

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 13

Artikel: Höhere Harmonische bei elektrischen Fernübertragungen

Autor: Rasquin, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904832>

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: 26.01.2026

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

Höhere Harmonische bei elektrischen Fernübertragungen

W. Rasquin

Für längere Freileitungen und längere Kabel wird nachgewiesen, dass höhere Harmonische, die im Verbrauchernetz entstehen, weder das Übertragungsmittel noch das Erzeugernetz gefährden. Entstehen die höheren Harmonischen dagegen im Erzeugernetz, dann können sehr grosse Überhöhungen der Harmonischen auftreten, die auf jeden Fall vermieden werden müssen. Es werden Massnahmen genannt, mit denen die Überhöhungen in tolerierbaren Grenzen gehalten werden können, ohne dass unbedingt auf Filterkreise zurückgegriffen werden muss.

Dans le cas de lignes aériennes et câbles particulièrement longs, il est prouvé que les harmoniques supérieurs, qui se produisent dans le réseau des consommateurs, ne mettent en danger ni les moyens de transport ni le réseau de production. Si, par contre, ils se produisent du côté production, ils risquent de devenir très surélevés, se qui doit être absolument évité. On indique des moyens de maintenir ces surélévations dans des limites acceptables, sans avoir nécessairement à employer des circuits de filtrage.

1. Einleitung

In einigen neueren Veröffentlichungen [1...4] ist gezeigt worden, dass Freileitungen und Kabel, ohne Übertragungstechnische Grenzen zu überschreiten, wesentlich grössere Entfernungen als bisher angenommen überbrücken können, falls sie optimal kompensiert werden. Die dabei eingesetzte, lastunabhängige Kompensation ist auf eine Einschränkung der Spannungsveränderung längs des Übertragungssystems und nicht etwa auf eine Blindleistungsminimierung ausgerichtet. Sie ist aber – wie eine Blindleistungskompensation – auf die Netzfrequenz abzustimmen, so dass höhere Frequenzen den Kompensationsbedingungen nicht unterworfen sind.

Treten demnach in dem einspeisenden oder dem dem Verbraucher zugewandten Netz Nichtlinearitäten auf, so müssen Ströme und Spannungen an diesen Orten, aber auch auf den dazwischenliegenden Übertragungssystemen, neben der Grundschiwingung (der ersten Harmonischen) auch höhere Harmonische zu dieser Grundschiwingung enthalten, die von der Kompensation in unterschiedlicher Weise beeinflusst werden.

Im folgenden wird daher untersucht, wie sich höhere Harmonische der Spannung auf das Übertragungsverhalten von längeren Freileitungen und Kabeln auswirken können.

2. Allgemeine Voraussetzungen

Wie an den meisten Stellen der Veröffentlichungen [1...4], so wird auch im folgenden zunächst ohne Berücksichtigung der Übertragungsverluste gerechnet, so dass die so erhaltenen Ergebnisse sowohl auf Freileitungen als auch auf Kabel zutreffen. Später wird dann nachgewiesen, dass die unter

Vernachlässigung aller Verluste erhaltenen Ergebnisse sehr dicht an diejenigen heranreichen, die bei Berücksichtigung der Verluste berechnet werden.

Weiter wird zugelassen, dass der parallel zu der als unveränderlich angenommenen Kompensationseinrichtung liegende Verbraucher neben Wirkleistung auch Blindleistungen verlangen darf. Der Verbraucher-Phasenwinkel soll (ohne Berücksichtigung der Kompensations-Blindleistung) bei der Grundschiwingung zwischen -15° (kapazitiv) und $+30^\circ$ (induktiv) schwanken dürfen.

Darüber hinaus wird für die weiteren Betrachtungen vorausgesetzt, dass die Amplituden der höheren Harmonischen zumindest am Ort ihrer Entstehung sehr klein gegenüber der Amplitude der Grundschiwingung der Betriebsspannung bleiben, und dass ausserdem nur solche Betriebszustände zugelassen werden, bei denen die Amplituden der höheren Harmonischen auf dem Übertragungssystem klein gegenüber der Amplitude der Grundschiwingung bleiben. Damit bestimmen sich sowohl die Kompensationsleistung als auch die maximal übertragbare Leistung des Übertragungssystems ausschliesslich über die Grundschiwingung der Verbraucherspannung.

Ausserdem ist es notwendig, nach dem Ort der Entstehung der Verzerrungen zu unterscheiden. Daher wird in einem ersten Abschnitt untersucht, welche Auswirkungen Verzerrungen haben, die vom Verbrauchernetz herühren, und in einem zweiten Abschnitt werden die Auswirkungen von Verzerrungen des einspeisenden Netzes berechnet. Dabei muss zwangsweise vorausgesetzt werden, dass weder Zwischeneinspeisungen noch Zwischenabnahmen zugelassen sind. Die nachstehenden Betrachtungen beziehen sich also nur auf A-B-Verbindungen.

Adresse des Autors

Professor Dr.-Ing. Werner Rasquin, Fachgebiet Elektrische Energieübertragung, Universität Duisburg, Bismarckstrasse 81, D-4100 Duisburg 1.

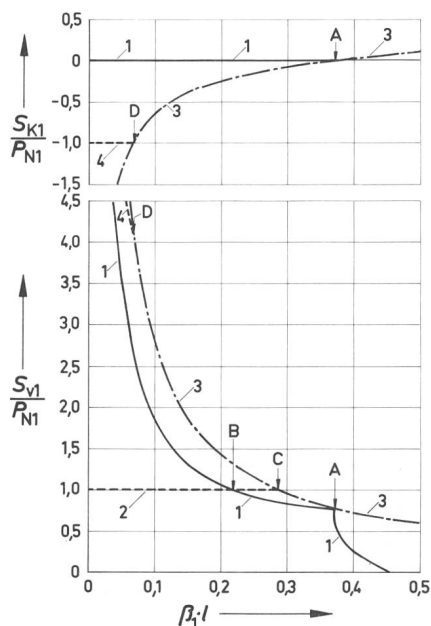


Fig. 1 Auf die natürliche Leistung P_{N1} bezogene Kompensationsleistung S_{K1}/P_{N1} und maximal zulässige Verbraucherleistung S_{V1}/P_{N1} eines verlustlosen Übertragungssystems in Abhängigkeit von der auf den Kehrwert des Phasenkoeffizienten β_1 bezogenen Länge $\beta_1 \cdot l$ bei der Frequenz der 1. Harmonischen

Kennlinien 1: unkompensiertes Übertragungssystem

Kennlinie 2: Begrenzung der Verbraucherleistung auf die natürliche Leistung

Kennlinien 3: optimal kompensiertes Übertragungssystem ohne Leistungsbegrenzung

Kennlinie 4: Begrenzung des Betrags der kapazitiven Kompensationsleistung auf die natürliche Leistung

Punkt A Übergang von kapazitiver auf induktive Kompensation

Punkt B Grenzlänge des unkompensierten Systems bei Vorgabe der bezogenen Verbraucherleistung $S_{V1}/P_{N1} = 1$

Punkt C Grenzlänge des optimal kompensierten Systems bei Vorgabe der bezogenen Verbraucherleistung $S_{V1}/P_{N1} = 1$

Punkt D Übergang von der optimalen Kompensation auf die Kompensationsbegrenzung $S_{K1}/P_{N1} = -1$

3. Verzerrungen durch das Verbrauchernetz

Wie sich zeigen wird, können – wenn überhaupt – so bei kürzeren Übertragungslängen, insbesondere bei grossen kapazitiven Kompensationsleistungen, Schwierigkeiten auftreten, so dass es notwendig ist, zunächst einmal die Kompensationsbedingungen bei kleineren, auf den Kehrwert des Grundschwingungs-Phasen-Koeffizienten bezogenen Längen $\beta_1 \cdot l$ zu betrachten.

In Figur 1 ist die auf die natürliche Leistung bezogene Kompensationsleistung (oberes Teilbild) in Abhängig-

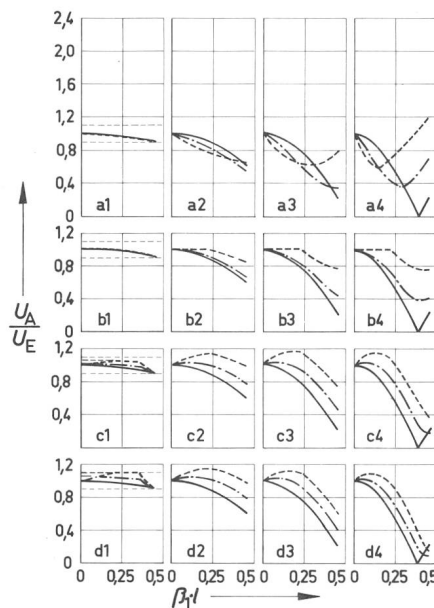


Fig. 2a Spannung U_A am Anfang eines verlustlosen unkompensierten Übertragungssystems bezogen auf die am Ende des Systems vorgegebene Spannung U_E in Abhängigkeit von der bezogenen Systemlänge $\beta_1 \cdot l$. β_1 ist der Phasenkoeffizient der ersten Harmonischen.

Teilbilder a Verbraucherphasenwinkel = -15° (Grundschwingung)

b Verbraucherphasenwinkel = 0°

c Verbraucherphasenwinkel = $+15^\circ$

d Verbraucherphasenwinkel = $+30^\circ$

Teilbilder 1 erste Harmonische (Grundschwingung)

2 zweite Harmonische

3 dritte Harmonische

4 vierte Harmonische

Kennlinien ——— $S_{V1}/P_{N1} = 0$

Kennlinien ——— $S_{V1}/P_{N1} = 0,5 \cdot (S_{V1}/P_{N1})_{\max}$

Kennlinien - - - - - $S_{V1}/P_{N1} = (S_{V1}/P_{N1})_{\max}$

Teilbild d1 lässt die Auswirkungen der Beschränkung der Betriebsbedingungen erkennen: Die dünn gezeichneten Kennlinien stehen für den nicht eingeschränkten Betrieb. Die stark gezeichneten Kennlinien stehen für die Beschränkung auf $S_{V1}/P_{N1} \leq 1$

keit von der bezogenen Länge aufgetragen. Daraus wird ersichtlich, dass zu kleinen Längen hin beliebig grosse kapazitive Kompensationsleistungen erforderlich werden, falls im obigen Sinne bei der Grundschwingung optimal kompensiert werden soll. Für höhere Harmonische wächst die durch eine solche Kompensationseinrichtung bewirkte Blindleistung proportional zur Ordnungszahl der Harmonischen, so dass bei steigender Frequenz zunehmende Abschluss-Blindleistungen auftreten.

Um die bei sehr grossen kapazitiven Blindleistungen zu erwartenden Schwierigkeiten bei den höheren Har-

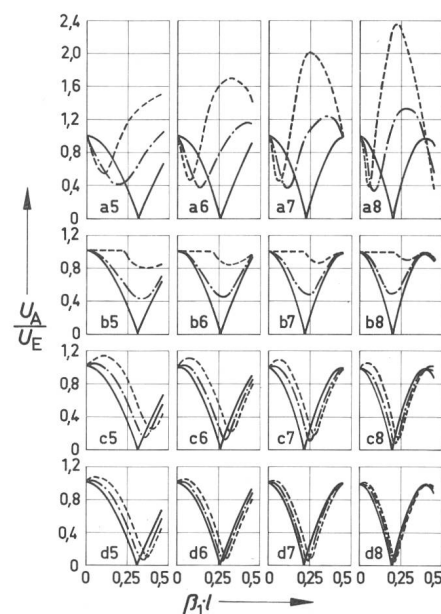


Fig. 2b Wie Figur 2a, jedoch für die 5., 6., 7. und 8. Harmonische

monischen zu vermeiden, wurden sowohl die Kompensationsleistung bei der Grundschwingung (Kennlinie 4 im oberen Teilbild) als auch die Verbraucherleistung auf die natürliche Leistung (Kennlinie 2 im unteren Teilbild) begrenzt. Die zusätzlich eingezeichneten Kennlinien 1 und 3 beziehen sich auf den unkompensierten bzw. den optimal kompensierten Betrieb.

Aber auch die Beschränkung der kapazitiven Kompensationsleistung auf die Grösse der natürlichen Leistung reicht nicht aus, um bei höheren Harmonischen merkliche Spannungsüberhöhungen auszuschliessen, da selbst bei einem vollständigen Verzicht auf eine kapazitive Kompensation noch Spannungsüberhöhungen bei kapazitiven Verbraucher-Phasenwinkeln auftreten, wie dies Figur 2b in der oberen Bildzeile erkennen lässt.

In Figur 2a und 2b sind die am Anfang der Übertragungsstrecke zu erwartenden Spannungen im Vergleich zu der am Ende der Strecke vorgegebenen Spannung für den unkompensierten Betrieb in Abhängigkeit von der bezogenen Übertragungslänge $\beta_1 \cdot l$ aufgetragen. Die Länge ist auf den Kehrwert des Phasenkoeffizienten der Grundschwingung bezogen.

Aus der ersten Teilbildzeile von Figur 2b kann abgelesen werden, welche Überhöhungen der Spannung am Anfang der Übertragungsstrecke zu erwarten sind, falls auch höhere Ordnungszahlen der Harmonischen be-

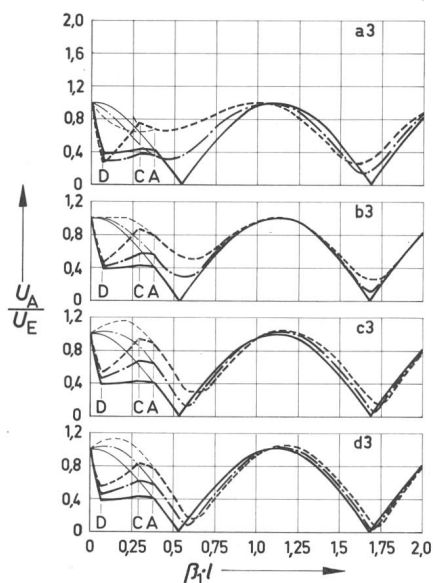


Fig. 3a Spannung U_A der dritten Harmonischen am Anfang eines verlustlosen Übertragungssystems bezogen auf die am Ende des Systems vorgegebene Spannung U_E in Abhängigkeit von der bezogenen Länge $\beta_1 \cdot l$. β_1 ist der Phasenkoeffizient der ersten Harmonischen

Teilbilder a Verbraucherphasenwinkel = -15° (Grundschwingung)
 b Verbraucherphasenwinkel = 0°
 c Verbraucherphasenwinkel = $+15^\circ$
 d Verbraucherphasenwinkel = $+30^\circ$

Dünn gezeichnete Kennlinien stehen für den unkompenzierten Betrieb, dick gezeichnete für den kompensierten Betrieb

— $S_{V1}/P_{N1} = 0$
 — $S_{V1}/P_{N1} = 0,5 (S_{V1}/P_{N1})_{\max}$
 - - - $S_{V1}/P_{N1} = (S_{V1}/P_{N1})_{\max}$
 0... $\beta_1 \cdot l$...D $S_{K1}/P_{N1} = -1$ und $S_{V1}/P_{N1} = +1$
 D... $\beta_1 \cdot l$...C $S_{V1}/P_{N1} = +1$
 C... $\beta_1 \cdot l$...A keine Begrenzung des optimal kompensierten Betriebes
 A... $\beta_1 \cdot l$...2 S_{K1}/P_{N1} ist induktiv, keine Begrenzung des optimal kompensierten Betriebes

trachtet werden. Aber selbst die siebte Harmonische verdoppelt sich bei einer Freileitung erst bei einer Länge von 235 km und bei einem Kabel je nach Bauart erst zwischen Längen von 50 und 100 km.

Wird darüber hinaus berücksichtigt, dass die höheren Harmonischen an ihrem Entstehungsort sehr kleine Amplituden aufweisen [5, 6], dann kann gefolgert werden, dass die unkompenzierten Übertragungseinrichtungen durch Verzerrungen der Verbraucherspannungen in ihrem Übertragungsvermögen nicht eingeschränkt werden.

Um festzustellen, welchen Einfluss die Kompensation auf die Überhöhungen der Harmonischen der Spannung hat, wurde diese Überhöhung berechnet und für die dritte Harmonische (wenn auch die dritte Harmoni-

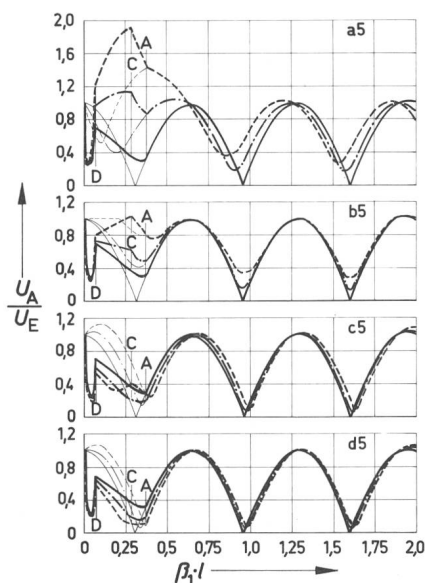


Fig. 3b Wie Figur 3a, jedoch für die fünfte Harmonische

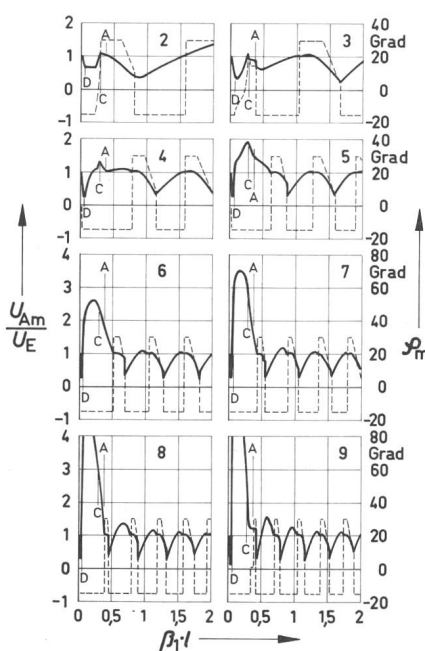


Fig. 4 Grösstmögliche Spannung U_{Am} am Anfang eines verlustlosen Übertragungssystems bezogen auf die am Ende desselben vorgegebene Spannung U_E sowie der dieser grösstmöglichen Spannung zugeordnete Verbraucher-Phasen-Winkel φ_m der Grundschwingung in Abhängigkeit von der bezogenen Systemlänge $\beta_1 \cdot l$

— U_{Am}/U_E
 - - - φ_m

Parameter der Teilbilder ist die Ordnungszahl der Harmonischen

0... $\beta_1 \cdot l$...D $S_{K1}/P_{N1} = -1$ und $S_{V1}/P_{N1} = +1$
 D... $\beta_1 \cdot l$...C $S_{V1}/P_{N1} = +1$
 C... $\beta_1 \cdot l$...A keine Beschränkung des optimal kompensierten Betriebes
 A... $\beta_1 \cdot l$...2 S_{K1}/P_{N1} ist induktiv, keine Beschränkung des optimal kompensierten Betriebes

sche in der Regel im Hochspannungsnetz eine untergeordnete Rolle spielt [7]) in Figur 3a und für die fünfte Harmonische in Figur 3b in Abhängigkeit von der bezogenen Länge dargestellt, wobei für kurze Längen auch der unkompenzierte Betrieb mittels dünner Kennlinien in die Darstellungen mit aufgenommen wurde.

Aus diesen Darstellungen geht hervor, dass die dritte Harmonische in keinem Fall um mehr als 20% angehoben wird und dass die Anhebung der fünften Harmonischen unter 40% (Punkt C, Teilbild a5) gehalten werden kann, falls bei kurzen Systemlängen auch der unkompenzierte Betrieb in die Betrachtungen eingeschlossen wird.

In Figur 4 sind zur Veranschaulichung der Frequenzabhängigkeit die grössten Spannungsüberhöhungen durchgehend von der zweiten bis zur neunten Harmonischen für optimal kompensierte Übertragungseinrichtungen aufgetragen, obwohl geradzahlige und durch drei dividierbare ungeradzahlige Harmonische in Hochspannungsnetzen von untergeordneter Bedeutung sind. Ausserdem sind über die gestrichelten Kennlinien die Verbraucherphasenwinkel festgelegt, bei denen die grössten Spannungsüberhöhungen auftreten. Wie aus diesen Darstellungen hervorgeht, ergeben Verzerrungen der Verbraucherspannung keine Gefährdung von Anlagenelementen, da bei kurzen Längen auf die Kompensation verzichtet werden kann und bei grösseren Längen nur geringfügige Überhöhungen auftreten.

Diese Aussage wird bestätigt, falls die bezogenen Spannungen längs eines verlustbehafteten Kabels berechnet werden. In Figur 5 sind derartige Spannungsverteilungen für das Kabel nach Tabelle I dargestellt.

Aus den Figuren 2 und 3 ist ferner zu entnehmen, dass es Systemlängen gibt, bei denen die Spannungen bestimmter, höherer Frequenzen zum Anfang des Systems hin stark herabgesetzt werden. Je nach Art des Systemabschlusses können sie am Anfang des Systems sogar null werden. Das Übertragungssystem kann also auch Filtereigenschaften aufweisen.

Diese Eigenschaft des Übertragungssystems, die bei Verzerrungen der Verbraucherspannung ausgesprochen angenehme Auswirkungen besitzt, kann sich dagegen bei Verzerrungen des einspeisenden Netzes sehr ungünstig bemerkbar machen, wie im folgenden dargelegt wird.

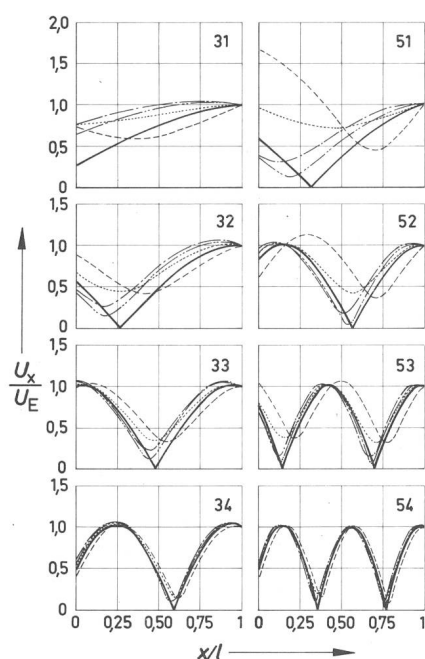


Fig. 5 Spannung U_x am Ort x bezogen auf die am Ende eines optimal kompensierten, verlustbehafteten Kabels (Tabelle I) vorgegebene Spannung U_E in Abhängigkeit von der auf die Gesamtlänge l bezogenen Ortskoordinate x/l

— $S_{V1}/P_{N1} = 0$
 - - - - - $(S_{V1}/P_{N1})_{\max}$ bei $\phi_1 = -15^\circ$
 $(S_{V1}/P_{N1})_{\max}$ bei $\phi_1 = 0^\circ$
 - · - · - $(S_{V1}/P_{N1})_{\max}$ bei $\phi_1 = +15^\circ$
 - - - - - $(S_{V1}/P_{N1})_{\max}$ bei $\phi_1 = +30^\circ$

Teil- 31 3. Harmonische $l = 100$ km $\beta_1 \cdot l = 0,377$
 bild: 32 3. Harmonische $l = 200$ km $\beta_1 \cdot l = 0,755$
 33 3. Harmonische $l = 300$ km $\beta_1 \cdot l = 1,132$
 34 3. Harmonische $l = 400$ km $\beta_1 \cdot l = 1,510$
 51 5. Harmonische $l = 100$ km $\beta_1 \cdot l = 0,377$
 52 5. Harmonische $l = 200$ km $\beta_1 \cdot l = 0,755$
 53 5. Harmonische $l = 300$ km $\beta_1 \cdot l = 1,132$
 54 5. Harmonische $l = 400$ km $\beta_1 \cdot l = 1,510$

4. Verzerrungen durch das Erzeugernetz

Werden Verzerrungen der Spannung am Anfang der Übertragungseinrichtung durch das einspeisende Netz vorgegeben, dann ist insbesondere der Schwachlastbetrieb des Übertragungssystems gefährdet, wie Figur 6 für eine verlustlose Übertragungseinrichtung zeigt. Von der zweiten Harmonischen angefangen gibt es für jede Harmonische Systemlängen, bei denen die Verbraucherspannung gegen Unendlich strebt, falls die Verbraucherleistung null ist (gestrichelte Kennlinien). Eine solche Polstelle wird in ihrer Amplitude durch eine Verbraucherleistung (durchgezogene Kennlinie 6) und durch die Berücksichtigung der Verluste (siehe Fig. 9) zwar entscheidend herabgesetzt, dennoch sind die

Spannungsüberhöhungen immer noch gravierend.

Für den Fall, dass die Verzerrungen durch das Erzeugernetz vorgegeben werden, stellt sich also die Frage, ob Übertragungssysteme größere Entfernungen überhaupt überbrücken können, ohne durch die höheren Harmonischen in ihrem Betrieb eingeschränkt zu werden.

Wird berücksichtigt, dass die Harmonischen meistens schon bei niedrigen Ordnungszahlen kleine Amplituden besitzen und dass die Amplituden der Harmonischen in der Regel mit

steigender Ordnungszahl auch noch abnehmen [6], so können durchaus Spannungsüberhöhungen durch das Übertragungssystem hingenommen werden. Allerdings dürften ohne Überschreitung des Verträglichkeitspegels (analog zu [7] auf 5% geschätzt) selbst bei sehr kleinen Amplituden der Harmonischen nur Überhöhungsfaktoren bis maximal 10 toleriert werden. Selbst bei einem Zugeständnis einer solchen Überhöhungsgrenze sind immer noch für jede Harmonische bestimmte Längenbereiche auszuschließen, und zwar alle diejenigen, bei de-

Daten des betrachteten Drehstromkabels

Tabelle I

Betriebsspannung (verkettet) Netzfrequenz		110 kV 50 Hz		
Leitermaterial Leiterquerschnitt Material-Füll-Faktor Leiter-Hohlkanal-Durchmesser zulässige Leitertemperatur Dicke der Leiterglättung		Kupfer 1000 mm ² 0,85 16 mm 363 K 0,5 mm		
Material der elektrischen Isolierung Isolierungsdicke Dielektrizitätszahl dielektrischer Verlustfaktor spezifischer thermischer Widerstand der elektrischen Isolierung Schirmdicke		Ölpapier 30 mm 3,6 0,0025 5 m*K/W 0,5 mm		
Dicke des Aluminiummantels Mantelverluste bezogen auf die Leiterverluste		5 mm 0,1		
Dicke des Korrosionsschutzes spezifischer thermischer Widerstand des Korrosionsschutzes zulässige Temperatur des Korrosionsschutzes		5 mm 6 m*K/W 343 K		
Ader-Achs-Abstand Verlegetiefe		400 mm 1200 mm		
spezifischer thermischer Widerstand des feuchten Bodens spezifischer thermischer Widerstand des ausgetrockneten Bodens Austrocknungstemperatur Umgebungstemperatur		1 m*K/W 1,2 m*K/W 308 K 293 K		
Grenzleistung (bei 363 K Leitertemperatur) Leiterverluste/Phase/Länge dielektrische Verluste/Phase/Länge Mantelverluste/Phase/Länge Gesamtverluste/Länge		220 MVA 30,47 W/m 0,72 W/m 3,05 W/m 102,71 W/m		
Frequenz der Harmonischen	50 Hz	150 Hz	250 Hz	350 Hz
Wellenwiderstand (Ohm)	52,7	52,6	52,5	52,4
Phasenkoeffizient pro km	0,0038	0,0113	0,0188	0,0268
Dämpfungskoeffizient pro km	0,00024	0,00029	0,00035	0,00039

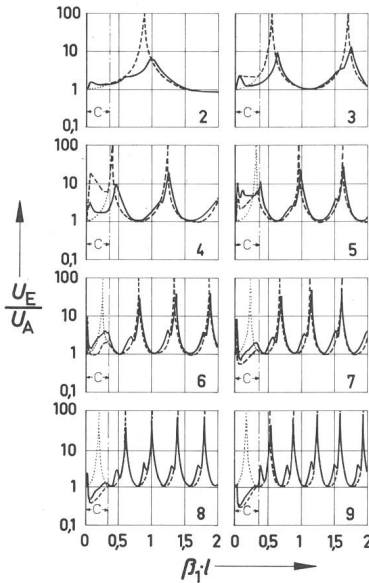


Fig. 6 Am Ende eines verlustlosen Übertragungssystems auftretende, grösstmögliche Spannung U_E bezogen auf die am Anfang vorgegebene Spannung U_A in Abhängigkeit von der bezogenen Systemlänge $\beta_1 \cdot l$

β_1 ist der Phasenkoeffizient des Übertragungssystems bei der Frequenz der Grundschiwingung

- System ohne Kompensation und ohne Last
- System mit optimaler Kompensation, aber ohne Last
- System mit optimaler Kompensation und grösstmöglicher Last ($-15^\circ \dots \varphi_1 \dots +30^\circ$)

Parameter der Teilbilder ist die Ordnungszahl der Harmonischen. Im Bereich C ist die Kompensationsleistung kapazitiv und für die Grundschiwingung im Betrag kleiner/gleich der natürlichen Leistung. Ausserdem ist die Verbraucherleistung für die Grundschiwingung kleiner/gleich der doppelten natürlichen Leistung.

nen in Figur 6 die Kennlinien die Netzlinie 10 überschreiten. Derartige verbotene Längenbereiche sind in Figur 7 für optimal kompensierte Systeme und für unkompensierte Systeme über der Ordnungszahl n der Harmonischen angegeben.

Wird weiter angenommen, dass alle Harmonischen oberhalb der siebten verschwindend kleine Amplituden aufweisen, die auch bei einer sehr grossen Überhöhung keinen Einfluss mehr gewinnen, dann können aus Figur 7 ausnutzbare, von den verbotenen Bereichen ausgesparte Längenbereiche ermittelt werden. Sie sind durch schraffierte Ordinatenbereiche gekennzeichnet. Hierbei sind vorsichtshalber auch geradzahlige und durch drei dividierbare ungeradzahlige Harmonische mitberücksichtigt worden, obwohl sie in der Regel im Hochspannungsnetz von untergeordneter Bedeutung sind. Aus diesen zulässigen Berei-

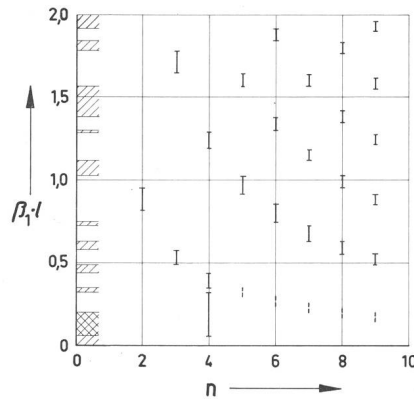


Fig. 7 Bei Vorgabe einer höchstzulässigen Spannungsüberhöhung um den Faktor 10 bestehende Zuordnung zwischen verbotenen Bereichen der bezogenen Länge $\beta_1 \cdot l$ (gekennzeichnet durch I) und der Ordnungszahl n der Harmonischen der Spannung eines verlustlosen, optimal kompensierten Übertragungssystems

(Gestrichelt: verbotene Bereiche bei unkompensiertem Übertragungssystem)

Die schraffierten Ordinatenbereiche kennzeichnen:

- ///// erlaubte Bereiche bei Berücksichtigung aller Harmonischen bis einschliesslich der siebten Harmonischen bei optimaler Kompensation des Übertragungssystems
- XXXX erlaubte Bereiche wie oben, jedoch für ein unkompensiertes Übertragungssystem

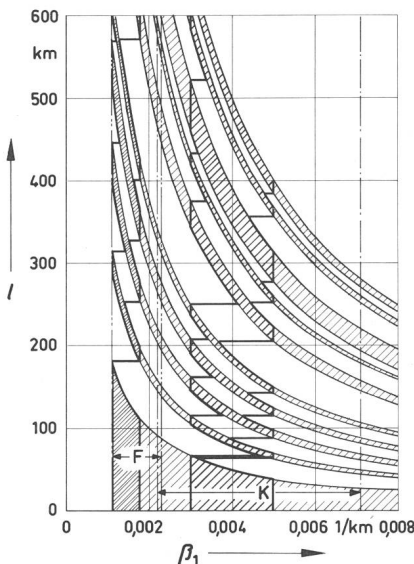


Fig. 8 Zulässige Systemlängen (schraffierte Bereiche) in Abhängigkeit vom Phasenkoeffizienten β_1 (Grundschiwingung) für die Bedingung, dass bis einschliesslich der siebten Harmonischen alle Spannungen höchstens um den Faktor 10 zum Systemende hin angehoben werden

F ist der maximale Variationsbereich des Phasenkoeffizienten für die Grundschiwingung bei Freileitungen

K ist der entsprechende Variationsbereich bei Kabeln

Die stark ausgezogenen Kennlinien umreissen die kleinstmöglichen Variationsbereiche des Phasenkoeffizienten, falls lückenlos alle Entfernungen bei Freileitungen bis zu 600 km und bei Kabeln bis zu 400 km überbrückt werden sollen.

chen der bezogenen Längen können die zulässigen Längen als Funktion des Phasenkoeffizienten der Grundschiwingung berechnet werden (Fig. 8).

Da durch Veränderungen des Induktivitätsbelages oder des Kapazitätsbelages bei Freileitungen Phasenkoeffizienten zwischen etwa 0,0011/km und 0,0023/km und bei Kabeln solche zwischen ungefähr 0,0021/km und 0,007/km realisiert werden können, lassen sich durch derartige Veränderungen des Phasenkoeffizienten der Grundschiwingung Übergänge von einem zum anderen Längenband in Figur 8 herstellen, ohne dass Längenbereiche ausgespart werden müssen.

Mit anderen Worten ist sichergestellt, dass vom einspeisenden Netz nennenswerte Amplituden (aber auch diese müssen kleiner als 0,5% der Grundschiwingungsamplitude bleiben, um den Verstärkungsfaktor von 10 zulassen zu können) nur bis zur 7. Harmonischen erzeugt werden, dann können ohne Gefährdung durch höhere Harmonische lückenlos alle Systemlängen bis zu mehreren 100 km überbrückt werden, falls der Phasenkoeffizient der Grundschiwingung entsprechend eingestellt wird. Diese Einstellung des Phasenkoeffizienten fällt bei einem herkömmlichen Einleiter-Drehstromkabel besonders leicht, da der Aderachsabstand in weiten Grenzen verändert werden kann.

Weil die bisherigen Berechnungen der zulässigen Längenbereiche unter Vernachlässigung aller Übertragungsverluste vorgenommen worden sind, wird in Figur 9 gegenübergestellt, wie sich die vergleichsweise kleinen Übertragungsverluste des Kabels nach Tabelle I gegenüber dem Ansatz eines verlustlosen Systems auswirken.

Aus Figur 9 geht hervor, dass selbst die vergleichsweise kleinen Übertragungsverluste auch im Leerlauf-Fall die Gefahr einer zu starken Überhöhung der höheren Harmonischen nahezu ausschliessen. Die Überhöhungskennlinien werden um so deutlicher herabgedrückt, je länger das Kabel wird, d. h. je grösser die Übertragungsverluste aufgrund der Verlängerung des Kabels werden. Die unter Vernachlässigung aller Verluste ermittelten zulässigen Betriebsbereiche sind also gefahrlos nutzbar, da die Übertragungsverluste die Spannungsüberhöhungen gegenüber den Kennlinien aus Figur 6 noch weiter reduzieren.

Allerdings ist diese Aussage nur dann uneingeschränkt gültig, wenn

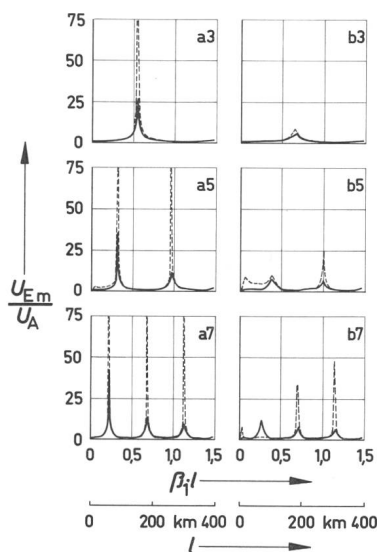


Fig. 9 Maximale Spannung U_{Em} am Ende eines optimal kompensierten Übertragungssystems bezogen auf die am Anfang des Systems vorgegebene Spannung U_A in Abhängigkeit von der bezogenen Systemlänge $\beta_1 \cdot l$

β_1 ist der Phasenkoeffizient der Grundschwingung (50 Hz)

Teilbilder a Verbraucherleistung null

Teilbilder b maximale Verbraucherleistung

Der zweite Teilbildparameter gibt die Ordnungszahl der Harmonischen an

----- Berechnungsergebnisse unter Vernachlässigung aller Verluste
 ————— Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung aller Verluste eines Kabels nach Tabelle I (für dieses gilt die unterste Abszisseneinteilung)

tatsächlich Verstärkungsfaktoren von 10 zugelassen werden können, d. h. wenn die höheren Harmonischen Amplituden von weniger als 0,5% der Grundschwingungsamplitude besitzen. In Schwachlastzeiten sind im 110-kV-Netz aber schon Amplituden der 5. Harmonischen von 2 bis 3% der Grundschwingungsamplitude gemessen worden. Dies bedeutet, dass nur noch Verstärkungsfaktoren von etwa 2 toleriert werden könnten. Für einen solchen Fall sind eingehendere Untersuchungen notwendig, da aus Figur 9

abgelesen werden kann, dass dann nicht nur der Schwachlastfall, sondern auch andere Lastfälle Begrenzungen verlangen. Gegebenenfalls müssten Filter zur Minderung der Harmonischen eingesetzt werden [8, 9].

5. Folgerungen

Werden Netze über längere Übertragungssysteme miteinander verbunden, und treten im einspeisenden oder im verbrauchernahen Netz Spannungsverzerrungen auf, so müssen die höheren Frequenzanteile der Spannung auf ihre Auswirkungen hin untersucht werden, da die möglichen Spannungsüberhöhungen bei den höheren Frequenzen Anlagenteile gefährden können. Bemerkenswerterweise besteht die grösste Gefahr bei Übertragungslängen, deren Produkt mit dem Phasenkoeffizienten der Grundschwingung kleiner als 0,5 bleibt, d. h., bei Freileitungen sind Längen bis etwa 500 km und bei Kabeln je nach Kabeltyp Längen bis rund 125 km (Ölkabel) oder bis ungefähr 200 km (VPE-Kabel) gefährdet. Grössere Längen sind derartigen Gefährdungen nicht mehr ausgesetzt.

Aber auch innerhalb dieses Gefährdungsbereiches können die Auswirkungen der höheren Harmonischen in Grenzen gehalten werden: Entstehen die Verzerrungen in dem Verbrauchernetz, dann kann auf eine eventuell angestrebte kapazitive Kompensation verzichtet werden; in diesem Fall bleiben die Spannungsüberhöhungen so klein, dass sie nicht mehr stören. Entstehen die Verzerrungen in dem einspeisenden Netz, dann ist das Übertragungssystem entsprechend anzupassen, um die Auswirkungen der höheren Harmonischen in engen, tolerierbaren Grenzen halten zu können. Eine solche Anpassung kann bei herkömmlichen Kabeln durch die Wahl eines auf die höheren Frequenzen abge-

stimmten Aderachsabstands vergleichsweise einfach verwirklicht werden. Bei Freileitungen ist eine entsprechende Anpassung über den Phasenabstand nicht so wirkungsvoll wie bei Kabeln, es bleibt aber noch die Anpassung über die Gestaltung des Leiterbündels oder die Ausnutzung der Übertragungsverluste zur Minderung der Spannungsüberhöhungen.

Es kann also festgestellt werden, dass die Auswirkungen von höheren Harmonischen das Übertragungsvermögen von Freileitungen und Kabeln nicht einschränken, falls die Übertragungssysteme entsprechend dimensioniert werden. Dabei muss allerdings vorausgesetzt werden, dass die im einspeisenden Netz verursachten Harmonischen nur Amplituden unterhalb 0,5% der Grundschwingungsamplitude aufweisen. Bei so kleinen Amplituden kann aber auf das Hilfsmittel Filterkreis verzichtet werden. Bei grösseren Amplituden sind eingehendere Untersuchungen erforderlich, ob bei den gestellten Übertragungsaufgaben nicht doch Filterkreise eingeführt werden müssen.

Literatur

- [1] W. Rasquin: Drehstrom-Kabel mit angepassten Querdrosseln. ETZ-Archiv 3(1981)11, S. 371...376.
- [2] W. Rasquin: Entwurfskarte für Drehstrom-Übertragungssysteme mit angepassten Querdrosseln. ETZ 103(1982)5, S. 254...259.
- [3] W. Rasquin: Technische Aspekte der Fernübertragung mit Kabeln. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 32(1982)7, S. 596...605.
- [4] W. Rasquin: Spannungsüberhöhungen auf Freileitungen und Kabeln. Bull. SEV/VSE 73(1982)21, S. 1130...1138.
- [5] S. Frosch und W. Schultz: Digitale Berechnung der Oberschwingungsbelastung von Netzen und Betriebsmitteln. Siemens Z. 51(1977)11, S. 899...903.
- [6] E. Wargowsky: Gleichphasigkeit für Oberschwingungsströme, verursacht durch Drehstrom-Gleichrichteranlagen. ETZ 101(1980)4, S. 222...226.
- [7] Überblick über die Oberschwingungsverhältnisse in öffentlichen Stromversorgungsnetzen. Elektrizitätswirtschaft. 78(1979)25, S. 1008...1017.
- [8] K. Heumann, W. Schultz und H.-G. Schwarz: Bestehende und zukünftige Möglichkeiten, Netzrückwirkungen von Stromrichter-Anlagen zu beherrschen. ETZ-A 98(1977)5, S. 330...334.
- [9] R. Maier: Auslegung von Filtern in der Starkstromtechnik. ETZ 100(1979)9, S. 438...439.