

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	46 (1955)
Heft:	11
Artikel:	Statistische Untersuchung über Eigenfrequenzverhältnisse in möglichst vielen Netzen
Autor:	Baltensberger, P.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1060929

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 07.01.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

**DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEM VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)**

**Statistische Untersuchung über Eigenfrequenzverhältnisse
in möglichst vielen Netzen¹⁾**

Von *P. Baltensperger*, Baden (AG)

519.24 : 621.311.1 : 621.3.018.41

Die Arbeit befasst sich mit der Weiterverarbeitung von aus der Literatur bekanntem statistischem Material, namentlich von umfangreichen schwedischen und amerikanischen Eigenfrequenz- bzw. Steilheitswerten. Es wird gezeigt, dass die bisher publizierten Steilheiten der wiederkehrenden Spannung durchschnittlich ca. 40 % zu hoch sind. Auf Grund einer praktischen Annahme der Häufigkeitsverteilung der Steilheiten werden sämtliche für schweizerische Netze publizierten Steilheiten korrigiert. Der Vergleich dieser Werte mit auf ähnlicher Basis korrigierten amerikanischen Steilheiten ergibt eine verhältnismässig gute Übereinstimmung. Die grossen Steilheiten sind sehr selten, und sie kommen um so häufiger vor, je kleiner sie sind. Die seltenen extremen Einzelfälle sollen aus wirtschaftlichen Gründen besonders behandelt werden. In den Netzpunkten mit sehr grossen Kurzschlussleistungen ist die Steilheit bei halber Kurzschlussleistung ca. 5mal so gross als bei voller Kurzschlussleistung.

L'auteur a étudié les données statistiques connues, notamment les importantes publications suédoises et américaines, au sujet des valeurs de la fréquence propre et de la raideur de la tension de rétablissement. Il montre que les valeurs de la raideur publiées jusqu'ici sont en général d'environ 40 % trop élevées. En se basant sur une répartition pratique de la fréquence d'apparition des raideurs, il a corrigé toutes les valeurs publiées pour les réseaux suédois. Une comparaison de ces valeurs avec celles des raideurs américaines, également corrigées de la même façon, donne une assez bonne concordance. Les très fortes raideurs sont rares; plus les raideurs sont faibles, plus elles sont fréquentes. Les cas extrêmes qui se produisent rarement doivent être traités spécialement, pour des raisons d'ordre économique. Aux endroits de réseaux présentant de très grandes puissances de court-circuit, la raideur à demi-puissance est environ 5 fois supérieure à celle à la pleine puissance de court-circuit.

Einleitung

Über den Verlauf der nach der Abschaltung von Kurzschlüssen zwischen den Schalterkontakten auftretenden wiederkehrenden Spannung in Hochspannungsanlagen und -Netzen besteht eine ausgedehnte Literatur. Dieses Problem ist von grosser technischer und wirtschaftlicher Bedeutung, weil das Kurzschluss-Ausschalt-Vermögen der Schalter je nach ihrer Bauart mehr oder weniger vom Charakter der wiederkehrenden Spannung abhängt. Eine umfassende Zusammenstellung über die bis ca. 1946 erschienenen Arbeiten wurde z. B. von *P. Hammarlund* [8]²⁾ angegeben. Aus den seither veröffentlichten zahlreichen, neuen Untersuchungen zitieren wir nur jene Literaturstellen, die im Rahmen dieser Arbeit besonders interessant sind.

Zur Ermittlung des Verlaufes bzw. der Eigenfrequenz der transitorischen wiederkehrenden Spannung wurden verschiedene Methoden vorgeschlagen, die hier kurz aufgezählt seien: Berechnung nach *Wanger* und *Brown* [4]; Berechnung nach *Hammarlund* [8]; Resonanzmethode nach *Fourmarier* und *Brown* [2]; Schalten während des Netzbetriebes nach *Kurth* [12, 17]; Schalten während des Netzbetriebes nach *Fourmarier* [15, 22]; Stromimpuls-Injektor [1, 3]; Netzmodelle [27, 30]; direkte Methode (Abschalten von Kurzschlüssen in Hochspannungsnetzen). Der direkten Methode ist un-

dingt der Vorzug zu geben, da sie als einzige alle Verhältnisse unverfälscht wiedergibt. Auf eine detaillierte Beschreibung und Kritik der genannten Methoden muss hier aus Raumgründen verzichtet werden.

Tabelle I gibt Auskunft über die veröffentlichten wichtigsten Berechnungs- und Messresultate. Zwei-fellos ist das von *P. Hammarlund* [8] und *Johansen* [24, 29] für schwedische Netze ermittelte Material sowohl qualitativ, als auch bezüglich des statistischen Umfangs an erster Stelle zu erwähnen. Wir werden auf diese Arbeiten ausführlich zurückkommen. So-dann haben England und Holland nennenswerte Beiträge geliefert [14, 16, 27]. Die in den USA z. B. für 6 verschiedene Netze und total ca. 9000 Schalter berechneten Steilheiten von wiederkehrenden Spannungen [6] verlieren leider an Wert, weil dort im Gegensatz zu den meisten anderen Publikationen keine Kurzschlussleistungen angegeben sind.

Ausser den in Tabelle I angegebenen Arbeiten gibt es noch zahlreiche kleinere Untersuchungen, z. T. auch Einzelangaben, worüber z. B. *P. Hammarlund* [8] näheres berichtet hat.

Leider fehlt bei allen vorhandenen Rechnungen und Messungen eine einheitliche Behandlung der massgebenden Grössen der wiederkehrenden Spannung. Vor allem ist festzuhalten, dass der Begriff der Steilheit des Spannungsanstieges, der ja erst in jüngster Zeit durch die «Commission Electrotechnique Internationale» (CEI) definiert wurde, von den verschiedenen Autoren mehr oder weniger will-

¹⁾ Gekürzte Fassung einer von der Denzler-Stiftung, im Jahr 1954, preisgekrönten Arbeit.

²⁾ siehe Literatur am Schluss der Arbeit.

Zusammenstellung von in verschiedenen Ländern berechneten und gemessenen Größen der in Anlagen und Netzen auftretenden wiederkehrenden Spannung

Tabelle I

Land	Netz	Betriebs -spannung kV	Totale Zahl der untersuchten Netzpunkte (Schalter)	Ermittelte Größen der wiederkehrenden Spannung			Ermittlungs- methode	Litera- tur
				Eigen- frequenz <i>f</i>	Steilheit des An- stieges <i>S</i>	Ampli- tuden- faktor <i>k</i>		
Schweden	Kungliga Vattenfallsstyrelsen; Krångede AB Stockholms Elverk; verschiedene Verteilnetze, 2 grosse Dampfkraftwerke Verschiedene schwedische Netze und Kurzschluss-Versuchslokal der ASEA Holländisches 50- und 110-kV-Netz	6...220 diverse 50 und 110	1001 156 72	Nein Ja zum Teil	Ja Ja Nein	Nein Ja Nein	Rechnung Injektor Rechnung und Injektor	[8] [24] [16]
England	Die wichtigsten britischen 66-kV-Netze	66	ca. 360	Nein	Ja	Nein	Rechnung	[14]
England	Britisches 132-kV-Netz, 3 Stationen	132	30	Nein	Ja	Ja	Netzmodell	[27]
Belgien	Réseau de l'Union des Centrales électriques du Hainaut	6...70	35	Ja	Nein	Nein	Fourmarier	[18]
Belgien	Réseau de l'Union des Centrales électriques du Hainaut	6 und 30	13	Ja	Nein	Ja	Direkt	[25]
Italien	Netz der Società Adriatica di Elettricità	10...147	19	Ja	Nein	Nein	Rechnung und Resonanzmethode	[19]
Schweiz	«Konstruierte» Fälle	diverse	diverse	Ja	Ja	Nein	Rechnung	[11,33]
USA	6 verschiedene amerikanische Netze	4...132	ca. 9000	Nein	Ja	Nein	Rechnung	[6]
USA	Verschiedene Netze	2,4...12,46	?	Nein	Ja	Ja	Netzmodell und Direkt	[30]
USA	Zukünftige Netze (im Jahre 1960)	138/230/330	ca. 90	Nein	Ja	Nein	Netzmodell	[37]

kürlich behandelt wurde. Dementsprechend sind auch die Umrechnungen zwischen Eigenfrequenzen und Steilheiten verschieden. Um die Amplitudensfaktoren haben sich viele Autoren überhaupt nicht gekümmert, während andere meistens nur Netzkonfigurationen ohne Verbraucher untersuchten [24, 27], wobei naturgemäß zu hohe Amplitudensfaktoren erhalten wurden. Meistens wurde der in der Regel stärkste Fall der erstlöschenden Phase eines 3poligen Kurzschlusses ohne (oder mit) Erdgeschluss behandelt.

I. Statistik, Wahrscheinlichkeit und Gesetzmässigkeit der Ausschalteleistungen, Steilheiten und Amplitudensfaktoren

Vorbemerkung

Wir lassen bei der Betrachtung der wiederkehrenden Spannung den Einfluss des Schalters (Lichtbogenspannung, vorzeitiges Nullwerden des Stromes, Restleitfähigkeit) stets beiseite, d. h. wir interessieren uns nur für die durch das Netz bedingte transitorische wiederkehrende Spannung, welche bei idealer Ausschaltung auftreten würde. Ferner halten wir uns bei den nachstehenden Untersuchungen an die durch die CEI [32] bzw. in den schweizerischen Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsschalter [34] festgelegten Begriffe und Definitionen, und betrachten übrigens die Steilheit *S* und den Amplitudensfaktor *k* als die notwendigen und hinreichenden charakteristischen Repräsentanten der wiederkehrenden Spannung.

1. Korrektur der von P. Hammarlund für schwedische Netze ermittelten Steilheiten und Amplitudensfaktoren

a) Die von P. Hammarlund verwendeten Berechnungsgrundlagen

P. Hammarlund [8] hat die Grosszahl seiner berechneten Werte nur unter Berücksichtigung der Induktivitäten und Kapazitäten, nicht aber der Dämpfungseinflüsse ermittelt. Ca. 90 % aller Werte entsprechen einem einfach-frequenten Verlauf der wiederkehrenden Spannung. Dabei wurde die Steilheit mittels der Geraden vom Nullpunkt zum ersten Spannungs-Scheitelwert ermittelt. Der Amplitudensfaktor beträgt in den einfach-frequenten Fällen *k* = 2, da keine Dämpfung berücksichtigt wurde. Als betriebsfrequente wiederkehrende Spannung wurde die 1,5fache Phasenspannung, entsprechend der erstlöschenden Phase, bei einem 3poligen Kurzschluss im isolierten Netz angenommen. Die restlichen ca. 10 % der berechneten Werte gehören zu mehrfrequenten Spannungsverläufen. Dabei ist die Steilheit nicht nach der CEI-Vorschrift, sondern mehr oder weniger willkürlich bestimmt worden. Doch liegen diese gefühlsmässig gezogenen Linien ziemlich nahe bei den «CEI-Linien», wie sich nachträglich feststellen lässt. Die Gesamtheit aller gegebenen Werte enthält alle praktisch in den Netzen vorkommenden, vor allem auch die stärksten Fälle.

b) Gemessene Amplitudensfaktoren

Dem Verfasser sind zwei Arbeiten bekannt, wo Amplitudensfaktoren gemessen wurden. Die eine betrifft Messungen mit einem Stromimpuls-Injektor

in schwedischen Netzen, durchgeführt von O. S. Johansen [24]. Leider sind dabei nur Kurzschluss-Stromkreise ohne Parallelleistung berücksichtigt worden, d. h. die Stromkreise bestanden nur aus den Energiequellen und den zwischen diesen und der Kurzschlußstelle vorhandenen Übertragungselementen (Transformatoren, Leitungen usw.), während alle Verbraucher ausgeschaltet waren. Zudem ist zu bemerken, dass die Methode des Stromimpuls-Injektors den dämpfenden Einfluss des Korona-Effektes und gewisse Sättigungseinflüsse nicht erfasst. Die zweite Arbeit besteht in Messungen an einem Netzmodell, durchgeführt von L. Gosland und J. S. Vosper [27]. Auch hier wurden die Modelle ohne Parallelleistung gebildet. Als Grundlage dienten Teile des englischen 132-kV-Netzes.

c) Korrektur der Amplitudenfaktoren und Steilheiten auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Basis

Wie unter 1b erwähnt, wurden die Amplitudenfaktoren bei abgeschalteter Parallelleistung ermittelt. In der Praxis ist aber bei Kurzschlüssen meistens Parallelleistung vorhanden. Diese wirkt dämpfend. H. Meyer [28] hat bereits auf diesen wichtigen Punkt hingewiesen. Fig. 1 zeigt eine Darstellung der Abhängigkeit der Amplitudenfaktoren von der Parallelleistung, bezogen auf einfachfrequente Spannungsverläufe.

Man sieht, dass die Amplitudenfaktoren bei den verschiedensten Netzspannungen und Betriebsfällen schon bei halber Nennlast ganz unbedeutend werden, und bei Vollast praktisch über-

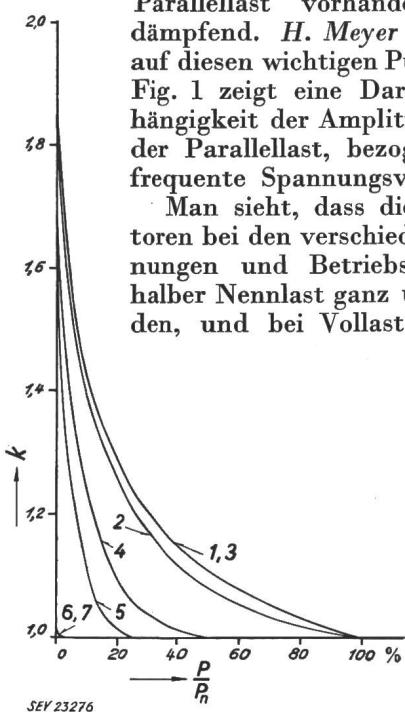


Fig. 1

Abhängigkeit des Amplitudenfaktors k vom Verhältnis der Netzbetriebsleistung P zur Netznennleistung P_n

Kurve	Netzspannung U_n kV	Netznennleistung P_n MVA	Kurzschlussleistung P_c MVA	Netzeigengenauigkeit f_0 Hz
1		1600	5400	
2	220		5000	400
3		800	2700	
4	110			650
5	60	440	1500	900
6		400	1350	3000
7	10	100	340	

haupt nicht grösser als 1 sind. Ferner ergibt sich, dass bei grösserer Netznennleistung, d. h. bei grösserer Kurzschlussleistung die Amplitudenfaktoren abnehmen (vgl. z. B. die Kurven der Fig. 2 und 3).

Um nun ein einigermassen zutreffendes Bild zu erhalten, stützen wir uns auf oszillographische Messungen, die bei Kurzschlussversuchen in Netzen unter betriebsmässigen Bedingungen durchgeführt wurden. In Tabelle II sind insgesamt 60 solche Versuche zusammengestellt. Diverse in dieser Tabelle enthaltene Daten findet man auch in der Literatur [10, 21, 23, 26, 35]. Die so gemessenen Amplitudenfaktoren sind in der Fig. 2 aufgezeichnet, und zwar in Fig. 2a in Funktion der Steilheit S , und in Fig. 2b in Funktion der Kurzschlussleistung P_c . Der mittlere Amplitudenfaktor hat den Wert 1,26. Eine besondere gesetzmässige Abhängigkeit kann weder von der Steilheit noch von der Leistung festgestellt werden, doch waren die Amplitudenfaktoren bei grosser Leistung stets klein. Anderseits wird der theoretische Höchstwert von $k = 2$ praktisch nie erreicht, so dass wir als oberste Grenze z. B. gemäss den Messungen von O. S. Johansen $k = 1,9$ annehmen, während der tiefste Wert mit 1,0 ebenfalls richtig eingeschätzt sein dürfte. Wir haben auf Grund der Tabelle II für die Amplitudenfaktoren eine Häufigkeitsverteilung gemäss Fig. 3, Kurve 1, mit einem häufigsten Wert von $k = 1,25$ angenommen. Zum Vergleich ist in Fig. 3 die Häufigkeitskurve 2 nach O. S. Johansen [24] eingesetzt. Aus der Verteilung der Amplitudenfaktoren (Kurve 1) wurde sodann die zugehörige Verteilung der Steilheiten (Kurve 3) berechnet. Der Maßstab der Ordinate h (Häufigkeitsmass) ist wie üblich so gewählt, dass die von jeder der Kurven 1, 2, 3 und der Abszisse eingeschlossene Fläche stets gleich 1 (= 100 % aller Fälle) ist.

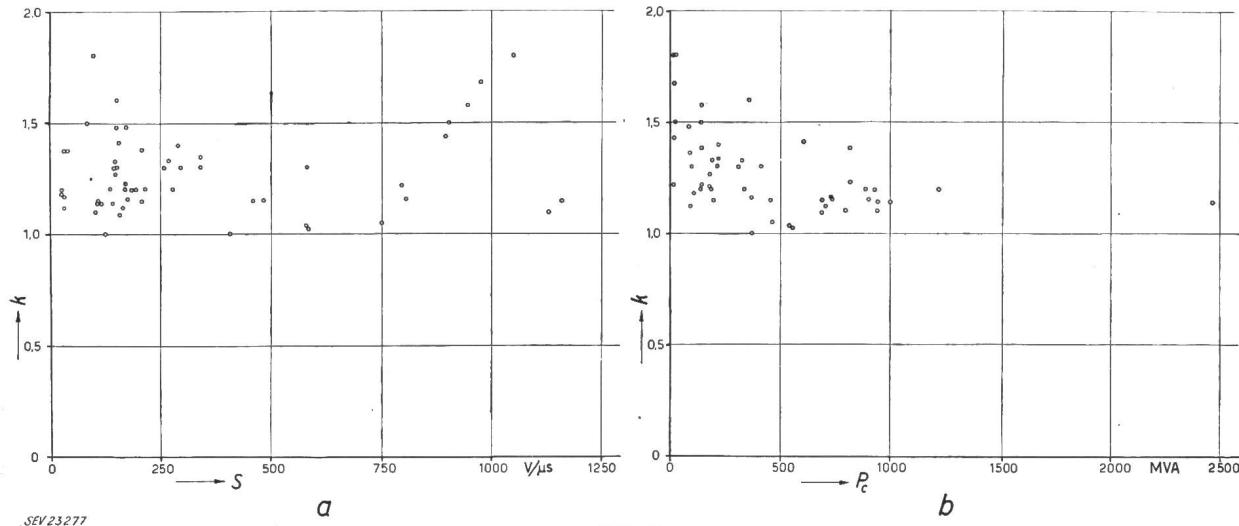
Die Korrektur der Steilheiten S kann somit auf Grund der Kurve 3 wie folgt durchgeführt werden. Wenn, wie z. B. im Buch von Hammarlund [8] oder in [29], die Kurzschlussleistungen und die zugehörigen Steilheiten für viele Schaltfälle graphisch dargestellt sind, kann man jedem Punkt (Schaltfall) ein mehrfaches, z. B. 20faches «Gewicht» beimessen. Damit ist an der Gesamtverteilung aller Steilheitswerte noch nichts geändert worden. Da aber alle diese S -Werte dem Amplitudenfaktor $k = 2$ entsprechen, statt Faktoren zwischen 1,0 und 1,9, können wir jetzt nach dem vorhergehenden die 20 Gewichte jedes S -Wertes gemäss der Häufigkeitskurve 3 der Fig. 3 verteilen. Statt der 20 Werte einer Steilheit S_1 stehen dann 20 andere Werte, deren Grössen zwischen $0,25 S_1$ und $0,95 S_1$ variieren, und deren häufigste Grösse bei $1,15 \times 0,5 S_1 = 0,575 S_1$ liegt.

d) Anwendung der Korrektur auf die schwedischen Werte; kumulative Kurven

Wir haben das soeben erklärte Korrekturverfahren auf alle im Buch von P. Hammarlund, S. 213 bis 219 (d. h. für die Nennspannungen 132 kV und kleiner) veröffentlichten Steilheiten angewandt. Für die Spannung 220 kV verwendeten wir eine neuere Publikation [29]. Am interessantesten ist nun der Vergleich der kumulativen Kurven; diese haben wir für jede Nennspannung, bezogen auf die korrigierten Werte, durch reine Auszählung ermittelt. Fig. 4 zeigt ein Beispiel hierfür, entsprechend der Betriebsspannung von 132 kV.

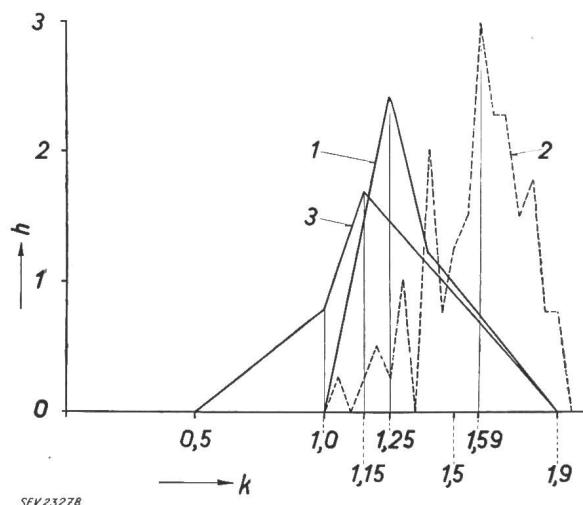
Dort sind die kumulativen Kurven sowohl für die grössten Steilheiten pro Netzpunkt, als auch für die grössten Kurzschlussleistungen pro Netzpunkt

in Fig. 5 eine Zusammenstellung aller korrigierten Kurven IIa, IIb für die Spannungen 220, 132, 77, 55, 44, 33, 20, 10, 6 kV.



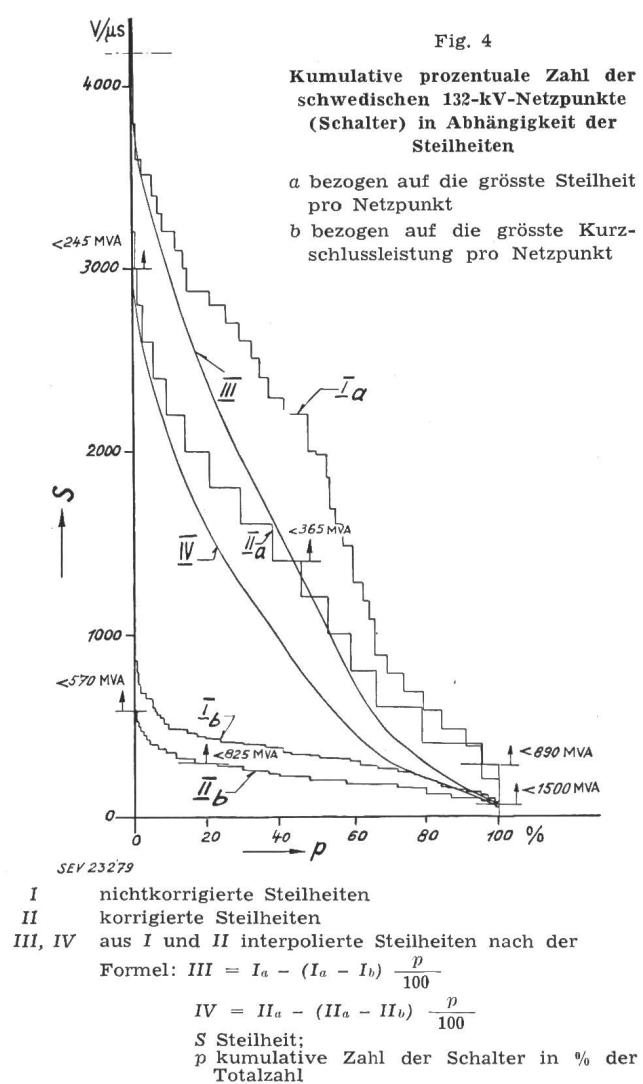
Bei Kurzschluss-Ausschaltungen in betriebsmässigen Netzen gemessene Amplitudenfaktoren k gemäss Tabelle II:
a in Abhängigkeit der Steilheit S der wiederkehrenden Spannung; b in Abhängigkeit der Kurzschlussleistung P_c

gegeben. Kurve Ia entspricht den grössten Steilheiten, und Kurve Ib den grössten Kurzschlussleistungen der Netzpunkte. Diese Kurven wurden aus dem Buch von P. Hammarlund [8] übernommen. IIa und IIb sind die entsprechenden nach unserem Korrekturverfahren erhaltenen Kurven. Die in den kumulativen Kurven enthaltenen Angaben über die Grenzen der Kurzschlussleistung («<... MVA») sind für die Kurven Ia und Ib eben-



Angenommene Häufigkeitsverteilung der Amplitudenfaktoren k und daraus abgeleitete Häufigkeitsverteilung der Steilheiten
1 Amplitudenfaktoren (angenommene Verteilung)
2 Verteilung der Amplitudenfaktoren nach Johansen [24]
3 Aus Kurve 1 abgeleitete Verteilung der Steilheiten

falls von P. Hammarlund übernommen worden. Bei den korrigierten Kurven IIa und IIb wurden diese Leistungsgrenzen im Sinne unseres Verfahrens neu bestimmt, was praktisch darauf herausläuft, diese Zeichen bei um 5 % kleineren Steilheiten (gegenüber den Originalwerten) hinzusetzen. Auf die Linien III und IV kommen wir später zu sprechen. Wir geben



I nichtkorrigierte Steilheiten
II korrigierte Steilheiten
III, IV aus I und II interpolierte Steilheiten nach der Formel: $III = I_a - (I_a - I_b) \frac{p}{100}$
IV = $II_a - (II_a - II_b) \frac{p}{100}$
S Steilheit;
p kumulative Zahl der Schalter in % der Totalzahl

Die Pfeile mit der Angabe «<... MVA» bedeuten die grössten bei den betreffenden Steilheiten vorkommenden Kurzschlussleistungen, in dem Sinne, dass bei allen grösseren Steilheiten die Leistungen kleiner sind.

*Einphasige, in Hochspannungsnetzen durchgeführte Kurzschlussausschaltungen.
Gemessene Eigenfrequenzen, Amplitudenfaktoren und Steilheiten*

(Versuche Brown Boveri mit Druckluftschaltern)

Tabelle II

Messart	Effektive Spannung über den Schalterpol kV	Effektiver Kurzschlussstrom kV	Einphasige Kurzschluss-Leistung MVA	Betriebsfrequenz f_B Hz	Eigenfrequenz f Hz	Amplitudenfaktor k	Steilheit V/ μ s	Spannung über den Schalter-Pol angelegt zwischen des speisenden Netzes
Grand Coulee (USA)	141,5	0,980	138,7	60	1500	1,50	902	einer Phase und Erde
	141,0	0,980	138,3	60	1500	1,58	945	
	138,2	6,80	940	60	240	1,14	107	
	138,2	6,80	940	60	240	1,10	103	
	136,4	6,60	900	60	240	1,15	107	
	136,5	18,40	2516,7	60	320	<1	<124	
	136,5	19,10	2616,7	60	320	1,0	124	
	136,8	18,90	2586,7	60	320	<1	<124	
	137,0	18,00	2466,7	60	320	1,14	142	
	134	1,56	209	50	600	1,3	297	
Fontenay (Frankreich)	136	1,56	212	50	680	1,3	340	einer Phase und Erde
	137	1,56	214	50	650	1,35	340	
	121	7,30	885	50	410	1,2	168	
	144	0,68	98	50	285	1,3	151	
	144	0,68	98	50	300	1,3	147	
	125	3,68	460	50	2030	1,05	750	
	125	2,94	367	50	1960	1,16	805	
	125	2,94	367	50	860	1,0	304	
	144	8,50	1220	50	440	1,2	214	
	124	7,5	929	50	460	1,2	194	
	250	0,88	220	50	290	1,4	287	
	240	1,63	407	50	660	1,3	584	
	135	1,42	192	50	470	1,15	206	
	129	3,53	456	50	1040	1,15	460	
	132	5,20	686	50	270	*1,15	115	
	234	1,43	335	50	350	1,20	278	
	228	3,46	790	50	1600	1,1	1130	
	233	4,30	1000	50	630	1,15	478	
	134	1,41	189	50	300	1,33	144	
	134	1,35	181	50	300	1,2	136	
	136	1,28	174	50	300	1,27	147	
	136	1,30	177	50	400	1,2	184	
Dixence-Chandoline (Schweiz)	133	4,05	540	50	1500	1,03	580	einer Phase und Erde
	135	4,08	551	50	1500	1,02	585	
	131	5,35	701	50	400	1,12	166	
	133	5,50	732	50	400	1,16	175	
	127	5,40	686	50	400	1,09	157	
	238	1,35	321	50	300	1,33	268	
	234	1,32	309	50	300	1,30	257	
	238	3,09	735	50	1500	1,15	1160	
	60,5	0,372	22,4	50	320	1,50	82	
	60,5	0,372	22,4	50	320	1,80	99	
Villejuif (Frankreich)	60,5	0,275	16,7	50	3400	1,66	970	einer Phase und Erde
	60,5	0,332	20,0	50	3400	1,80	1050	
	71,5	1,090	78	50	500	1,48	149	
	74,2	1,100	82	50	550	1,48	171	
Pasing-München	61,9	0,247	15,0	50	3600	1,44	895	einer Phase und Erde
	63,2	0,252	16,0	50	3650	1,22	795	
	59,0	6,0	354	50	560	1,60	149	
	59,0	10,3	607	50	665	1,41	154	
Wie zu erwarten war, liegen die kumulativen Kurven der korrigierten Steilheiten wesentlich tiefer als die Originalkurven. Sie kommen der Wirklichkeit viel näher.	59,0	13,8	815	50	900	1,38	207	zwei Phasen
	59,0	13,8	815	50	830	1,23	170	
	16,8	5,3	89,0	16 $\frac{2}{3}$	577	1,12	31	
	16,7	5,14	86,0	16 $\frac{2}{3}$	572	1,38	37	
In Fig. 6 ist für das schwedische 132-kV-Netz die Hüllkurve H der nicht korrigierten, und die Hüllkurve H_1 der korrigierten Hammarlundschen P-S-Gesamtheiten dargestellt. Die Kurve G ist so	16,9	7,98	135	16 $\frac{2}{3}$	454	1,20	26	einer Phase und Erde
	15,1	6,94	104	16 $\frac{2}{3}$	506	1,18	25,5	
	16,1	8,46	139	16 $\frac{2}{3}$	480	1,38	30,0	
	16,3	8,7	142	16 $\frac{2}{3}$	536	1,22	30,0	

Wie zu erwarten war, liegen die kumulativen Kurven der korrigierten Steilheiten wesentlich tiefer als die Originalkurven. Sie kommen der Wirklichkeit viel näher.

In Fig. 6 ist für das schwedische 132-kV-Netz die Hüllkurve H der nicht korrigierten, und die Hüllkurve H_1 der korrigierten Hammarlundschen P-S-Gesamtheiten dargestellt. Die Kurve G ist so

gezogen, dass 90 % aller korrigierten Steilheiten (bei jeder Kurzschlussleistung) kleiner sind, während die restlichen 10 % zwischen G und H_1 liegen. Diese Darstellung gibt ein Bild über die Seltenheit der grossen Steilheiten.

ten näher bei a und bei grossen p -Werten näher bei b . Diese Kurve hätte somit ungefähr den Verlauf der Kurve III bzw. IV der Fig. 4, wobei die beiden letzteren Linien wie folgt durch Interpolation zwischen a und b erhalten wurden:

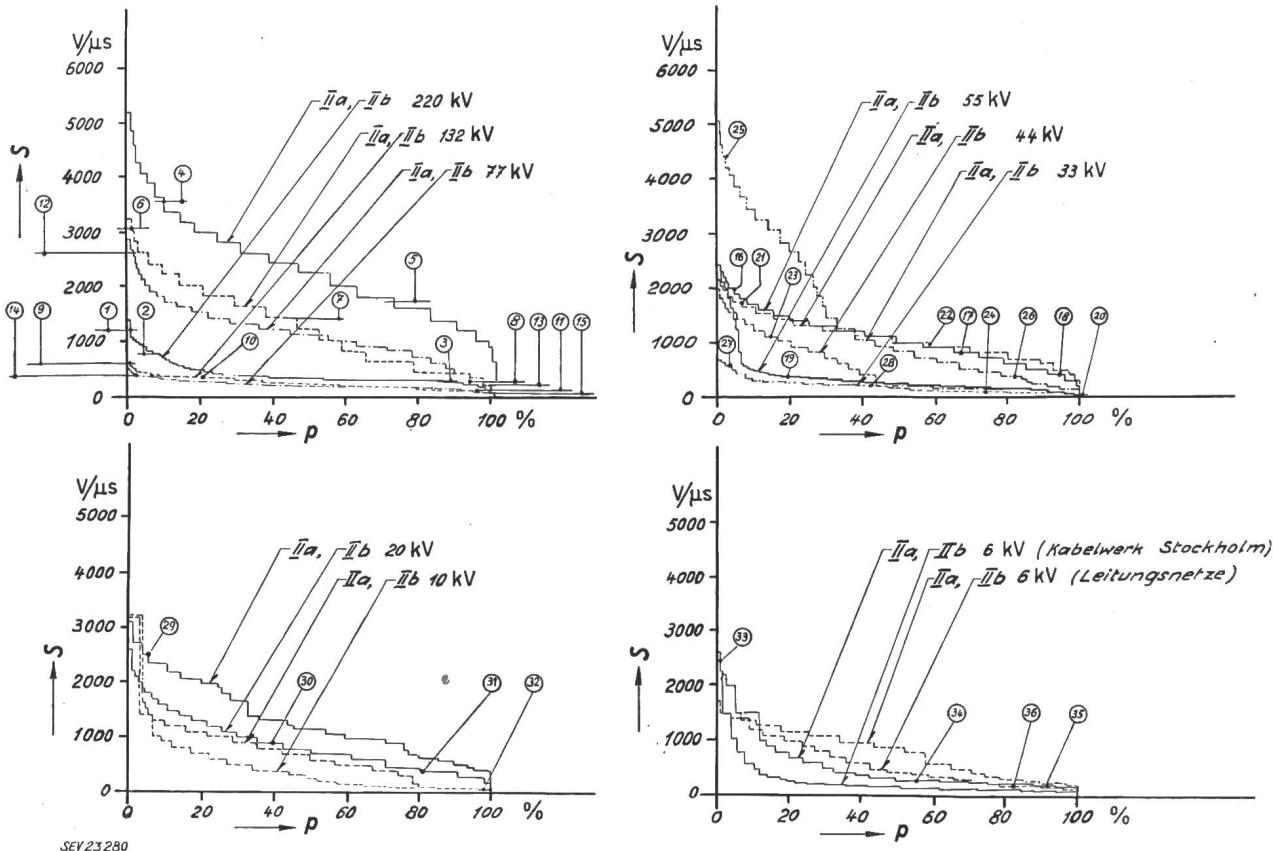


Fig. 5
Zusammenstellung aller korrigierten kumulativen Kurven IIa und IIb für schwedische Netze

Betriebsspannungen:

220 kV, 132 kV, 77 kV, 55 kV, 44 kV, 33 kV, 20 kV, 10 kV, 6 kV (Kabelwerke Stockholm), 6 kV (Leitungsnetze)
 II_a korrigierte grössten Steilheiten pro Netzpunkt
 II_b korrigierte Steilheiten bezogen auf die grösste Kurzschlussleistung pro Netzpunkt
 Die in Kreisen angegebenen Zahlen 1...36 entsprechen folgenden Leistungen:

Zahl	Leistung MVA	Zahl	Leistung MVA	Zahl	Leistung MVA
1	≤ 610	14	≤ 1550	27	≤ 360
2	≤ 675	15	≤ 1625	28	≤ 615
3	≤ 2100	16	≤ 225	29	≤ 115
4	≤ 3000	17	≤ 225	30	≤ 175
5	≤ 3600	18	≤ 335	31	≤ 195
6	≤ 245	19	≤ 335	32	≤ 450
7	≤ 365	20	≤ 410	33	≤ 275
8	≤ 890	21	≤ 285	34	≤ 340
9	≤ 570	22	≤ 410	35	≤ 420
10	≤ 825	23	≤ 330	36	≤ 100
11	≤ 1500	24	≤ 410		
12	≤ 320	25	≤ 140		
13	≤ 550	26	≤ 160		

Dabei handelt es sich jeweils um die grösste, bei der zugehörigen (aus den Kurven ersichtlichen) Steilheit vorkommende Kurzschlussleistung, derart, dass bei grösseren Steilheiten die Leistung kleiner ist

Die bisher betrachteten kumulativen Kurven beziehen sich entweder auf alle grössten Steilheiten, oder aber auf alle grössten Kurzschlussleistungen der Netzpunkte. Eine kumulative Kurve, die alle Fälle der betrachteten Netzpunkte erfasst, müsste naheliegenderweise bei $p = 0\%$ mit der kumulativen Kurve a der «grössten Steilheit», und bei $p = 100\%$ mit der kumulativen Kurve b der «grössten Leistung» übereinstimmen. Für alle übrigen p -Werte muss sie irgendwie zwischen den Kurven a und b liegen und zwar bei kleinen p -Wer-

$$III = I_a - (I_a - I_b) \frac{p}{100} \text{ (nicht korrigierte Werte)}$$

$$IV = II_a - (II_a - II_b) \frac{p}{100} \text{ (korrigierte Werte)}$$

Kurve IV dürfte somit in ganz grober Näherung die kumulative Darstellung der Steilheiten aller überhaupt vorkommenden, d. h. auch jener Fälle sein, die weder «grösste Steilheit» noch «grösste Leistung» repräsentieren (je bei der betreffenden

Nennspannung). Die Kurven IV sind in den Fig. 8a...k für alle oben genannten Betriebsspannungen zusammengestellt und mit amerikanischen Kurven verglichen, worauf wir noch zurückkommen werden.

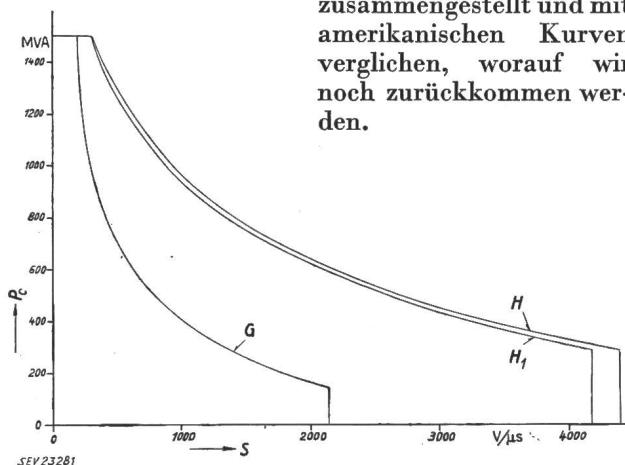


Fig. 6
Berechnete Steilheiten S und zugehörige Kurzschlussleistungen P_c für das schwedische 132-kV-Netz:

- H Hüllkurve nach P. Hammarlund
- H_1 Hüllkurve der um 5 % reduzierten grössten Steilheiten, bzw. der korrigierten Steilheiten
- G Grenzkurve, die bei jeder Kurzschlussleistung 90 % aller Fälle majorisiert; d. h. 90 % aller Steilheiten liegen je bei gleicher Kurzschlussleistung «links» von G, während die restlichen 10 % zwischen G und H_1 liegen

2. Gesetzmässigkeit zwischen Kurzschlussleistung und Steilheit an einem Netzpunkt

In den schweizerischen Schalterregeln [34] ist neben den Eigenfrequenzen, die zu den grössten Abschaltleistungen gehören, eine zweite Reihe von 5mal grösseren Frequenzen angegeben, welche von den Schaltern bei halber Ausschaltleistung noch bewältigt werden sollen. Dem Verfasser war es möglich, in den Besitz der Zuordnungen der Wertepaare «grösste Steilheit (S_2) und zugehörige Leistung (P_2)» und «grösste Leistung (P_1) und zugehörige Steilheit (S_1)» pro Netzpunkt zu gelangen (Berechnungen von P. Hammarlund und O. S. Johansen für schwedische Netze), und daher diese Frage besonders zu studieren. Durch die genannten 2 Wertepaare pro Netzpunkt wurde eine Exponentialfunktion

$$P = \alpha_\nu e^{-\beta_\nu S}$$

bestimmt, wobei die Konstanten α_ν und β_ν folgende Werte erhalten:

$$\alpha_\nu = P_{1\nu} \left(\frac{P_{1\nu}}{P_{2\nu}} \right)^{\frac{S_1}{S_2 - S_1}}$$

$$\beta_\nu = \frac{\ln(P_{1\nu}/P_{2\nu})}{S_2 - S_1}$$

Mit Hilfe dieser Rechnung kann man für jeden Netzpunkt angenähert jene Steilheit S^* berechnen, welche der Hälfte der im betreffenden Netzpunkt möglichen grössten Kurzschlussleistung entspricht. Der Verfasser hat diese Rechnung für insgesamt über 400 Netzpunkte durchgeführt, und die Verhältnisse

$$\varrho = \frac{S^*}{S_1}$$

gebildet. Statt aller ermittelten ϱ -Werte geben wir

aus Gründen der Raumeinsparung in Fig. 7 für jede Betriebsspannung nur die Hüllkurven K_ϱ der ϱ -Werte, in Abhängigkeit der grössten Leistungen P_1 an.

Wie die Fig. 7 zeigt, ist bei der Spannung 6 kV keine besondere Abhängigkeit des Faktors von der Leistung P_1 zu finden, während bei den anderen, besonders bei den grössten Spannungen (77 bis 220 kV) der Faktor mit wachsendem P_1 abnimmt. Vor allem ist es interessant, festzustellen, dass hier bei den grössten Leistungen P_1 das Verhältnis ϱ stets ungefähr gleich 5 ist. Dies stimmt z. B. auch mit den schweizerischen Schalterregeln überein, welche bei der halben Nennausschaltleistung eine 5mal grössere Eigenfrequenz vorsehen, als bei voller Leistung [34]. O. S. Johansen schlug demgegenüber den Faktor 4 vor [24].

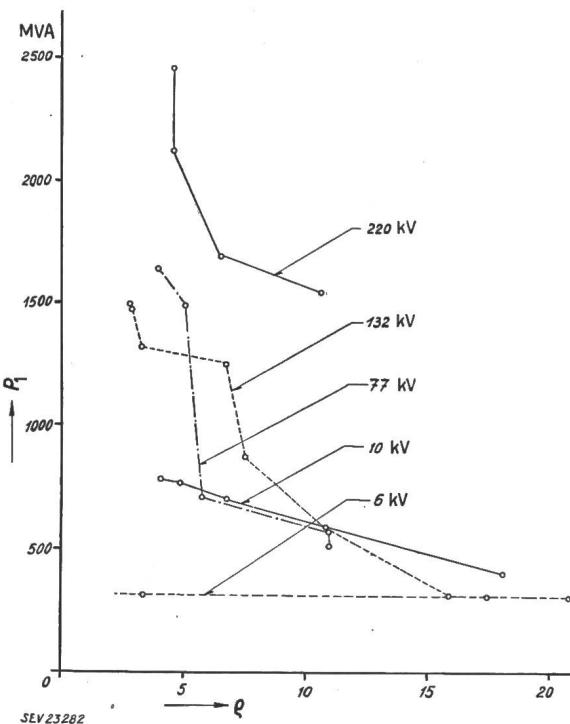


Fig. 7
Verhältnis ϱ der Steilheit S^* bei halber Maximalleistung zur Steilheit S_1 bei maximaler Leistung (pro Netzpunkt), in Abhängigkeit der maximalen Leistung P_1 , nach dem Exponentialansatz berechnet

Zusammenstellung der oberen Grenzkurven K_ϱ der ϱ -Werte, entsprechend den Betriebsspannungen 220, 132, 77, 10 und 6 kV

3. Untersuchungen an amerikanischen und anderen Netzen

a) Netze in den USA

Hier ist vor allem die Publikation von H. P. St. Clair und J. A. Adams [6] zu erwähnen, welche Berechnungen von Steilheiten in 6 verschiedenen Netzen, mit Nennspannungen von 120...132 kV, 69 kV, 11 kV und 4,8 kV enthält, wobei die Steilheiten für beinahe 9000 Schalter (Netzpunkte) berechnet wurden. Bei diesen Rechnungen war eine einheitliche Dämpfung des Amplitudenfaktors im Verhältnis 1,85 : 2 angenommen.

Anderseits sind die Steilheiten an Hand der Enveloppen der wiederkehrenden Spannungen, d. h. als Tangenten vom Nullpunkt an die Spannungskurven ausgewertet worden, und somit mindestens

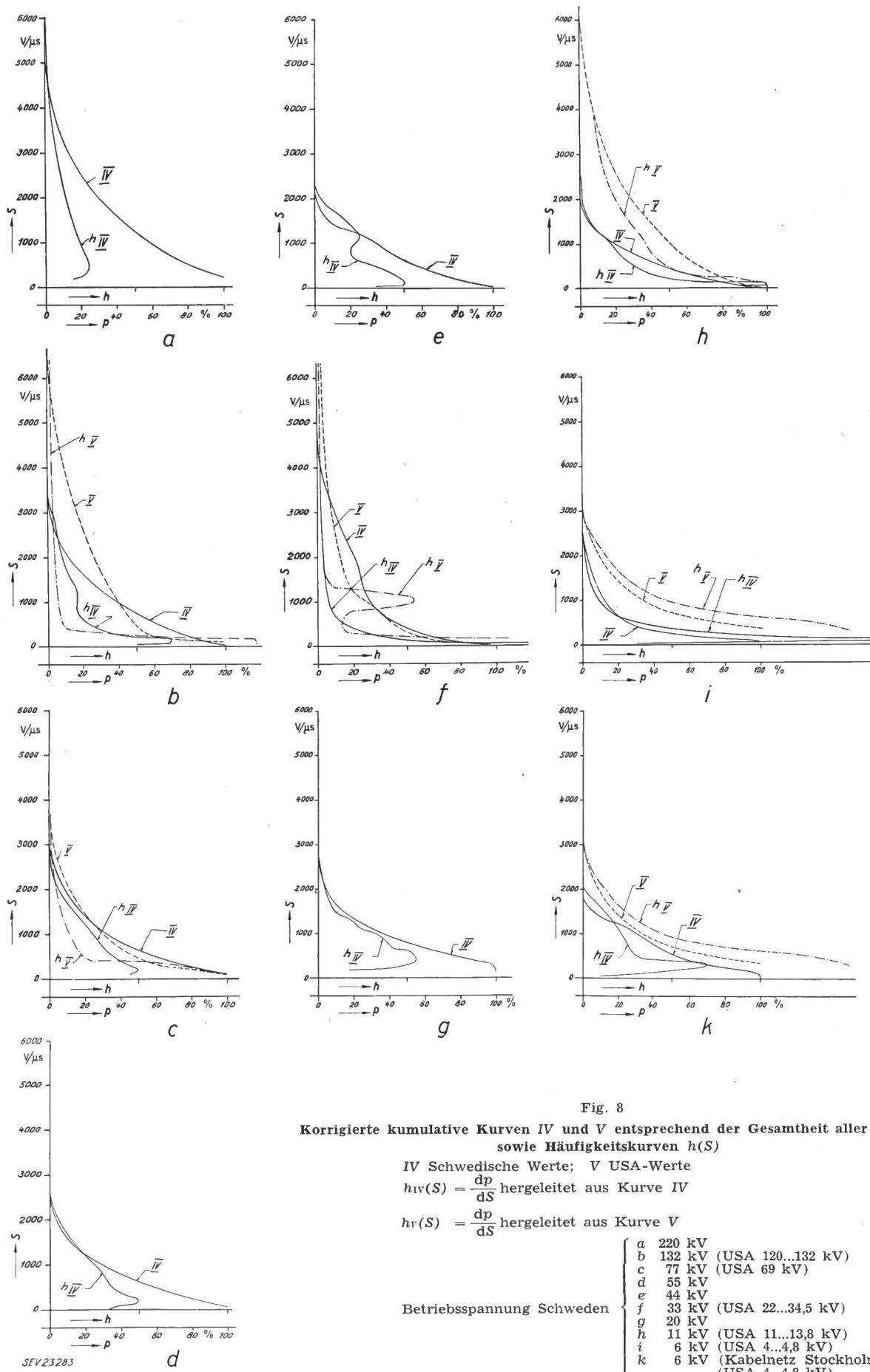


Fig. 8
Korrigierte kumulative Kurven IV und V entsprechend der Gesamtheit aller Fälle,
sowie Häufigkeitskurven $h(S)$

IV Schwedische Werte; V USA-Werte
 $h_{IV}(S) = \frac{dp}{dS}$ hergeleitet aus Kurve IV

$h_V(S) = \frac{dp}{dS}$ hergeleitet aus Kurve V

Betriebsspannung Schweden

- | |
|--|
| a 220 kV
b 132 kV (USA 120...132 kV)
c 77 kV (USA 69 kV)
d 55 kV
e 44 kV
f 33 kV (USA 22...34,5 kV)
g 20 kV
h 11 kV (USA 11...13,8 kV)
i 6 kV (USA 4...4,8 kV)
k 6 kV (Kabelnetz Stockholm)
(USA 4...4,8 kV) |
|--|

10 % strenger als nach der CEI-Definition der Steilheit. Kurzschlussleistungen sind nicht angegeben. Die Steilheiten sind für die erstlöschende Phase von 3poligen isolierten Kurzschlüssen berechnet worden. Die Publikation enthält sodann kumulative Kurven je für die Nennspannungen 120...132 kV, 69 kV, 22...34,5 kV, 11...13,8 kV, 4...4,8 kV, wobei ähnlich den schwedischen kumulativen Kurven die prozentuale Zahl der Schalter in Funktion der Steilheit dargestellt ist. Jedoch sind die amerikanischen Kurven nicht nach «grösster Steilheit» und «größter Leistung» gegliedert, sondern umfassen alle betrachteten Fälle, und entsprechen somit im Prinzip ungefähr unseren Kurven III in Fig. 4. Statt aber die nicht korrigierten schwedischen Kurven III mit den ebenfalls nicht «korrigierten» amerikanischen Kurven zu vergleichen, nehmen wir zunächst an den amerikanischen Darstellungen eine Korrektur vor, indem wir sie im Verhältnis der schwedischen Kurven IV zu III reduzieren, wobei die folgenden Nennspannungen als einander entsprechend angenommen wurden:

Schweden	USA
132 kV	120...132 kV
77 kV	69 kV
33 kV	22... 34,5 kV
10 kV	11... 13,8 kV
6 kV	4... 4,8 kV

Die Abbildungen 8a...k zeigen einerseits die schwedischen kumulativen Kurven IV und anderseits die amerikanischen Kurven V (korrigierte Werte).

Im grossen ganzen weichen die amerikanischen Kurven nicht allzusehr von den schwedischen ab, und man darf die Übereinstimmung als relativ gut bezeichnen. Dass die grössten amerikanischen Steilheiten (bei $p = 0\%$) wesentlich höher liegen als die schwedischen, kommt von der viel strengeren Auswertung her, insbesondere bei Vorhandensein mehrerer Frequenzen, wo einfach die steilste Tangente ausgewertet wurde.

Alle Kurven haben nach unten konvexe Form. Bildet man aus den vorhandenen Kurven IV bzw. V

$$h(S) = \frac{dp}{dS},$$

so stellt h die Häufigkeit der Fälle in Funktion der Steilheit dar. Diese Häufigkeitskurven $h(S)$ sind in den Fig. 8a...k ebenfalls in einheitlichem Maßstab eingezeichnet. Wie man sieht, gibt es bei allen Nennspannungen bei den kleinsten Steilheiten ein ausgeprägtes Maximum der Häufigkeiten, was bedeutet, dass die kleinsten Steilheiten stets weitaus am häufigsten sind, während Fälle grösserer Steilheit immer seltener werden.

Wenn auch in der erwähnten amerikanischen Veröffentlichung [6] nichts über die Kurzschlussleistung erwähnt wird, so ist doch naheliegend, dass die grössten Kurzschlussleistungen ähnlich den schwedischen Verhältnissen, den kleineren Steilheiten zugeordnet sind.

In einer neueren Publikation [37] sind grösste Steilheiten bei verhältnismässig grossen Kurz-

schlussleistungen angegeben worden, welche die Hammarlundschen ($P-S$)-Bereiche wesentlich überschreiten. Es handelt sich um an einem Netzmodell gemessene Werte, wie sie für das Jahr 1960 in den USA vorausgesehen werden.

b) Netze in andern Ländern

Wie in Tabelle I angegeben, liegen noch Eigenfrequenzuntersuchungen für Netze in Holland, Belgien und Italien vor. Daneben gibt es noch weitere Angaben über zahlreiche Einzelfälle. Wir verzichten aber, näher darauf einzutreten, da der statistische Umfang zu klein ist, und keine besonders extreme Fälle darunter sind. Besonderes Gewicht haben die in Tabelle II zusammengestellten Kurzschlussleistungen und Steilheiten, weil es sich hier um in Hochspannungsnetzen durch wirkliche Kurzschlüsse erhaltene Werte handelt. Dabei liegen namentlich die Steilheiten weit unterhalb den entsprechenden Hammarlundschen Höchstwerten.

4. Zusammenfassung der im I. Teil erhaltenen Resultate

a) Auf Grund einer der Wirklichkeit nahe kommenden Annahme über die Grössen-Verteilung der Amplitudenfaktoren wurden alle Hammarlundschen Steilheitswerte korrigiert. Daraus ergab sich eine «Senkung» der kumulativen Kurven (prozentuale Zahl der Schalter bezogen auf die Steilheiten) um durchschnittlich 40 %.

b) Aus den kumulativen Kurven «grösste Steilheit» einerseits und «grösste Leistung» anderseits konnte für jede Betriebsspannung eine kumulative Näherungskurve konstruiert werden, die praktisch allen vorkommenden Fällen entspricht. Der Vergleich dieser Kurven mit analogen amerikanischen Kurven zeigt eine verhältnismässig gute Übereinstimmung. Aus den genannten Kurven lassen sich Steilheits-Häufigkeiten herleiten, wobei sich eindeutig feststellen lässt, dass die kleinsten Steilheiten weitaus am häufigsten und grosse Steilheiten selten sind.

c) Die aus den Hammarlundschen Angaben resultierenden Eigenfrequenzen bei grösster Kurzschlussleistung stimmen mit den schweizerischen Schalterregeln relativ gut überein.

d) Bei jeder Leistung liegen 90 % aller Steilheiten weit unterhalb (ca. 40...60 %) der grösstvorkommenden Steilheit.

e) In Netzenpunkten maximaler Kurzschlussleistungen P_1 mit zugehöriger Steilheit S_1 beträgt die der halben Leistung ($0,5 P_1$) entsprechende Steilheit S^* ca. 5. S_1 , was z. B. mit den schweizerischen Schalterregeln übereinstimmt.

f) Die in bestehenden Netzen vorkommenden Leistungs-Steilheits-Wertepaare liegen hinsichtlich der Steilheit innerhalb der Hammarlundschen Grenzkurven. Durch den stets fortschreitenden Ausbau der Hochspannungsnetze werden aber die Kurzschlussleistungen grösser, während die Steilheiten mehr oder weniger gleich bleiben. Aus diesem Grunde hat es einen Sinn, für die Schalternennleistung eine einzige Eigenfrequenz vorzuschreiben, unabhängig von der Grösse der Nennleistung.

II. Qualitative Betrachtungen; Die Fälle grosser Steilheiten

Die Seltenheit der grossen Steilheiten gegenüber der grossen Häufigkeit kleiner Steilheiten lässt eine besondere Behandlung der grossen Steilheiten als wünschenswert erscheinen. Es gibt einige wenige Fälle, wo unter Umständen grosse Steilheiten bei grosser Kurzschlussleistung auftreten können, nämlich: Schalter und Kurzschluss auf der Sekundärseite eines Transformators, welcher primärseitig von einem starken Netz gespeist wird; Schalter und Kurzschluss nach einer Kurzschluss-Drosselspule; letztlöscher Schalter bei Kurzschluss in einem Kraftwerk. Wir betrachten hier den ersten und den letzten Fall näher.

1. Schalter auf der Sekundärseite eines Transformators, welcher primärseitig von einem Netz gespeist wird

Die wiederkehrende Spannung weist zwei Eigenfrequenzen auf, nämlich eine meistens kleinere durch das speisende Netz bedingte, und eine grössere durch den Transformator gegebene. Die Amplituden dieser beiden Frequenzen stehen zu den Kurzschlussimpedanzen des speisenden Netzes und des Transformators (unter Vernachlässigung dämpfender Einflüsse) in einfacher Beziehung:

$$\frac{A_T}{A_{total}} = \frac{Z_{total} - Z_n}{Z_{total}}$$

$$\frac{A_n}{A_{total}} = \frac{Z_{total} - Z_T}{Z_{total}}$$

Dabei bedeuten:

A_{total}	Totalamplitude = 100 %
A_T	Amplitude der höheren Eigenfrequenz
A_n	Amplitude der kleineren Eigenfrequenz
Z_{total}	auf die Sekundärseite bezogene Totalimpedanz pro Phase
Z_T	auf die Sekundärseite bezogene Transformatorimpedanz pro Phase
Z_n	auf die Sekundärseite bezogene Netzimpedanz pro Phase
$Z_T + Z_n = Z_{total}$	

In Fig. 9 ist der Fall eines Transformators 150/50 kV dargestellt.

Die Einspeisung erfolgt durch das Netz auf der 150-kV-Seite, und der Kurzschluss ist auf der 50-kV-Seite als nach dem Schalter auftretend angenommen. Der Transformator wurde wahlweise mit Nennleistung von $P_T = 20, 100, 300$ MVA angenommen, wobei die Kurzschlussleistung des speisenden Netzes (auf der Primärseite des Transformators) jeweils zu $Q_n = 500, 1500$ und 6000 MVA eingesetzt wurde. Die Kapazität C_A auf der speisenden Seite wurde variiert. Fig. 9 zeigt die Transformatoreigenfrequenz f_T und deren Amplituden A_T , in Abhängigkeit der Transformator-Nennleistung. Die Berechnung von f_T und A_T erfolgte nach der Methode von W. Wanger [4]. Man sieht, dass allgemein bei kleiner Transformator-Nennleistung (P_T) die höhere Frequenz f_T relativ klein, dafür die zugehörige Amplitude A_T gross ist, während es sich bei grosser Transformatorleistung umgekehrt verhält. Da die Kurzschlussleistung bei kleiner Transformator-Nennleistung an sich nicht gross sein kann, ist dieser Fall relativ harmlos. Bei grösserer Transformator-Nennleistung P_T mit grosser Frequenz f_T , jedoch kleiner Amplitude A_T kann man nicht ohne weiteres sagen, ob der Fall streng ist, da man wohl nicht weiß, wie das Ausschaltvermögen des Schalters von der Grösse dieser Amplitude abhängt, und dies übrigens je nach der Schalterbauart verschieden sein kann. Mit zunehmender Netzkurzschlussleistung Q_n nehmen die Amplituden A_T zu, und man sieht leicht ein, dass der strengste Fall, d. h. grosse Frequenz f_T und grosse Amplitude A_T dann eintritt, wenn ein Transformator mit grosser Nennleistung in einem Netz mit grosser Kurzschlussleistung vorliegt. Dann ist

auch die sekundärseitige Kurzschlussleistung Q_T gross. Jedoch ist die Amplitude $A_T \ll 100\%$ der Totalamplitude. Je grösser aber die Transformator-

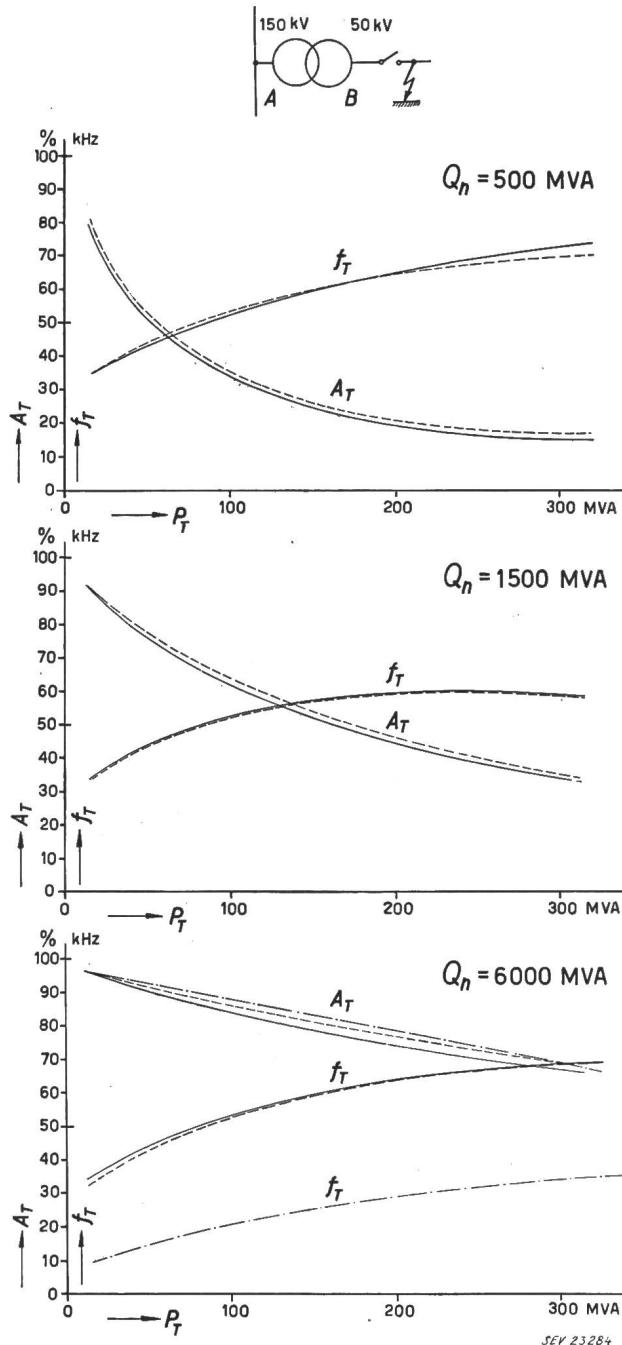


Fig. 9

Kurzschluss auf der Sekundärseite eines Transformators 150/50 kV, welcher primärseitig an ein Netz angeschlossen ist. Frequenz f_T und Amplitude A_T des nur durch den Transformator bedingten Teiles der wiederkehrenden Spannung, in Abhängigkeit der Transformator-Nennleistung. Kapazität der Primärseite, sowie Netz-Kurzschlussleistung Q_n vor dem Transformator als Parameter.

Q_n	Netz-Kurzschlussleistung vor dem Transformator
P_T	Nennleistung des Transformators
C_A	Netz-Kapazität entsprechend erstlöschender Phase
f_T	durch den Transformator bedingte Eigenfrequenz
A_T	Amplitude von f_T in Prozenten der Totalamplitude
$C_A = 6 \cdot 10^{-8} F$	
$C_A = 160 \cdot 10^{-8} F$	
$C_A = 160 \cdot 10^{-8} F + 600 m$ Leitung sekundärseitig (oder 20 m Kabel)	

leistung ist, desto eher hat es sekundärseitig mehr als eine abgehende Leitung, so dass bei der Unterbrechung eines in einer Leitung bestehenden Kurz-

schlusses wegen der angeschlossenen Parallelleitungen kleinere Eigenfrequenzen zu erwarten sind.

Da in den meisten Netzen die Tendenz zum weiteren Ausbau, und somit zu grösseren Netzkurzschlussleistungen und auch zu grösseren Nennleistungen der Transformatoren besteht, ist in einzelnen Fällen auch mit einer Verschärfung der Eigenfrequenzbedingungen (sofern nicht gleichzeitig die vermaschte sekundäre Netzkurzschlussleistung und damit die Schalternennleistung ebenfalls steigt) zu rechnen. Als Gegenmassnahme kommt z. B. eine Vergrösserung der Kapazität auf der Sekundärseite des Transformators in Frage, z. B. durch Anordnung eines möglichst langen Leitungs- oder Kabelstückes, sowie Strom- und Spannungswandlern usw. zwischen Transformator und Schalter. Die höhere d. h. durch den Transformator bedingte Eigenfrequenz nimmt ungefähr mit der Quadratwurzel der sekundärseitig zunehmenden Kapazität ab. Um diese Frequenz f_T z. B. auf die Hälfte ihres Maximalwertes zu reduzieren, wären (bei grosser Netzkurzschlussleistung von 6000 MVA) zwischen Transformator und Schalter ungefähr 600 m Leitung oder 20 m Kabel nötig.

Der Schaltfall (150/50 kV) könnte grundsätzlich umgangen werden, wenn ein primärseitiger Schalter (150 kV) den sekundärseitigen Kurzschluss (50 kV) unterbricht. Doch wäre dies eine Notlösung und praktisch nur dann durchführbar, wenn sekundärseitig nur eine abgehende Leitung vorhanden ist, während aber gerade bei Transformatoren grosser Leistung in der Regel mehrere abgehende Leitungen angeschlossen sind.

2. Die ganze Kurzschlussleistung eines grossen Kraftwerkes muss durch einen einzigen Schalter unterbrochen werden

In der Regel liegen Kraftwerke in vermaschten Netzen. Die grösste Kurzschlussleistung wird nur zum Teil durch das betreffende Kraftwerk geliefert, während der restliche meist grössere Teil von entfernter liegenden Energiequellen hinzufliest. Daraus folgt, dass bei grösster Kurzschlussleistung kleine Eigenfrequenzen vorhanden sind. Ein typisches Beispiel hiefür ist das Kraftwerk Grand Coulee Dam (siehe Tabelle II) [9, 13], trotzdem in diesem Werk schon eine ausserordentlich grosse Erzeugerleistung konzentriert ist.

Ist ein Werk nicht mit anderen Kraftwerken vermascht und gehen von ihm aus nur Leitungen zu Verbrauchern, so ist die Zahl der abgehenden Leitungen im allgemeinen um so grösser, je grösser die Kraftwerkleistung ist. Tritt dann in einer Leitung ein Kurzschluss auf, so sind beim Abschalten des Fehlerzweiges in der Regel noch andere Parallelleitungen zugeschaltet, so dass die Eigenfrequenz auf unbedeutende Werte herabsinkt. Jener Fall, wo beim genannten Kurzschluss, zufolge falscher Selektivität zuerst alle anderen Schalter, der Schalter der fehlerhaften Leitung aber als letzter ausschalten, muss und kann durch richtige Bemessung des Schutzes vermieden werden. Schaltet man umgekehrt nach einem solchen Kurzschluss (über dessen Weiterbestehen z. B. nichts bekannt ist) die be-

treffende Leitung wieder ein, so wird dies nur mit einem Teil der vollen Anlageleistung gemacht, während der volle Einsatz aller Maschinen erst erfolgt, wenn der Kurzschluss sicher behoben und das übrige Netz angeschlossen ist. Damit ist gezeigt, dass auch in diesem Extremfall eine grosse Eigenfrequenz durch Massnahmen des Schutzes und durch richtiges Manövrieren ohne weiteres verhindert werden kann.

Als Sonderfall muss noch ein grosses Kraftwerk betrachtet werden, welches nicht mit anderen Kraftwerken verbunden ist, und von welchem aus geographischen und wirtschaftlichen Gründen nur eine Verbraucherleitung abgeht. Hier kann bei voller Kurzschlussleistung eine verhältnismässig hohe Eigenfrequenz auftreten. Daher müssen solche Einzelfälle besonders untersucht werden; unter Umständen müssen hier überdimensionierte, d. h. teurere Schalter verwendet werden.

3. Schlussfolgerungen und Vorschläge

a) Das auf internationaler Basis zu steckende Ziel besteht darin, ein umfassendes Urteil über die Kurzschluss- und Eigenfrequenzverhältnisse in den Netzen zu gewinnen, und sodann vernünftige diesbezügliche Regeln aufzustellen. Dieses Ziel ist heute noch nicht erreicht. Wohl bestehen schon umfangreiche Untersuchungen, die einen groben Überblick gestatten. Doch sind die vorhandenen Resultate nicht nach einheitlichen Gesichtspunkten ermittelt worden, und zu ungenau, da die wichtigen dämpfenden Einflüsse nicht oder zu wenig berücksichtigt wurden; ferner sind die Steilheiten mangels einer Definition (die CEI-Definition der Steilheit ist erst später aufgestellt worden) meistens willkürlich ausgewertet worden. Zudem fehlt bei den meisten Publikationen eine Differenzierung der angegebenen Leistungs- und Steilheitswerte nach Betriebsfällen.

b) Da das Ausschaltvermögen der Hoch- und Höchstspannungsschalter von der Steilheit und Amplitude der wiederkehrenden Spannung abhängt, und eine Vergrösserung der Steilheit eine Verteuerung der Schalter bedingt, so ist es wirtschaftlich nicht tragbar, die Schalter für die wenigen Fälle grösster Steilheiten zu dimensionieren, während die grosse Mehrzahl der übrigen Fälle viel kleineren Steilheiten entspricht. Vielmehr haben sowohl die Betriebe als auch die Fabrikanten daran Interesse, die extremen Fälle einzuschränken oder gesondert zu behandeln. Praktisch handelt es sich dabei einerseits um den Fall des von einem starken Netz gespeisten Transformators mit sekundärseitigem Kurzschluss auf der einzigen abgehenden Leitung. Anderseits betrifft es den sogenannten Fall des letztilöschen Schalters in einem grossen Kraftwerk.

Indessen kann man diese schlimmsten Fälle nicht nach Belieben wegschaffen, z. B. ist eine Reduktion der Kurzschlussleistung praktisch unerwünscht, und die Tendenz geht im Interesse der Stabilität und der Freizügigkeit der Operationen gerade umgekehrt. Würde man die Kurzschlussleistung durch Zuschaltung von Drosselpulen verkleinern, wie es praktisch für hohe Spannungen nur in England (BEA) gemacht wird, so erhöht man anderseits die Eigenfrequenz. Solche Massnahmen erscheinen daher als unerwünscht und führen nicht weiter. Das erwähnte Grosskraftwerk Grand Coulee Dam ist gerade ein Beispiel dafür, dass die Entwicklung im umgekehrten Sinne läuft [9, 13].

Bei Grosskraftwerken ist im allgemeinen die Zahl der abgehenden Leitungen um so grösser, je grösser die Kraftwerkleistung ist. Daher sind beim Abschalten mit voller Kurzschlussleistung stets parallele Leitungen angeschlossen, d. h. die Eigenfrequenz ist klein. Da die Selektivität aus Stabilitäts-

gründen so eingerichtet sein muss, dass die fehlerfreien Leitungen im Betrieb bleiben, ist stets Gewähr für eine kleine Eigenfrequenz beim Schalten des Kurzschlusses vorhanden. Ausnahmen, wo aus geographischen Gründen nur eine einzige Leitung vom Kraftwerk weggeht, sind wirklich selten; dafür sind hier oft andere günstige Faktoren wie Kabel usw. vorhanden. Solche Fälle müssen besonders behandelt werden.

In grossen Unterstationen, wo grosse Transformatoren aus einem übergeordneten Netz gespeist werden, gilt bezüglich der abgehenden Leitungen und der Selektivität das gleiche wie das soeben für grosse Kraftwerke gesagte. Dazu kommt, dass mit zunehmender Transformatorleistung die Amplitude der hohen Frequenz abnimmt.

Beim Transformator, welcher primärseitig von einem starken Netz gespeist wird, und sekundärseitig einen Kurzschluss hat, könnte eine Ausschaltung des Kurzschlusses von der Primärseite her höchstens ausnahmsweise und als Notbehelf geduldet werden, und wäre praktisch auch nur möglich, wenn sekundärseitig nur eine Leitung abgehen würde (Selektivität); dies ist jedoch nur bei kleineren Leistungen der Fall. Sobald mehrere Leitungen abgehen, muss in jeder abgehenden Leitung ein Leistungsschalter vorhanden sein, welcher leitungsseitig Kurzschlüsse unterbrechen muss; dann gilt aber auch hier das oben für ein Kraftwerk gesagte.

Bei grossen Kraftwerken und Transformatorenstationen bleibt somit als Problem von überragender Bedeutung, ob die letzte Leitung allein (ohne Parallel-Leitungen) bei voller Kurzschlussleistung ausgeschaltet werden muss oder nicht. Anderseits kommt Einschalten auf Kurzschluss (mit eventueller sofortiger Ausschaltung) mit voller Stationsleistung bei mehr als einer speisenden Einheit praktisch nicht vor.

c) Wir erinnern hier an die verschiedenen am Schluss des I. Teiles unter 4 a) bis f) gemachten Feststellungen, die als positive Erkenntnisse zu werten sind.

d) Nachdem festgestellt wurde, dass die vorhandenen Resultate, wenn auch sehr umfangreich, so doch ungenügend sind, wird vorgeschlagen, eine beschränkte Zahl von Netzversuchen in ausgewählten Netzpunkten auf einheitlicher Basis durchzuführen, was beim heutigen Stand der Technik ohne wesentliche Schwierigkeiten möglich ist. Ferner sind bei den Elektrizitätsgesellschaften Umfragen durchzuführen, ähnlich wie dies kürzlich durch das schweizerische CIGRE-Komitee bei den schweizerischen Netzbetrieben geschehen ist [38].

Der Autor ist P. Hammarlund und O.S. Johansen für die Überlassung von noch unveröffentlichtem statistischem Material zu Dank verpflichtet.

Literatur

- [1] Dannat, C. und S. E. Goodall: Circuit-Breaker Operation. The Inherent Voltage Recovery Rate. Electrician Bd. 114(1935), 26. April, S. 539...542.
- [2] Fourmarier, P. und J. K. Brown: Die Bestimmung des Verlaufs der wiederkehrenden Spannung nach Kurzschlussabschaltungen nach einer Hochfrequenz-Resonanz-Methode. Brown Boveri Mitt. Bd. 24(1937), Nr. 8, S. 217...223.
- [3] Trencham, H. und K. J. R. Wilkinson: Restriking Voltage, and its Import in Circuit-Breaker Operation. J. Instn. Electr. Engrs. Bd. 80(1937), Nr. 485, S. 460...468.
- [4] Wanger, W. und J. K. Brown: Die Berechnung des Schwingungsverlaufs der wiederkehrenden Spannung nach Kurzschluss-Abschaltungen. Kontrolle durch Messungen mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen und mit einer Resonanzmethode. Brown Boveri Mitt. Bd. 24(1937), Nr. 11, S. 283...302.
- [5] Sickie, R. C. van: Influence of Resistance on Switching Transients. Trans. AIEE Bd. 58(1939), August, S. 397...403.
- [6] Clair, H. P. St. und J. A. Adams: Transient Recovery-Voltage Characteristics of Electric-Power Systems. Trans. AIEE Bd. 61(1942), September, S. 666...669.
- [7] Adams, J. A., W. F. Skeats, R. C. van Sickie und T. G. A. Sillers: Practical Calculation of Circuit Transient Recovery Voltages. Trans. AIEE Bd. 61(1942), November, S. 771...779.
- [8] Hammarlund, P.: Transient Recovery-Voltage Subsequent to Short-Circuit Interruption with Special Reference to Swedish Power Systems. Ingen.-Vetens.-Akad. Handl. Bd. —(1946), Nr. 189.
- [9] Clagett, W. H. und W. M. Leeds: 4 370 000-kVA-Short-Circuit Tests on Grand Coulee 230-kV-Bus. Trans. AIEE Bd. 65(1946), November, S. 729...734.
- [10] Thommen, H.: De la question des oscillations électrodynamiques sollicitant les disjoncteurs à grande puissance. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1948, Bd. 2, Rapp. 125, 18 S.
- [11] Puppikofer, E.: Rapport sur l'activité du Comité International d'Etudes des Interrupteurs, du 1^{er} juillet 1948 au 1^{er} juillet 1948. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1948, Bd. 2, Rapp. 138, 27 S.
- [12] Kurth, F.: Fréquence de l'oscillation de la tension de rétablissement dans les réseaux à courant alternatif. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1948, Bd. 2, Rapp. 139, 19 S.
- [13] Holmdahl, N. G. und C. L. Killgore: Development of the 230-kV-Ring Bus for Grand Coulee Power Plant. Trans. AIEE Bd. 67(1948), Part. II, S. 1369...1381.
- [14] Gosland, L. und J. S. Vosper: Tension de réamorçage dans les réseaux britanniques à 66 KV. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1950, Bd. 2, Rapp. 110, 12 S.; Rapp. 110bis, 4 S.
- [15] Fourmarier, P.: Méthode expérimentale nouvelle de détermination de la tension du rétablissement. Résultats obtenus sur les réseaux belges. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1950, Bd. 2, Rapp. 117, 26 S.
- [16] Horst, D. Th. Ter.: Fréquences propres d'un réseau de lignes aériennes à 50 KV et du réseau d'interconnexion à 110 KV aux Pays-Bas. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1950, Bd. 2, Rapp. 127, 14 S.
- [17] Kurth, F.: Méthode pour la mesure directe du taux de la tension du rétablissement dans les réseaux, sans interruption de service. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1950, Bd. 2, Rapp. 136, 9 S.
- [18] Belot, R.: Les fréquences propres dans les réseaux de transport d'énergie des Unions de Centrales Electriques du Hainaut. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1950, Bd. 3, Rapp. 317, 24 S.
- [19] Someda, G.: Détermination expérimentale des fréquences propres dans un réseau italien. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1950, Bd. 3, Rapp. 329, 5 S.
- [20] Meyer, H.: Die grundlegenden Probleme der Hochspannungsschalter. Brown Boveri Mitt. Bd. 37(1950), Nr. 4/5, S. 108...122.
- [21] Amstutz, A. und H. Meyer: Netzversuche mit Druckluftschaltern. Brown Boveri Mitt. Bd. 37(1950), Nr. 4/5, S. 136...143.
- [22] Fourmarier, P.: La détermination des fréquences propres des réseaux. Bull. sci. AIM Bd. 63(1950), Nr. 7/8/9, S. 337...360.
- [23] Killgore, C. L., A. C. Conger und W. Wanger: Grossversuche mit einem 230-kV-Druckluftschallschalter im Kraftwerk Grand Coulee, USA. Brown Boveri Mitt. Bd. 38(1951), Nr. 12, S. 375...390.
- [24] Johansen, O. S.: Recherches sur les valeurs de la vitesse d'accroissement de la tension transitoire de rétablissement et du facteur d'amplitude dans les réseaux suédois d'énergie et proposition concernant les valeurs de référence de la vitesse d'accroissement de la tension transitoire de rétablissement. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, Bd. 2, Rapp. 104, 20 S.
- [25] Belot, R.: Amplitude et fréquences propres de la tension de rétablissement dans les réseaux de l'Union des Centrales Electriques du Hainaut (Belgique). Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, Bd. 2, Rapp. 109, 13 S.
- [26] Meyer, H.: Compte rendu des essais sur réseau exécutés avec un nouveau type de disjoncteur pneumatique à très haute tension. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, Bd. 2, Rapp. 115, 19 S.
- [27] Gosland, L. und J. S. Vosper: Etude, à l'aide de la table à calcul, des tensions transitoires inhérentes de rétablissement sur le réseau britannique à 132 KV. Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, Bd. 2, Rapp. 120, 21 S.
- [28] Meyer, H.: Discussion du Groupe 13 «Interrupteurs». Conference Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, Bd. 1, S. 242...244.

- [29] Hammarlund, P. E. und O. Johansen: La tension transitoire de rétablissement dans le réseau suédois, à la coupure d'un court-circuit. Asea Rev. Bd. 24(1952), Nr. 2, S. 27...37.
- [30] AIEE Joint Subcommittee on Distribution Circuit Recovery Voltages: Recovery Voltage Characteristics of Distribution Systems. Paper presented at the AIEE Mid-Winter Meetings.
- [31] Callow, J. A.: Simplified Calculations for Rate of Rise of Restriking Voltage. Technical Report G/T261, 1952. Leatherhead: The British Electrical and Allied Industries Research Association 1952.
- [32] Commission Electrotechnique Internationale: Règles de la C.E.I. pour les disjoncteurs à courant alternatif. Chapitre 1: Règles relatives au fonctionnement lors de courts-circuits. S. 70...77. Publ. n° 56-1, 2^e éd. Genève: Bureau Central de la C.E.I. 1954.
- [33] Puppikofler, H.: Bemerkungen zum Entwurf der neuen Regeln des SEV für Wechselstrom-Hochspannungs-Schalter. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 2, S. 37...39.
- [34] Regeln für Wechselstrom-Hochspannungs-Schalter. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 2, S. 71...80.
- [35] Meyer, H.: Der Brown-Boveri-Druckluftschnellschalter für das 380-kV-Netz. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 4, S. 157...162.
- [36] Young, A. F. B.: Some Researches on Current Chopping in High-Voltage Circuit-Breakers. Proc. Instn. Electr. Engrs. Part II, Bd. 100(1953), Nr. 76, S. 337...353; Discussion S. 354...361.
- [37] Johnson, I. B., A. J. Schultz und W. F. Skeats: System Recovery Voltage and Short-Circuit Duty for High-Voltage Circuit Breakers. Power Apparatus Syst. Bd. —(1953), Nr. 9, S. 1339...1347.
- [38] Schiller, H. und H. Meyer: Die in schweizerischen 50-kV-Netzen vorkommenden Bedingungen in Bezug auf Abschaltleistung und Eigenfrequenz. Bull. SEV Bd. 45(1954), Nr. 13, S. 526...530; 543.

Adresse des Autors:

Dr. P. Baltensperger, A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Lichttechnische Anforderungen an Strassenbeleuchtungen

Vortrag, gehalten an der Diskussionstagung des SBK am 14. April 1955, in Zürich,
von H. Kessler, Zürich

628.971.6

A. Allgemeines

Wenn man sich über lichttechnische Anforderungen, die an eine Strassenbeleuchtung gestellt werden sollen, auseinandersetzen will, so muss man sich vorerst einmal die Frage stellen:

«Wann ist eine Strassenbeleuchtung gut und wie soll sie ausgeführt werden, damit sie gut ist?»

Es sind nun schon bald 20 Jahre her, dass sich Bouma, ein bekannter holländischer Physiker, ebenfalls und sehr eingehend mit diesem Problem beschäftigte, zu einem Zeitpunkt, wo die öffentliche Beleuchtung, besonders die permanente ortsfeste Beleuchtung von Autostrassen aktuell wurde. Er hat gewisse Wahrnehmungen und praktische Erfahrungen zusammen mit seinen Mitarbeitern auch von der wissenschaftlichen Seite untersucht und geschrieben:

«Wenn man sich die Frage vorlegt, muss man sich darüber klar sein, welch äusserst kompliziertes Problem hier aufgeworfen wird, ein Problem, dessen Lösung nur durch die Zusammenarbeit der verschiedensten Zweige der Wissenschaft möglich ist; eine reiche Fülle praktischer Erfahrungen ist dabei ebenfalls unentbehrlich. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass wir im Interesse der Verkehrssicherheit gute Sicht auf dem Wege erreichen wollen. Abgesehen von einer Reihe technischer und physikalischer Faktoren (wie Helligkeitsverteilung, physikalische Zusammensetzung des Lichtes usw.), wird die Sicht in hohem Masse von den besonderen Eigenschaften unseres Auges beeinflusst. Eine eingehende Untersuchung dieser Augeneigenschaften wird daher einen unerlässlichen Bestandteil der Frage der Strassenbeleuchtung bilden.»

Damit soll angedeutet sein, dass der subjektive Gesamteindruck einer Strassenbeleuchtung nicht allein von den lichttechnischen Anforderungen abhängig ist.

Die Erfüllung der Aufgabe des Lichttechnikers liegt in der

«Wahrnehmung»,

einer guten, sicheren und raschen Wahrnehmung.

Die Wahrnehmung ist vor allem dann gut, wenn

- die Kontraste genügend gross sind,
- das Objekt mit ausreichender Schärfe erkannt wird,

c) der Gegenstand auf der Strasse rasch genug wahrgenommen wird.

Kontraste erhält man, wenn sich ein hellbeleuchteter Gegenstand vom dunklen Hintergrund oder ein dunkler Gegenstand vom hellen Hintergrund abhebt. Die Untersuchungen über die Reflexionskoeffizienten haben gezeigt, dass weitaus die meisten Objekte, die sich auf einer Strasse befinden, einen schlechteren Reflexions-Wirkungsgrad haben als die Strassendecke. Man wird also versuchen, diese Gegebenheiten mit der künstlichen Beleuchtung auszunützen und zu unterstützen, weil damit gleichzeitig auch wirtschaftliche Zwecke verbunden sind. Am besten würde dieses Ziel dann erreicht und man käme den Idealbedingungen am nächsten, wenn das Licht in parallelen Strahlen von oben nach unten senkrecht auf die Strasse fiele, so dass die horizontale Fläche, d. h. die Strassendecke, mit dem besten Wirkungsgrad und die vertikalen Flächen, in diesem Fall die Objekte auf der Strasse, gar nicht beleuchtet würden.

Um den für eine einwandfreie Wahrnehmung nötigen Kontrast zu erzielen, ist eine genügend hohe Leuchtdichte der Strassenoberfläche, d. h. bei einem gegebenen Reflexionskoeffizienten eine entsprechende Beleuchtungsstärke nötig. Da Wahrnehmungen aber nicht von der Beleuchtungsstärke, sondern von Leuchtdichte-Unterschieden oder, wenn man die Verhältnisse noch besser präzisieren wollte, von den empfundenen Helligkeitskontrasten abhängig sind, sagt die Beleuchtungsstärke eigentlich nicht viel aus über die Güte einer Strassenbeleuchtung. Trotzdem wird man mit ihr noch auf Jahre hinaus arbeiten müssen, weil die nicht allgemein zur Verfügung stehenden Instrumente zur Messung der Leuchtdichte und deren Messresultate nur von geübten Technikern gehandhabt und ausgewertet werden können. Immerhin kann gesagt werden, dass die mittlere Beleuchtungsstärke einer gut beleuchteten Verkehrsstrasse ausserorts in der Grössenordnung zwischen 4 und 8 Lux liegen wird, währenddem sie innerorts, je nach der Verkehrsdichte, wenigstens zum Teil wesentlich höher sein muss. Die Versuchsstrecke Hegnau—Dübendorf wird hierüber nähere Angaben vermitteln.