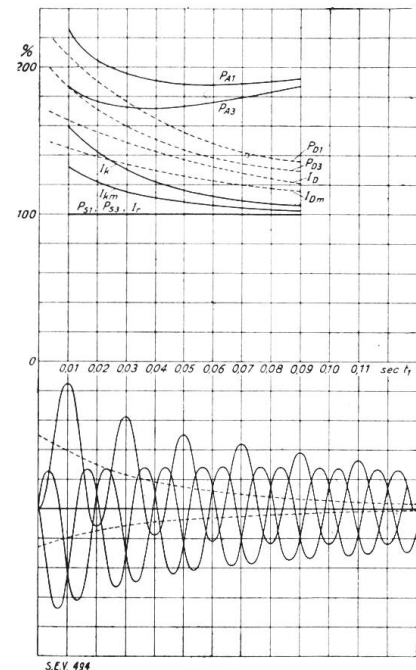


Fig. 3.
Relative Aenderung des totalen Kurzschlussstromes I_k bzw. I_D bezogen auf den Effektivwert des Wechselstromes I_r und der drei- und einphasigen Kurzschlussleistung P_{A1} , P_{A3} , nach amerikanischen; P_{D1} , P_{D3} nach deutschen Vorschriften, bezogen auf die Abschaltleistung P_{S1} und P_{S3} nach den schweizerischen Vorschriften, in Funktion der Auslöseverzögerung t_1 bei momentanen Abschaltungen.

indem wir den Dämpfungsfaktor α_c des Gleichstromgliedes gleich ca. 20 und denjenigen des Wechselstromes gleich 3,85 eingeführt haben. Die Gleichstromdämpfung wird im allgemeinen in einem Netz viel grösser; beispielsweise ergaben einige Oszillogramme für ein 15 kV-Netz (ohne Transformatoren) mit Wasserkraft von ca. 100 000 kVA bei Kurzschlüssen in der Nähe von Zentralen $\alpha_c = 60$. Bei Klemmenkurzschlüssen an Generatoren bekommt man für α_c etwas kleinere Werte: $\alpha_c = 10$ bis 15, sobald aber der Lichtbogenwiderstand im Kurzschlusskreis eingeführt wird, steigt diese Dämpfung ganz bedeutend. Das abgebildete Oszillogramm stellt somit einen mittleren Fall dar, der deshalb auch für unsere weiteren Untersuchungen betreffend die Beeinflussung der Schalterarbeit durch die Gleichstromkomponente des Kurzschlussstromes verwendet werden darf.

Um die Verhältnisse noch an Hand der Versuchsergebnisse zu beleuchten, haben wir zahlreiche Oszillogramme untersucht und das Resultat der Auswertung in der Tabelle II zusammengestellt. Diese Aufstellung umfasst ausser Klemmenkurzschlüssen an grossen Generatoren auch solche in Mittel- und Hochvoltnetzen. Die Abweichungen zwischen den Abschaltleistungen nach den verschiedenen Definitionen hängen, wie bereits oben angedeutet, einerseits (für amerikanische Normen) von den eingestellten Auslösezeiten und andererseits (für die deutschen Normen) vom Verhältnis der totalen Kurzschlussdauer zu der Lichtbogendauer ab. Selbstverständlich sind auch die Eigenschaften der speisenden Maschinen, bezw. Netze, sowie die Kurzschlussart, ob asymmetrischer oder symmetrischer Stromverlauf, von ausschlaggebender Bedeutung für das Resultat. Wegen Schwierigkeiten, welche die Ausrechnung des Gleichstromes und der wirksamen Spannung im Moment der Kontakttrennung bieten, erreichen die Unterschiede zwischen schweizerischen und amerikanischen bezw. deutschen Definitionen bis 262 bezw. bis 195 % bei dreiphasigen Kurzschlüssen, d. h. noch erheblich mehr als bei oben durchgerechnetem Beispiel.

Das angeführte Beispiel, sowie die Zahlen der Tabelle II zeigen deutlich, wie verschieden die Beurteilung und wie irreführend die Zahlen für die Abschaltleistung, angegeben in scheinbar gleichen kVA, sein können, wenn man nicht genau weiss, was darunter zu verstehen ist.

4. Soll die Leistungsfähigkeit der Oelschalter durch die zulässige Schalterarbeit angegeben werden?

Man kann sich nun fragen, ob es prinzipiell nicht richtiger und einfacher wäre, anstelle des schlecht fassbaren Begriffes der *Abschaltleistung* ein anderes Kriterium für die Beurteilung des Schalters einzuführen⁵⁾.

Diese Frage ist leicht zu rechtfertigen. Es genügt nur, darauf hinzuweisen, dass eigentlich der Begriff „Leistung“ keiner der in Tabelle I oder durch die Formeln auf Seite 279 wiedergegebenen Definition zukommt; denn weder die Betriebsspannung, noch die induzierte Spannung im Augenblick der Kontakttrennung, noch diejenige, die sofort nach dem Verschwinden der Lichtbogen wieder erscheint, ist an den Schalterklemmen im Moment der Kontakttrennung und während des Abschaltvorganges vorhanden. Messbar und genau definiert ist hingegen die *Energie*,

die im Lichtbogen verzehrt wird und die durch das bekannte Integral $A = \int_0^{nT/2} i e_1 dt$

(e_1 = Lichtbogen Spannung, T = die Periodendauer, $nT/2$ = Lichtbogendauer) ausgedrückt werden kann. Diese *Schalterarbeit* ist massgebend für die entwickelte Wärmemenge im Schalterinnern und somit für die Beanspruchung des Schalters beim Abschalten.

⁵⁾ Vergl.: B. Bauer: Untersuchungen über den Abschaltvorgang im Hochspannungs-Oelschalter, Diss. Zürich, 1915, S. 41.

Charpentier: Définition du pouvoir de coupure des disjoncteurs à huile. Bulletin de la Sté. Franc. des Electriciens T. VI, N^o 61, sept. 1926, p. 1003.

Fallou: Pouvoir de coupure BSFE, T. VII, N^o 67, mars 1927, p. 280.

Kopeliowitch: Résultats d'essais, BSFE, T. VII, N^o 67, mars 1927, p. 288.

Es wäre deshalb, besonders messtechnisch, scheinbar am einfachsten, die Schalter nach der Anzahl der zulässigen Kalorien oder kW's zu bewerten, da bei den Versuchen diese letzteren in einfacher Weise durch Verwendung von registrierenden oder ballistischen Wattmetern direkt gemessen werden können.

Diesem Vorteil stehen leider zahlreiche Nachteile gegenüber. Die Integralformel und die daraus folgende kW's-Zahl gibt dem projektierenden Ingenieur oder einem Betriebsleiter keinen Aufschluss darüber, ob ein Schalter, der eine Anzahl Kalorien beim Abschalten ohne Schaden aufzunehmen imstande ist, der gegebenen Betriebsspannung und dem annähernd vorausgerechneten Kurzschlussstrom Genüge leisten wird. Schreibt man mit Bauer⁶⁾ $A = c I_k U_r t$, so hat man für die Schalterarbeit einen Ausdruck, der beide massgebenden Faktoren, I_k und U_r , enthält. Diese letzte Formel hat aber nicht allgemeine Gültigkeit, wie man es zunächst denken könnte⁷⁾. Es ist praktisch unmöglich, ausgehend von den Netzdaten, die Lichtbogendauer t für beliebige Schalter zu bestimmen, da die Wirkungsweise dieser letzteren auf verschiedene Prinzipien aufgebaut sein kann. Aus dem gleichen Grund ist es ausserordentlich schwierig, auch für die Schalterarbeitskonstante c einen allgemein gültigen Wert anzugeben. Es ist deshalb unmöglich, durch eine einzige Formel die Schalterarbeit in Abhängigkeit der beiden Hauptfaktoren I_k und U_r für alle Schalterkonstruktionen darzustellen, und daran scheitert der Vorschlag, die Schalterarbeit als ein Kriterium für Oelschalter einzuführen. Denn solange die Werkleitung dem Konstrukteur, dem allein die Eigenschaften seiner Schalter genau bekannt sind, für die Bestellung der benötigten Schalter den Kurzschlussstrom I_k und die Betriebsspannung U angeben soll, wird im Verkehr zwischen den beiden nur von Schaltern für so und so viel kVA Abschaltleistung die Rede sein.

5. Anforderungen an die Definition der Abschaltleistung, Abschaltspannung und Abschaltstrom.

Wie kann man nun den Begriff der Abschaltleistung umschreiben, um daraus eine fassbare, konkrete Grösse zu erhalten? Es seien hier kurz die wichtigsten Anforderungen, die an eine solche Definition gestellt werden müssen, angedeutet:

- a) Sie soll zunächst die Beanspruchung des Schalters beim Abschalten möglichst genau wiedergeben; in andern Worten, sie soll physikalisch begründet sein.
- b) Die Abschaltleistung muss durch direkte oszillographische Messungen eindeutig bestimmt werden. Um Missverständnissen vorzubeugen, wird man gut tun, die Methode der Auswertung der Versuchsergebnisse (Osziogramme) in allen Einzelheiten festzulegen.
- c) Wichtig ist ebenfalls die Abschaltleistung, die in einem gegebenen Netzpunkt zu erwarten ist, aus den Netzdaten vorausberechnen zu können. Die Berechnungsmethode soll im übrigen in einem besonderen Paragraph der Vorschriften abgefasst werden.

Um der zuerst erwähnten Anforderung zu genügen, ist der Begriff der Ausschaltleistung in möglichst engem Zusammenhang mit der Schalterarbeit, die, wie wir gesehen haben, für die Beanspruchung des Schalters beim Abschalten massgebend ist, zu bringen.

Betrachten wir zunächst die *Definition der Abschaltspannung*, so ist von diesem Standpunkt aus nur die Einführung der wiederkehrenden Spannung zu rechtfertigen.

Die experimentelle Erforschung des Wechselstromlichtbogens⁸⁾ unter Oel führt in der Tat zum Ergebnis, dass für jeweilige Wiederzündung des Lichtbogens nach jedem Nulldurchgang des Stromes die an den Elektroden momentan erscheinende Spannung massgebend ist.

⁶⁾ B. Bauer: Untersuchungen an Oelschaltern, Bull. S.E.V. Bd. 6, 1915, S. 137.

⁷⁾ Vergl.: Kopeliovitch: loc. cit.

⁸⁾ Siehe z. B. B. Bauer, loc. cit. Bull. S.E.V. 1915, S. 142–156.

Vergl. auch G. Brühlmann: Die theoret. und prakt. Grundlagen für den Bau, die Wahl und den Betrieb von Oelschaltern, Bull. S.E.V. 1925, No. 2.

Für einen stark induktiven Kreis, wie es normalerweise beim Kurzschluss der Fall ist, erreicht die für die letzte Neuzündung des Lichtbogens nötige Spannung beinahe den Scheitelwert der wiederkehrenden Spannung. Beim nächsten und letzten Nullwert des Stromes steigt die Durchschlagsfestigkeit der heissen Gasblase, dank weiterer Vergrößerung des Elektrodenabstandes, über diese Scheitelspannung und die Neuzündung unterbleibt. *Die Lichtbogenlänge und somit, unter sonst gleichen Verhältnissen die Lichtbogendauer sind, wie ersichtlich, direkt von der wiederkehrenden Spannung nach der Löschung des Lichtbogens abhängig.*

Die Einführung der wiederkehrenden Spannung bietet den weiteren Vorteil, dass diese eine direkt messbare, immer in gleicher zeitlicher Reihenfolge mit dem Abschaltvorgang verknüpfte Grösse ist.

Je nach der Relaiseinstellung unterscheidet sich die Betriebsspannung von der wiederkehrenden Spannung, wie auf Seite 278 und in Fig. 1 bereits erläutert wurde, ganz beträchtlich. Der Unterschied kann besonders grosse Werte erreichen bei Pendelungen zwischen einzelnen Stromerzeugern oder ganzen Kraftwerken, Pendelungen, die eine Begleiterscheinung heftiger Kurzschlüsse bilden. Es kann somit ohne Uebertreibung gesagt werden, dass die *Einführung der Betriebsspannung in die Definition der Abschaltleistung aus theoretischen Ueberlegungen vollkommen unbegründet und verwirrend ist.* Wir werden weiter noch sehen, dass es unter bestimmten Voraussetzungen auch keine praktische Gründe gibt, welche der Betriebsspannung gegenüber der wiederkehrenden Spannung irgendwelche Vorteile geben können.

Die wirksame Spannung im Augenblick der Kontakttrennung weicht, wie wir in Tabelle II gesehen haben, ebenfalls von der wiederkehrenden Spannung ab und ist deshalb für die Lichtbogenlänge nicht direkt massgebend. Es besteht zudem kein konstantes Verhältnis zwischen diesen beiden Spannungen, so dass durch die Einführung eines konstanten Faktors diese Tatsache in ihrer Allgemeinheit nicht berücksichtigt werden kann. Baut man die Definition der Abschaltleistung auf der wirksamen Spannung im Moment der Kontakttrennung auf, so wird man ausserdem mit den Schwierigkeiten zu rechnen haben, welche die genaue Auswertung der Oszillogramme in diesem Fall bereiten werden. *Eine direkte Messung der Spannung U_w ist eben ausgeschlossen und man ist somit gezwungen, sie durch mehr oder weniger begründete Umrechnung zu bestimmen. Schon aus diesem Grund allein ist die Einführung von U_w zu verwerfen.*

Wir haben bereits hervorgehoben, welche komplizierte Berechnungen zur Vorbestimmung der Abklingung des Kurzschlussstromes bzw. der wiederkehrenden Spannung erforderlich sind. Dieser Umstand wird hie und da gegen die Definition der Abschaltleistung mittels der wiederkehrenden Spannung eingewendet. Bei der Wahl des Schalters muss aber mit dem ungünstigsten Fall einer Einschaltung auf Kurzschluss und momentaner Wiederauslösung gerechnet werden, wobei besonders in grossen Netzen an Stelle der wiederkehrenden Spannung ziemlich genau die Betriebsspannung tritt. Auch in Anbetracht der Tendenz der modernen Relais-technik, die eine möglichst rasche, ja sogar momentane Abschaltung der gestörten Netzteile anstrebt, ist es empfehlenswert, Schalter für die Anfangskurzschlussleistung zu bemessen. Vollständigkeitshalber erwähnen wir noch einen aus der Praxis uns bekannt gewordenen Fall, wo für Dauerkurzschlussleistung bemessene Schalter im Moment der Abschaltung leerlaufender Transformatoren älterer Konstruktion Ueberspannungen mit Klemmüberschlägen erzeugten. Durch daraus folgende Kurzschlüsse wurden die Schalter mit Anfangskurzschlussleistung beansprucht und schwere Störungen verursachten. Wird man aus obigen Gründen zur Erreichung grösserer Betriebssicherheit das Prinzip festlegen, Schalter nur für Anfangskurzschlussleistung des betreffenden Anlageteiles zu wählen, so wird auch der am Anfang dieses Abschnittes erwähnte Einwand gegen die Einführung der wiederkehrenden Spannung hinfällig. Auch die Wahl der Schaltertype und die Berechnung der Kurzschlussleistung für einen bestimmten Netzpunkt werden dadurch erleichtert.

Wenden wir uns jetzt zu der *Definition des Abschaltstromes*. Abgesehen von der elektrodynamischen Wirkung des Stosskurzschlussstromes, die für die Festigkeit und die Abhebungsfreiheit der Kontakte ausschlaggebend ist und die im allgemeinen den Gegenstand eines getrennten Absatzes der Vorschriften bildet, soll der Begriff des Ausschaltstromes mit der Beanspruchung des Schalters beim Abschalten, d. h. mit der Schalterarbeit, möglichst verknüpft werden.

Für die Berechnung der Wärmeentwicklung im Lichtbogen sollte streng genommen folgendes Integral für die Dauer des Lichtbogens ausgewertet werden:

$$A = \int_{t=t_1}^{t=t_1+nT/2} \{ I_{c,o} e^{-at} + \sqrt{2} I_{r,o} e^{-\beta t} \sin [\omega t + \varphi] \} e_1 dt \quad 9)$$

wo a und β Dämpfungskonstanten für Gleich- bzw. Wechselstromkomponente des Kurzschlussstromes und t_1 die Zeit zwischen dem Kurzschlussanfang und der Kontakttrennung, also die Auslöseverzögerung, bedeuten. Der Winkel φ bezeichnet die Phasenlage des Stromes im Moment der Einleitung des Kurzschlusses.

Die genaue Auswertung dieses Integrals ist, hauptsächlich wegen der Schwierigkeiten, die mit der Einführung des Ausdruckes für die Lichtbogenspannung e_1 entstehen, nicht einfach. Hingegen kann an Hand einiger vereinfachender Annahmen gezeigt werden, dass die Einführung des Wertes $I_k = \sqrt{I_c^2 + I_r^2}$, d. h. des totalen Kurzschlussstromes, eine ungedämpfte Gleichstromkomponente voraussetzt, was natürlich im allgemeinen nicht richtig ist. Auch der quadratische Mittelwert I_D der grössten Halbwelle nach der Oeffnung der Kontakte steht in keinem Verhältnis mit dem Integrationsresultat. Die Einführung dieser Werte ist also physikalisch nicht begründet, wie wir weiter noch besser sehen werden.

6. Einfluss des asymmetrischen Stromverlaufes auf die Schalterarbeit.

Im übrigen haben wir versucht, die Frage zu klären, inwiefern die Schalterarbeit durch die Gleichstromkomponente auch bei stark asymmetrischem Stromverlauf und bei praktisch momentaner Schalterauslösung beeinflusst werden kann.

Diese Untersuchung kann nur an Hand theoretisch aufgestellter Abschaltogramme erfolgen, da man bei Versuchen niemals genau gleiche Abschaltverhältnisse, wie die Lichtbogenspannung und die Lichtbogendauer, einmal bei asymmetrischem, ein anderesmal bei symmetrischem Stromverlauf erhalten kann. Ausserdem ist es schwierig, wegen der Streuung der Messwerte, aus diesen letzteren ein Gesetz abzuleiten, es sei denn, dass man eine sehr grosse Anzahl gleicher Versuche durchführt. Wir sind deshalb in folgender Weise vorgegangen: Ausgehend vom Stromverlauf nach Fig. 3 und unter Annahme einer mit der Zeit geradlinigen Zunahme der Lichtbogenspannung haben wir die Schalterarbeit durch graphische Integration¹⁰⁾ für verschiedene Kurzschluss- und Lichtbogendauern ausgewertet. Die Auswertung wurde dann unter genau gleichen Bedingungen für einen symmetrischen Stromverlauf wiederholt, die beiden Reihen als Kurven aufgetragen und das Verhältnis der zu den gleichen Abszissen gehörenden Werte gebildet. Bei der Untersuchung von dreiphasigen Kurzschlüssen wurde auf die Phasenlage der Ströme, ebenso wie auf das Weiterbrennen der letzlöschenden Phasen bis zum nächsten, nach der angenommenen Lichtbogendauer von $t_2 = 0,04$ sec. kommenden Nulldurchgang, Rücksicht genommen. Für einphasige Kurzschlüsse haben wir die Schalterarbeit bei vollkommen asymmetrischem Stromverlauf derjenigen bei symmetrischem Wechsel-

⁹⁾ Mit $I_{r,o}$ und $I_{c,o}$ sind der Effektivwert des Wechselstromes und der Gleichstromkomponente am Kurzschlussanfang bezeichnet. Dabei hat man: $I_{c,o} = \sqrt{2} I_{r,o} \sin \varphi$. Einfachheitshalber ist für beide eine Dämpfung nach einer einfachen Exponentialkurve eingeführt worden.

¹⁰⁾ Bei den gemachten Vereinfachungen ist eine mathematische Behandlung der Aufgabe unter Zugrundelegung des Integrals der S. 283 nur dann durchführbar, wenn die Dämpfung des Wechselstromes vernachlässigt wird. Diese Annahme ist jedoch in unserem Fall unzulässig. Um die graphische Methode möglichst genau zu gestalten, wurde jede Periode in 20 gleiche Teile unterteilt.

strom gegenübergestellt, wobei die Auswertung auch auf Lichtbogendauern von 0,02 und 0,03 s. ausgedehnt wurde. Um ein Bild über die Vorgänge zu erhalten, haben wir im ganzen ca. 100 Integrationen durchführen müssen. Das Resultat dieser Studie ist durch Kurven der Fig. 4 und 5 wiedergegeben, die das Verhältnis der Schalterarbeit bei asymmetrischem Stromverlauf zu derjenigen bei symmetrischer Stromkurve und umgekehrt, in Funktion der Verzögerungsdauer t_1 darstellen.

Aus dem ersten Bild kann ersehen werden, dass bei dreiphasigen Kurzschlüssen die Vergrößerung der Schalterarbeit, die übrigens vom Schaltmoment abhängig ist durch die Gleichstromkomponente, prozentual bedeutend kleiner ist, als die Erhöhung der kVA-Zahl durch Einführung des Stromes I_{km} oder I_{Dm} an Stelle von I_r in die Formel der Abschaltleistung¹¹⁾. Bei einphasigen Kurzschlüssen (Fig. 5) sind die Verhältnisse grundsätzlich die gleichen, hier ist aber der Schaltmoment für die Grösse der Schalterarbeit von ausschlaggebender Bedeutung. Wie ersichtlich, kann die im Lichtbogen verzehrte Energie durch das Gleichstromglied je nach Schaltmoment sogar beträchtlich verkleinert werden. Dies tritt hauptsächlich bei der Kurve für $t_2 = 0,03$ s zum Vorschein. Die Vergrößerung der Schalterarbeit steht bei $t_2 = 0,02$ und $0,04$ s bedeutend unter der Kurve

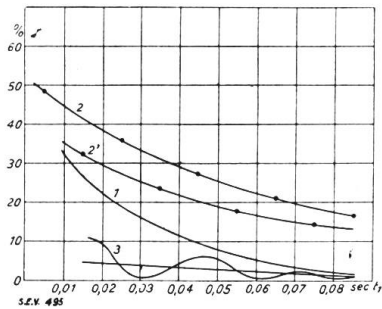


Fig. 4. Beeinflussung der Schalterarbeit durch asymmetrischen Stromverlauf bei dreiphasigen Kurzschlüssen in Funktion der Verzögerung t_1 . Angenommener Stromverlauf nach Fig. 3.

- 1 = Das Verhältnis $\frac{I_{km} - I_r}{I_r} \times 100$.
- 2u.2' = Das Verhältnis $\frac{I_{Dm} - I_r}{I_r} \times 100$.
- 3 = Das Verhältnis $\frac{A_{asym} - A_{sym}}{A_{sym}} \times 100$ bei $t_2 = 0,04$ sec.

Die Kurven 1 bis 3 zeigen, dass die Vergrößerung der kVA-Zahl durch Einführung des Stromes I_{km} bzw. I_{Dm} an Stelle des Abschaltstromes I_r in die Formel der Abschaltleistung nicht gerechtfertigt werden kann, da die Schalterarbeit sich nur wenig ändert.

Die starken Schwankungen bei $t_3 = 0,03$ s sind dadurch bedingt, dass jeweils von 3 Halbwellen 2 durch Ueberlagerung des Gleichstromgliedes vergrößert bzw. verkleinert werden, während bei $t_2 = 0,02$ und $0,04$ s nur die Reihenfolge der grossen und kleinen Stromwellen bei Veränderung der Schaltzeit t_1 periodisch gewechselt wird.

Bemerkenswert ist beim Fall $t_2 = 0,03$ s, dass die Vergrößerung der Schalterarbeit über den entsprechenden Wert des Verhältnisses $\frac{I_k - I_r}{I_r}$ liegt. Beispielsweise hat man für $t_1 = 0,065$ eine Erhöhung der Lichtbogenenergie von 26,5 % gegenüber $\frac{I_k - I_r}{I_r} = 10$ %. Dies erklärt sich wohl dadurch, dass bei der Betrachtung einzelner Halbwellen die Wurzel $\sqrt{I_c^2 + I_r^2}$ keine physikalische Bedeutung hat, da an ihre Stelle der quadratische Mittelwert der Summe $(I_c + \sqrt{2} I_r \sin \omega t)$ eingeführt werden

11) In der Fig. 4 haben wir für das Verhältnis $100 \frac{I_{Dm} - I_r}{I_r}$ zwei Kurven 2 und 2' eingezeichnet, da je nach Zeitmoment der Kontrakttrennung die eine oder die andere grosse Halbwellen für die Berechnung nach der deutschen Definition in Betracht kommt.

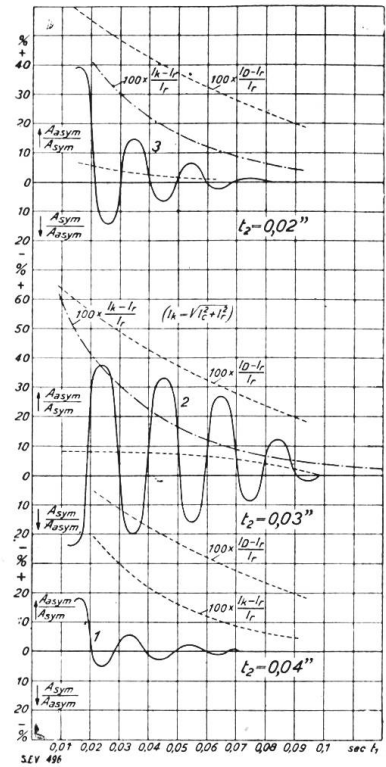


Fig. 5. Beeinflussung der Schalterarbeit durch asymmetrischen Stromverlauf bei einphasigen Kurzschlüssen in Funktion der Verzögerung t_1 . Stromverlauf nach Fig. 3.

- 1 = Aenderung des Verhältnisses $\frac{A_{asym} - A_{sym}}{A_{sym}} \times 100$ bei $t_2 = 0,04$ s.
- 2 = Aenderung des Verhältnisses $\frac{A_{asym} - A_{sym}}{A_{sym}} \times 100$ bei $t_2 = 0,03$ s.
- 3 = Aenderung des Verhältnisses $\frac{A_{asym} - A_{sym}}{A_{sym}} \times 100$ bei $t_2 = 0,02$ s.

muss. Im betr. Fall haben wir für $t_1 = 0,065 \text{ s}$ ein Verhältnis $\frac{I_c}{I_r} = 46 \%$, das während der Zeit t_2 weiter abklingt. Das Verhältnis $\frac{I_D - I_r}{I_r}$ ergibt dagegen einen etwas zu hohen Wert, was ohne weiteres erklärlich ist.

Die Kurven der Fig. 4 und 5 zeigen gegenüber der Wirklichkeit eher zu grosse Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Schalterarbeit durch asymmetrischen Stromverlauf, denn durch Einführung des Lichtbogenwiderstandes im Kurzschlusskreis wird, wie bereits erwähnt, die Dämpfung des Gleichstromgliedes erheblich erhöht. Ausserdem steigt die Lichtbogenspannung mit der Zeit meistens rascher als angenommen wurde, so dass am Ende der Abschaltung, d. h. zu der Zeit, wo der Gleichstrom fast abgeklungen ist, eher mehr Energie im Lichtbogen verzehrt wird, als es bei unseren Berechnungen der Fall ist. Aber auch dieses Resultat lässt die einwandfreie Schlussfolgerung zu, dass die Vergrößerung der KVA-Zahl bei der Berechnung der Abschaltleistung mit dem Strom $I_k = \sqrt{I_c^2 + I_r^2}$ oder I_D an Stelle des Wechselstromes I_r im allgemeinen in keinem Verhältnis mit der Schalterbeanspruchung beim Abschalten steht. Durch die Gleichstromkomponente kann unter Umständen sogar eine Verkleinerung der Schalterarbeit bewirkt werden. Diese Rechnungsweise scheint uns deshalb physikalisch unbegründet.

Wir wollen noch die Begünstigung des *Löschvorganges* durch die Asymmetrie im Stromverlauf näher erörtern.

Auf Seite 278 wurde kurz auf den Abschaltvorgang und die Lichtbogenlöschung eingegangen und erwähnt, dass der Lichtbogen bei jedem Nulldurchgang auslöscht und hernach unter Einwirkung der sofort an den Kontakten auftretenden Spannung wieder zündet. Die Phasenverschiebung zwischen Kurzschlussstrom und der im Kreise wirksamen EMK ist normalerweise beinahe 90° , so dass die Zündspannung praktisch den Amplitudenwert der wiederkehrenden Spannung erreichen kann.

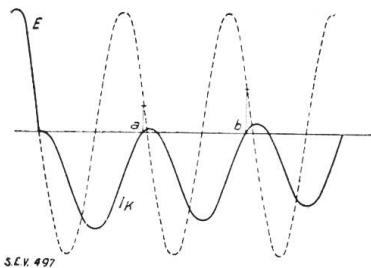


Fig. 6.
Begünstigung der Lichtbogenlöschung durch asymmetrischen Stromverlauf. Beim Nullwert des Stromes in Punkten *a* und *b* erreicht die wiederkehrende Spannung bloss 20 bzw. 35 % des Amplitudenwertes.

Bei starker Asymmetrie wird jedoch der Nulldurchgang des Stromes zeitlich verschoben, wie dies aus der Fig. 6 ersichtlich ist. Die wiederkehrende Spannung in den Punkten *a* und *b* erreicht z. B. nur 20 bzw. 35 % der sonst bei symmetrischem Stromverlauf vorhandenen Spannung. Es kommt ausserdem dabei noch ein weiterer für die Löschung günstiger Faktor dazu: Der Strom hält eine längere Zeit in der Nähe vom Nullwert an, so dass unter Umständen der Lichtbogen während dieser ganzen Zeitspanne wegen zu kleiner Energiezufuhr nicht existieren kann, was eine weitgehende Neutralisierung der jonisierten Gasstrecke und eine Erhöhung ihrer Durchschlagsspannung mit sich bringen kann. Unter solchen Ver-

hältnissen tritt öfters eine Neuzündung nicht mehr auf und der Kurzschlusskreis wird sofort nach der Entstehung des Kurzschlussstromes beim ersten oder zweiten asymmetrischen Nulldurchgang unterbrochen. Diesen Vorgang sehen wir z. B. auf den Oszillogrammen der Fig. 7 und 8, welche bei Versuchen an einem 25 000 kVA-Turbogenerator bei 7 und 11 kV aufgenommen wurden. Bemerkenswert ist dabei, dass am ersten Oszillogramm gleichzeitig 2 Phasen zum frühzeitigen Auslöschen gekommen sind, wodurch eine vollständige, bedeutend erleichterte Abschaltung bewirkt wurde.

Die Fig. 8 bringt die Begünstigung der Abschaltung durch asymmetrischen Stromverlauf noch besser zum Ausdruck, indem eine Phase praktisch sofort, beim ersten um 90° phasenverschobenen Nulldurchgang des Stromes löscht, die beiden andern dagegen noch während 0,055 s. weiterbrennen.¹²⁾ Die Dämpfung der Gleich-

¹²⁾ Die Abschaltung erfolgte durch einen dreipoligen Schalter mit einer relativ kleinen Ausschaltgeschwindigkeit.

stromkomponente des Stromes I_1 ist in diesem Fall am Anfang kleiner als diejenige des Wechselstromes. Diese Erscheinung, die durch die Wirkung kleiner der Dämpferwicklung zu erklären ist, bedingt den „überasymmetrischen“ Verlauf des Stromes I_1 .

Ein weiteres Bild (Fig. 9) zeigt schliesslich eine bemerkenswerte Abschaltung. Die Löschung des asymmetrisch verlaufenden Stromes erfolgt bei seinem ersten Nulldurchgang. Eine Halbperiode später wird jedoch die gleiche Phase wieder gezündet, um erst nach 0,025 s definitiv zu löschen.

Die Begünstigung des Löschvorganges durch die Gleichstromkomponente des Kurzschlussstromes tritt zwar nicht bei jeder Schaltung auf, viel öfters aber

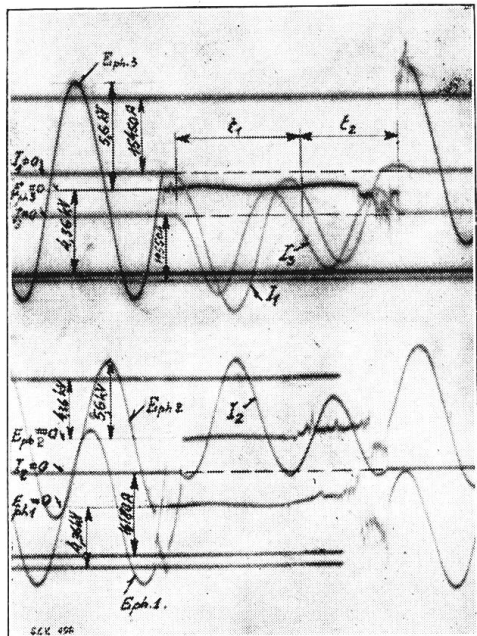


Fig. 7.
Begünstigung des Abschaltvorganges durch asymmetrischen Stromverlauf. Abschaltung eines dreiphasigen Kurzschlusses bei 6,9 kV:
 $t_1 = 0,0215 \text{ sec.}, t_2 = 0,017 \text{ sec.}$
Die Phasen 1 und 2 löschen noch während der starken Asymmetrie.

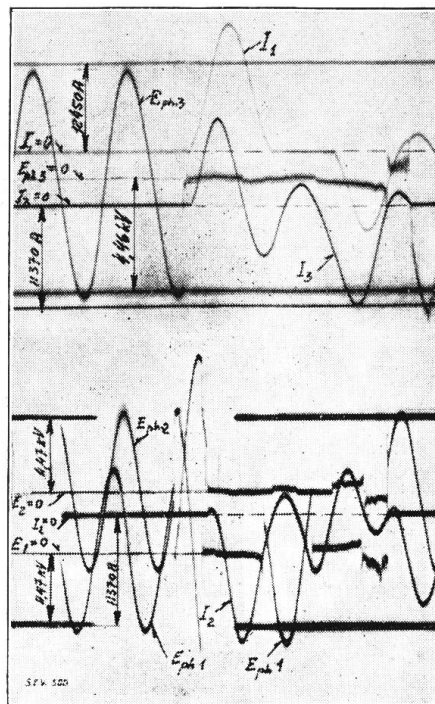


Fig. 9.
Begünstigung des Abschaltvorganges durch asymmetrischen Stromverlauf. Der Lichtbogen der Phase I löscht bei ersterem um 90° phasenverschobenem Nulldurchgang, um nach 0,013 sec. wieder zu zünden. Die endgültige Löschung erfolgt dann nach weitem 0,02 sec.

als man es allgemein annimmt. Wir haben diese Erscheinung bei verschiedenen Kurzschlussversuchen an zahlreichen Oszillogrammen gesehen und konnten uns überzeugen, dass es sich dabei nicht um einige Ausnahmefälle handelt. Es ist nicht

daran zu zweifeln, dass ähnliche Beobachtungen auch an andern Orten gemacht worden sind und wir hoffen, dass die oben angeführten Ueberlegungen und Oszillogramme die Frage klar genug beleuchten.

Was die Abschaltungen anbetrifft, bei denen der Lichtbogen auch beim symmetrischen Stromverlauf nur eine Halbperiode dauert, so bilden sie erfahrungsgemäss bei mittleren und höheren Spannungen eine Ausnahme. Im übrigen steht nichts im Wege, die während dieser einzigen Halb-

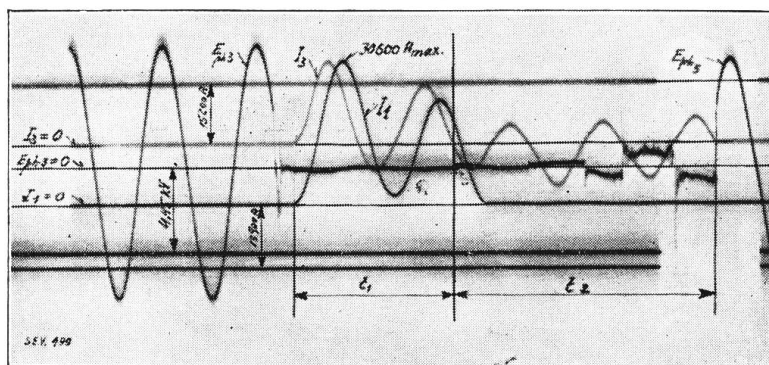


Fig. 8.
Begünstigung des Abschaltvorganges durch asymmetrischen Stromverlauf. Abschaltung eines dreiphasigen Kurzschlusses bei 8,5 kV. Die Löschung des Stromes I_1 erfolgt bei ersterem um 90° phasenverschobenem Nulldurchgang nach 0,04 sec. Die beiden andern Phasen brennen nachher noch während 0,055 sec.:
 $t_1 = 0,034 \text{ sec.}, t_2 = 0,06 \text{ sec.}$

welle durch Asymmetrie bedingte höhere Stromstärke und grössere Schalterarbeit bei der Abfassung der Vorschriften durch Einführung des quadratischen Mittelwertes der Summe ($I_c + \sqrt{2} I_r \sin \omega t$) zu berücksichtigen.

Aus dem Vorhergehenden geht zusammenfassend hervor, dass im allgemeinen die Berücksichtigung des Gleichstromes bei der Ausrechnung der Abschaltleistung zu kVA-Zahlen führen kann, deren Grösse in keinem Verhältnis zu der wirklichen Beanspruchung des Schalters steht.

Die Erkenntnis, dass manche Konstrukteure mangels einer sicheren Grundlage für die Berechnung der Oelschalter viel zu grosse Garantiewerte abgeben, hat dazu beigetragen, dass Leistungsprüfungen auch für Oelschalter immer öfters verlangt und durchgeführt werden. Diese Verhältnisse können auf diese Weise, allerdings als Typenprüfung, mit Erfolg bekämpft werden, bis die Erforschung der Abschaltvorgänge eine zuverlässige, allgemein gültige Formel für die Dimensionierung der Oelschalter liefern wird. Gleich ernst scheint uns die Tatsache, dass manche Vorschriften zu irreführenden Schlussfolgerungen Veranlassung geben und somit zu ähnlichen Schalterdefekten, wie bei einer übertriebenen Garantie seitens Fabrikanten, führen können.

7. Vorschlag für eine einheitliche Definition der Abschaltleistung.

Im Nachstehenden wird in Anlehnung an die bereits erwähnten Richtlinien des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins eine Definition der Abschaltleistung vorgeschlagen, die der wirklichen Beanspruchung der Schalter am nächsten kommt. Die Berechnungsmethode der Netzkurzschlussleistung soll, wie wir schon betont haben, ein besonderes Kapitel der Vorschriften bilden und ist hier nicht näher behandelt.

a) Die Abschaltleistung ist das Produkt aus Abschaltstrom und Abschaltspannung, mit dem Zahlenfaktor der Stromart multipliziert (bei Drehstrom $\sqrt{3}$). Sie wird in Kilo- oder Mega-Voltampere angegeben.

Dieser Begriff ist nur zum Kennzeichen der Leistungsfähigkeit von Oelschaltern eingeführt und bezieht sich stets auf eine bestimmte Abschaltspannung und beinahe 90° nacheilenden Kurzschlußstrom. Aus der Angabe einer Abschaltleistung kann nicht ohne weiteres auf die Abschaltleistung bei einer andern Spannung geschlossen werden.

b) Die Abschaltspannung ist der Effektivwert der wiederkehrenden Spannung, welche bei der Abschaltung an der unter Spannung verbleibenden Leitung sofort nach der definitiven Löschung des Abschaltlichtbogens in allen Phasen auftritt.

Liegt ein Oszillogramm eines Abschaltversuches vor, so ist die Abschaltspannung zwischen den beiden Umhüllungskurven der Grundwelle der wiederkehrenden Spannungskurve im Masstab abzulesen oder aus dem Vergleich mit der entsprechenden Spannung vor dem Kurzschluss abzuleiten.

Bei verzögerter Auslösung unterscheidet sich die Abschaltspannung in den meisten Fällen bedeutend von der Betriebsspannung. Bei unverzögerter Auslösung ist der Unterschied kleiner, jedoch nicht vernachlässigbar (momentane Ueberspannungen werden nicht berücksichtigt).

Bei der Wahl eines Schalters für eine bestimmte Anlage wird empfohlen, vorsichtshalber die Betriebsspannung als Abschaltspannung in die Berechnung der Abschaltleistung einzuführen.

Will man die Abschaltleistung bei einem aufgetretenen Kurzschluss nachträglich bestimmen, so können zur Ermittlung der Abschaltspannung gleiche Abklingungskurven wie diejenigen für Kurzschlussstrom¹³⁾ benützt werden. Die Kurzschlussdauer kann bei zuverlässigen Relais gleich der eingestellten Auslöseverzögerung eingesetzt werden. Bei Momentauslösung ist die Abschaltung erfahrungsgemäss nach 0,1 bis 0,2 sec. für Spannungen bis 15 kV und 0,2 bis 0,4 sec. für höhere Spannungen beendigt.

c) Der Abschaltstrom in Ampere ist der Effektivwert des Wechselstromanteiles des Kurzschlussstromes, der bei der Abschaltung im Augenblick der Kontaktrennung durch den Schalter fliesst.

¹³⁾ Z. B. nach Proc. of the AIEE 1918, Vol. XXXVII, p. 48.

Es ist prinzipiell zwischen *Anfangs-* und *Dauerkurzschlussstrom* zu unterscheiden. Der *Anfangskurzschlussstrom* ist der Effektivwert des Wechselstromanteiles der am Kurzschlussanfang auftritt und nach mehr oder weniger langer Zeit in den *Dauerkurzschlussstrom* übergeht. Für die annähernde Vorausbestimmung oder nachträgliche Ermittlung der Abklingung können z. B. die in Proc. of the AIEE, Vol. 37, 1918, S. 48 angegebenen Kurven verwendet werden.

Das Abklingen des Stromes während des Abschaltvorganges (also während der Zeit t_2) ist praktisch vernachlässigbar, sein Einfluss auf die Schalterarbeit könnte auch nicht zum vornherein bestimmt werden, weil die Lichtbogenlänge und der Lichtbogenwiderstand unbekannt und durch konstruktive Verhältnisse bedingt sind. Aus diesen Gründen ist als Abschaltstrom der Strom bei Kontakttrennung in die Rechnung einzuführen.

Aus einem Oszillogramm wird der Abschaltstrom auf folgende Weise ermittelt: Beide Exponentialkurven, die die Grundwelle des Abschaltstromes beidseitig umhüllen, werden möglichst genau eingezeichnet und der im Augenblick der Kontaktöffnung bestehende Abstand zwischen diesen beiden Kurven wird im Masstab abgelesen und mit dem Zahlenfaktor $\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0,354$ multipliziert. Der Augenblick der Trennung der Kontakte wird im allgemeinen auf Grund der ebenfalls oszillographisch aufgenommenen Lichtbogenspannung festgestellt; sollte die Methode Schwierigkeiten bereiten, so kann zum gleichen Zweck die Kontaktbewegung oszillographisch aufgenommen und daraus die Kontakttrennung abgeleitet werden.

Beträgt die Lichtbogendauer an allen Phasen bei wiederholten Abschaltungen und bei symmetrischem Stromverlauf nur eine Halbwelle, so darf an Stelle des Wechselstromes allein der quadratische Mittelwert der betreffenden Halbwelle, bei dreiphasigen Kurzschlüssen der Mittelwert aus 3 Phasen, als Abschaltstrom in die Rechnung eingeführt werden.

Diese Abhandlung bezweckt die Frage der Definition der Abschaltleistung zu einer allgemeinen Diskussion zu bringen. Die vorgeschlagene Lösung wird, hoffen wir, in massgebenden Kreisen Anklang finden. Das geschilderte Sachverhältnis, das auf die Entwicklung des internationalen Geschäftsganges sehr hemmend wirkt und die gegenseitige Verständigung erheblich erschwert, soll dadurch aus der Welt geschafft werden.
