

Der kapazitive Spannungswandler als Alternative zum magnetischen Spannungswandler

Werner Bamert, Leiter Technik und Produktion, Kondensatoren und kapazitive Spannungswandler, Emil Haefely & Cie AG

1. Vom Messprinzip zum Messsystem

Spannungsmessung und Spannungsüberwachung sind Grundelemente der Hochspannungs - Energieverteilung. Schon früh in deren Geschichte stand dafür neben dem einfachen Messprinzip des induktiven Spannungswandlers auch das Messsystem des kapazitiven Spannungswandlers zur Anwendungsauswahl.

Betrachtet man die vielfältigen Anforderungen an Hochspannungsmessgeräte in den jeweiligen Normen (1/...5/) eröffnet sich die Komplexität der vorerst isoliert betrachteten Aufgabe der reinen Abbildung der netzfrequenten Sinusspannung auf eine phasengleiche Niederspannung. Eine Reihe von Einflüssen elektrischer wie auch umweltbedingter Natur sind vorhanden und müssen berücksichtigt werden. Der Ansatz mittels einem Messsystem diesen verschiedenen Teilfunktionen besser gerecht zu werden ist aus diesen Überlegungen verständlich. Ein solches Messsystem stellt der kapazitive Spannungswandler dar.

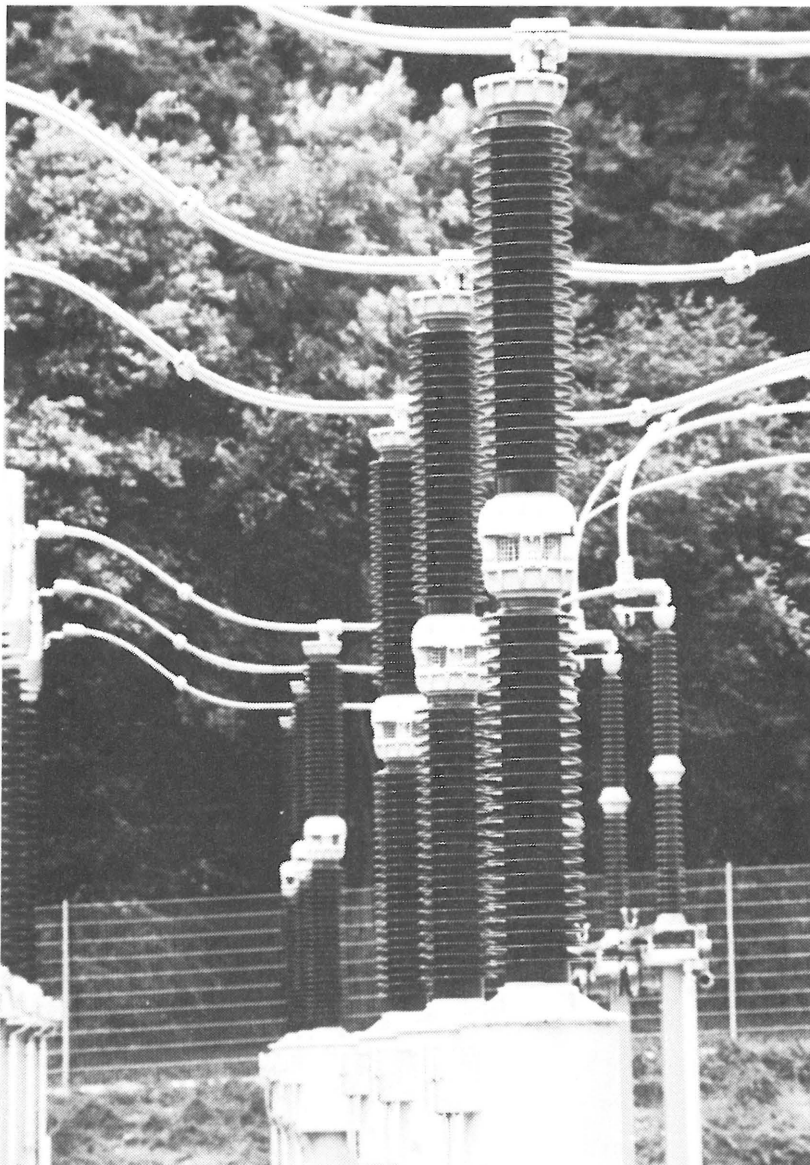


Fig. 1
Kapazitive Spannungswandler
in der 300 kV - Schaltstation

Erst heute wird diesem grundsätzlichen Unterschied auch auf dem internationalen Normengebiet Rechnung getragen indem mit der IEC 44-5 eine eigenständige Norm für kapazitive Spannungswandler entsteht.

Die Notwendigkeit zur Systemsicht wird in einem weiteren Masse verdeutlicht bei der Definition von elektronischen Spannungswandlern, wo im vorliegenden Entwurf zur Norm IEC 44-7 explizit aufgeteilt wird in die Teilfunktionen : Primärspannungssensor, Primärumformer, Übertragungsstrecke, Sekundärumformer.

Die Systemaufteilung des kapazitiven Spannungswandlers ergibt sich in kapazitiven Spannungsteiler, Kompensationsinduktivität und nachgeschalteten Transformator auf niedrigerem Zwischenspannungsniveau.

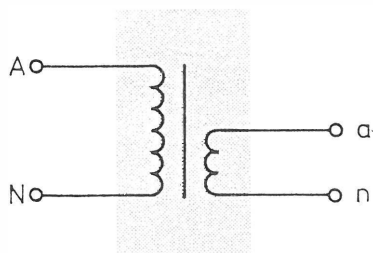
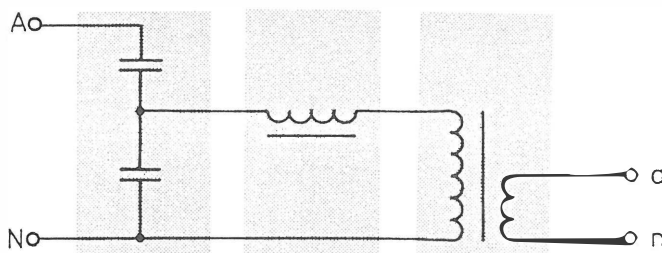


Fig.2
Gegenüberstellung induktiver
Spannungswandler /
kapazitiver Spannungswandler

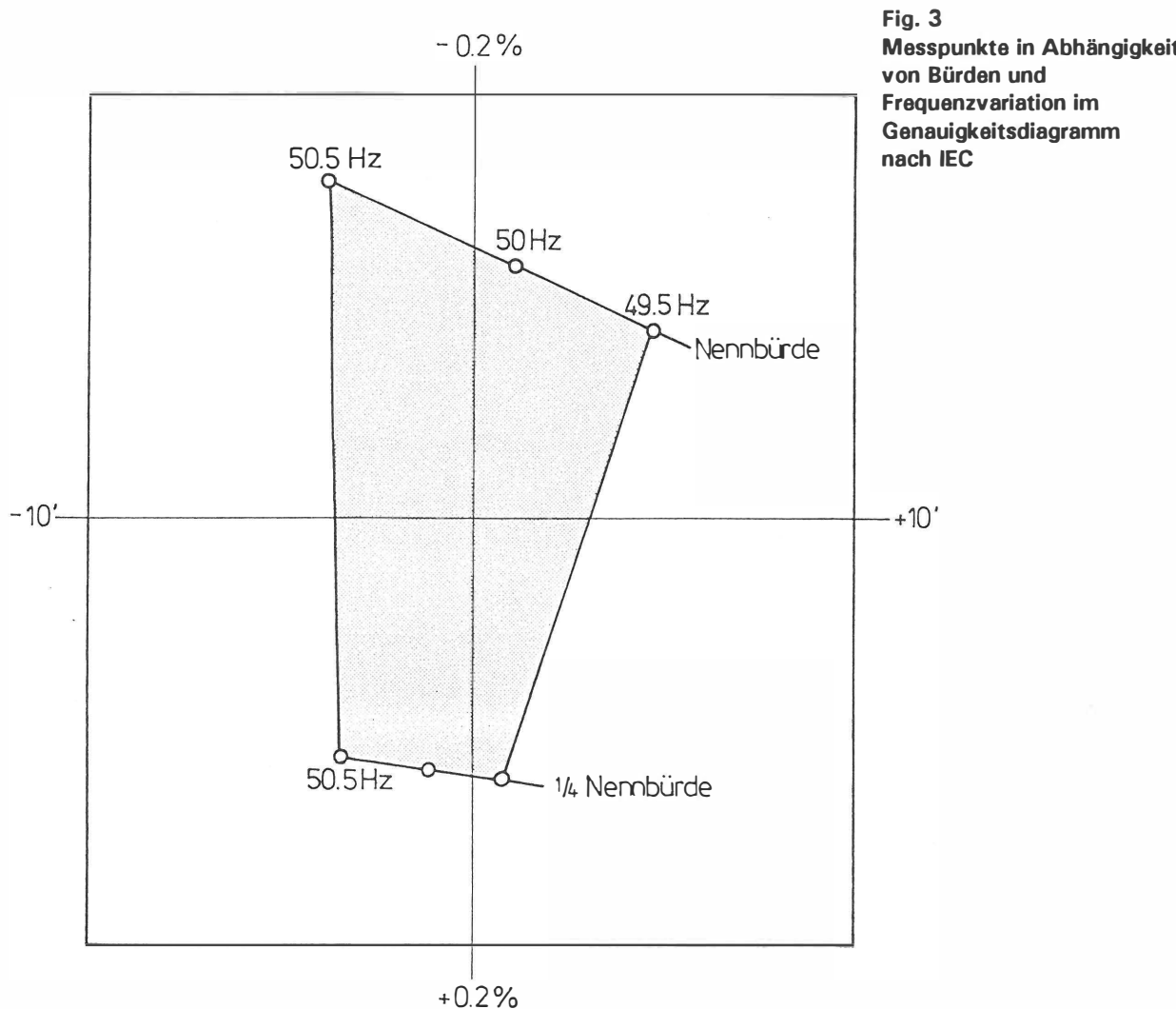


Im kapazitiven Spannungswandler ist die Teilaufgabe der Amplitudenreduktion der Hochspannung im kapazitiven Spannungsteiler konzentriert. Dies eröffnet die konstruktive Möglichkeit eines Baukastensystems für alle Spannungsniveaus und ist daher vor allem auch in den oberen Spannungsklassen durch den nahezu linearen Anstieg der Kosten äusserst konkurrenzfähig. Anderst beim induktiven Spannungswandler wo der Aufwand zur Geräterealisierung mit der Betriebsspannung in etwa quadratisch ansteigt.

Es gehört zur Natur eines Systems, dass sich Teilfunktionen innerhalb eines Systems nicht für sich alleine optimieren lassen. Die Summe aller Anforderungen bestimmen das mögliche Mass der Optimierung des Gesamtsystems kapazitiver Spannungswandler in sich. Die Optimierung beginnt in den meisten Fällen bereits bei der Spezifikation und erfordert die Kenntnisse der einzelnen Abhängigkeiten.

2. Messgenauigkeit

Der grundsätzliche Unterschied gegenüber dem induktiven Spannungswandler mit seinem breiteren Frequenzbereich besteht darin, dass der kapazitive Spannungswandler auf die jeweilige Netzfrequenz abgestimmt sein muss. Der kapazitive Spannungsteiler unter Belastung liefert eine kapazitiv phasenverschobene Ausgangsspannung welche erst durch die abgestimmte Kompensationsinduktivität wieder phasenrichtig gedreht wird.



Netzfrequenzvariationen ($\pm 1\%$ Nennfrequenz gemäss Normen) führen in erster Linie zu Phasenverschiebungen der Ausgangsspannung gegenüber der abzubildenden Hochspannung. Bürdenvariationen (im Bereich von $\frac{1}{4}$ Nennbürde bis Nennbürde gemäss Normen) allein wirken sich vor allem im prozentualen Übertragungsfehler aus.

Das Ausmass des gesamten Fehlerbereiches wird hauptsächlich bestimmt durch das Verhältnis der Grösse der Kopplungskapazität (kapazitiver Blindstrom) und der jeweiligen Bürde (Nutzstrom), sowie der Dimensionierung des Zwischenspannungs - Transformators.

Wie auch beim induktiven Spannungswandler ist insbesondere bei Messwicklungen zu beachten, dass bei mehreren parallelen Sekundärwicklungen eine gegenseitige Genauigkeits - Beeinflussung stattfindet. Dies ist bedingt durch die enge magnetische Kopplung über den gemeinsamen Transformatorkern. Für die genaue Bestimmung des aktuellen Fehlerpunktes ist immer von der Gesamtbürde des Wandlers die insgesamt und gleichzeitig anliegt, auszugehen.

Sind die Anforderungen zweier Sekundärwicklungen genügend verschieden, kann im erforderlichen Falle durch Entkopplung die gegenseitige Beeinflussung verändert und den unterschiedlichen Genauigkeitsanforderungen angepasst, optimiert werden.

Bei den heute tatsächlich benötigten Gesamtbürden können kapazitive Spannungswandler mit Messklasse 0.2 (z.B. für Verrechnungszwecke) ausgelegt werden und sind zur amtlichen Beglaubigung zugelassen. Durch geeigneten Aufbau des Gesamtsystems ist hierzu nachgewiesenermassen sowohl Temperatur- wie auch Langzeitstabilität gewährleistet. Dazu haben nicht zuletzt auch die modernen temperaturunabhängigen Kondensator - Mischdielektriken wesentlich beigetragen.

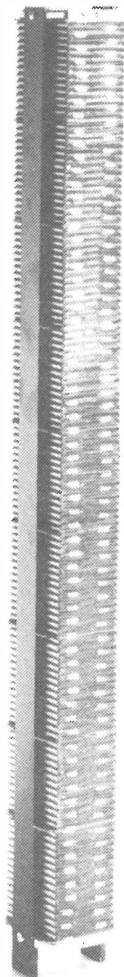


Fig.4
**Stabilitäts - anforderungs-
gerechter Kondensator -
Stapelaufbau**

3. Leitungsschutz

Mehrheitlich wird der kapazitive Spannungswandler in der Leitungsschutztechnik eingesetzt. Eine gesicherte Energieversorgung setzt voraus, dass Netzkurzschlüsse schnell, sicher und selektiv erfasst und abgeschaltet werden. Hierzu ist der kapazitive Spannungswandler ein wichtiges Bindeglied zwischen der Hochspannung und der eigentlichen Signalverarbeitungs- und Schutzebene. Kurze Antwortzeiten der Messsysteme ermöglichen eine wirksame Staffelung des Distanzschutzes.

Eine Grundanforderung besteht darin, dass die beteiligten Wandler möglichst identisches Übertragungsverhalten aufweisen. Dies ist bei identischen kapazitiven Spannungswandlern gegeben. Zusätzlich besteht die Forderung nach grösstmöglicher Amplituden - Übertragungstreue auch bei schnellen Vorgängen, definiert durch die geforderten Eckdaten der Transientenantwort (Restamplitude nach bestimmter Antwortzeit) nach Primärspannungszusammenbruch.

Die Antwortzeit des Spannungswandlers ist mitbestimmend für die Gesamt - Ausschaltverzögerung im Kurzschlussfall.

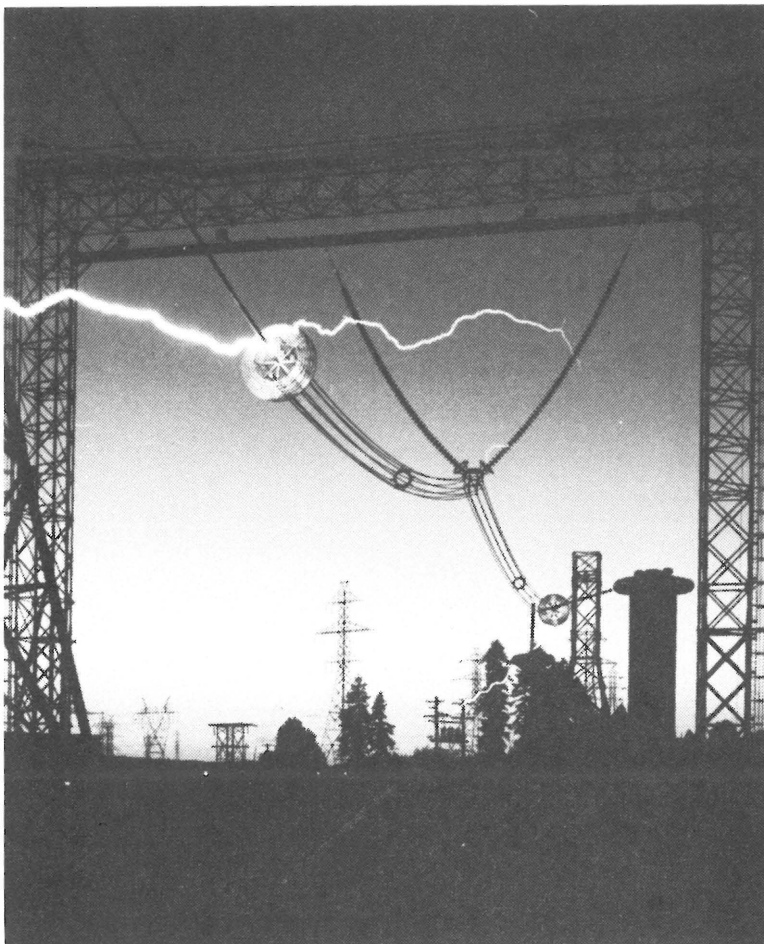


Fig. 5
Provozierter Netzkurzschluss
im Hochspannungs-
Feldversuch

Zwei prinzipielle Zustände sind für die Betrachtung des Ausschwingverhaltens des kapazitiven Spannungswandlers von Bedeutung. Es ist der Fall vom Primärspannungs - Zusammenbruch im Spannungsmaximum einerseits und beim Spannungsnulldurchgang resp. Strommaximum andererseits zu betrachten. In beiden Fällen ist der Haupt - Ausschwingkreis bestimmt durch die Kopplungskapazität bestehend aus Primär- und Sekundärkapazität ($C_1 + C_2$) zusammen mit der Hauptinduktivität L_h des Zwischenspannungs - Transformators und der Kompensationsinduktivität L_k .

Die Hauptausschwingfrequenz f_1 bestimmt sich mit

$$f_1 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{(C_1 + C_2)(L_h + L_k)}} \text{ mit typischen Werten von } \frac{1}{2 \pi \sqrt{56 \text{ nF } 2000 \text{ Hy}}} = 15 \text{ Hz}$$

Alle weiteren Speicherelemente und mögliche Schwingkreise, abgesehen von eventuell aus Ferroresonanz - Gründen notwendige spezifische Dämpfungseinrichtungen (abgestimmte L / C - Kreise) können mangels vergleichbaren Energieinhalten im ersten Ansatz vernachlässigt werden.

Je nach Kurzschlusszeitpunkt ist entweder die Kopplungskapazität ($C_1 + C_2$) oder die Hauptinduktivität L_h der zu entladende Energiespeicher und bestimmt damit den Amplitudenwert der störenden Restschwingung. Dieser ist prinzipiell beeinflussbar durch die Wahl des Teilverhältnisses des kapazitiven Teilers. Bei einer einseitigen Auslegung nur auf diesen spezifischen Punkt hin sind uns aber Grenzen gesetzt. Auch hier ist in erster Linie eine Optimierung verschiedenster Anforderungen an das Gesamtsystem notwendig.

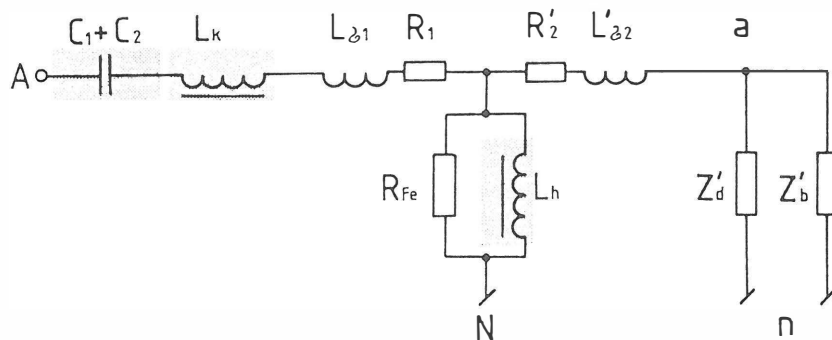


Fig. 6
Energiespeicher des
kapazitiven
Spannungswandlers im
Ersatzdiagramm

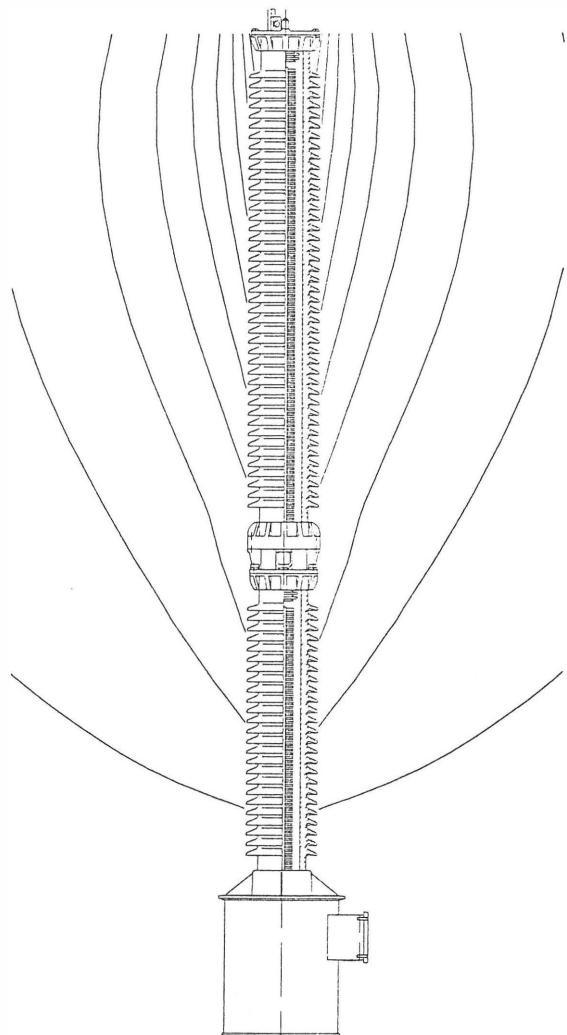
4. Betriebszuverlässigkeit

Betriebszuverlässigkeit beginnt bei der korrekten Gerätespezifikation. Danach obliegt es dem Hersteller, aufbauend auf einer solide entwickelten Baureihe, mit einer spezifisch optimierten Grundauslegung und einer qualitativ hochstehenden Produktion den funktionsgerechten kapazitiven Spannungswandler herzustellen. Eindeutige Beschilderung und eine zweckmässige Betriebs- und Wartungsanleitung ist Voraussetzung für eine problemlose Montage und zuverlässigen Betrieb des Gerätes.

Einmal im Betrieb, sind es meistens die ausserordentlichen Betriebszustände die die Zuverlässigkeit des Gerätes in Frage stellen können. Angefangen bei den dielektrischen Beanspruchungen infolge Überspannungen bis hin zu mechanischen Kriterien sind diese insgesamt für die definitive Auslegung zu berücksichtigen. Offene Kommunikation zwischen Abnehmer und Hersteller bereits in der Angebotsphase führen erfahrungsgemäss zu den best optimierten Lösungen.

Innere und äussere dielektrische Festigkeit sind zu koordinieren. Beim kapazitiven Spannungswandler ist besonders auf die vorteilhafte, natürlich lineare Spannungsaufteilung entlang dem kapazitiven Teiler hinzuweisen. Die, vergleichsweise grosse, innere Hauptisolationsstrecke ist durch die seriegeschalteten Kondensatorelemente gegeben. Gleichzeitig übernehmen diese die äussere Feldsteuerung auch bei steilsten Spannungsimpulsen. Die äussere Festigkeit wird zusätzlich gesteuert durch eine optimierte innere und äussere Kopfkfiguration des Wandlers.

Fig. 7
Elektrisches Feldbild eines
kapazitiven
Spannungswandlers



Wesentlich an der Betriebszuverlässigkeit eines kapazitiven Spannungswandlers beteiligt ist die konstruktive Beherrschung der systemimmanenten Ferroresonanz - Problematik. Ferroresonanz -Schwingungen basieren auf einer Kernsättigung des Zwischenspannungs - Transformators.

Diese können angeregt werden durch

- vorübergehende, kurzzeitige sekundäre Kurzschlüsse,
- schlechte Erdungsverhältnisse,
- Gleichspannungsanteile im Netz
- oder durch vorgängige Sättigung von eventuellen Anpasstransformatoren mit ungenügenden Leistungsdaten,

um nur einige der möglichen Anregungen zu Ferroresonanz des kapazitiven Spannungswandlers zu nennen.

Mittels permanenten wie von Fall zu Fall auch selektiven Dämpfungselementen können kapazitive Spannungswandler zuverlässig und sicher geschützt werden. In modernen kapazitiven Spannungswandlern werden dazu eindeutige und klare Grundelemente verwendet. Diese werden bevorzugt auf der Niederspannungsseite plziert. Mit den heute zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Rechnersimulation solcher Vorgänge lassen sich individuell optimierte Lösungen finden.

Je nach Resonanz - Anfälligkeit der jeweiligen Grundkonfiguration kommen verschiedenen Dämpfungsprinzipien zur Anwendung. Alle diese Dämpfungssysteme haben zum Ziel, entweder eine ferroresonante Schwingung von vornherein zu vermeiden, oder eine einmal angeregte Schwingung möglichst schnell und effizient zu dämpfen.

Kapazitive Spannungswandler können in sich selber ferroresonanzsicher ausgelegt werden. Bei der Auswahl der Dämpfungsart ist immer auch der übrige Anforderungsmix (Transienten - Antwort, Genauigkeit) zu berücksichtigen.

Beim induktiven Spannungswandler tritt Ferroresonanz in Abhängigkeit von sich wandelnden Netzkonfigurationen auf. Bedingt durch die Ausweitung der möglichen Ursachen für Ferroresonanz über den beteiligten Spannungswandler hinaus, kann die Beherrschung der Ferroresonanz für den induktiven Spannungswandler oft weit komplexer ausfallen als für den kapazitiven Spannungswandler.

5. Anforderungskonflikte

Nicht immer sind alle Anforderungen an das Gesamtsystem in der erstmalig vorliegenden Form zu erfüllen. Im speziellen Fall heisst es mit dem Abnehmer zusammen eindeutige Mussanforderungen von eventuellen Wunschzielen zu trennen, nur so ist eine letztlich ökonomische Lösung möglich.

Obwohl die moderne Schutztechnik mit weit tieferen Leistungsdaten operieren kann als früher sind in vielen Spezifikationen und Normen noch immer die ehemals üblichen hohen Bürdenwerte spezifiziert. Die kritiklose Übernahme ist in vielen Fällen sowohl technisch wie auch kostenmässig nicht immer sinnvoll.

Fig. 8
Qualitative Abhängigkeit
einzelner Massnahmen gezeigt
an drei Anforderungen

konstruktive Massnahmen

Hohe Kopplungskapazität	↑	↑	↓
Hohe Transformatorspannung	↑	↑	↓
Ohmsche Grundbelastung	↓	↕	↑
Frequenzselektive Schwingkreise	↕	↓	↑
	Hohe Messgenauigkeit bei gleichzeitig hohem Bürdenbereich	Gute Transienten - Antwort	Ferroresonanz - Freiheit

Anforderungen

Jede Massnahme bei der Auslegung des kapazitiven Spannungswandlers zur Erfüllung einer spezifischen Anforderung ist auf ihren Einfluss auf andere Anforderungen hin zu prüfen. Der Wandler ist optimiert, wenn alle Anforderungen gemäss ihrer Wichtigkeit, zum Nutzen des Anwenders abgestimmt, berücksichtigt wurden.

6. Wahlkriterien

Die spezifischen Eigenheiten des kapazitiven Spannungswandlers ergeben auch eindeutige Wahlkriterien die den Einsatz dieses Wandlertyps favorisieren. Schon ab Systemspannung 245 kV ist mit einem eindeutigen Preisvorteil für den kapazitiven Spannungswandler zu rechnen.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der kapazitive Teiler gleichzeitig als TFH - Kopplungskapazität genutzt werden kann. Diese traditionelle Übertragungsmöglichkeit tritt in der heutigen Zeit mit alternativer Datenübertragung mittels Lichtleitern oder Funk mehr und mehr in den Hintergrund. Trotzdem sind auch heute weltweit noch viele TFH - Systeme zumindest als redundante Signalübertragungsmöglichkeit im Einsatz.

Des weiteren bringt die typischerweise modulare Bauweise des kapazitiven Spannungswandlers verschiedene Vorteile bei Transport und Aufstellung und erlaubt wo gewünscht eine abschnittsweise Überwachung der Betriebszustände der einzelnen Module. Dazu sind individuelle Betriebszustandsanzeigen im Einsatz welche als Frühanzeigen von dielektrischen Fehlern im jeweiligen Modul dienen können.

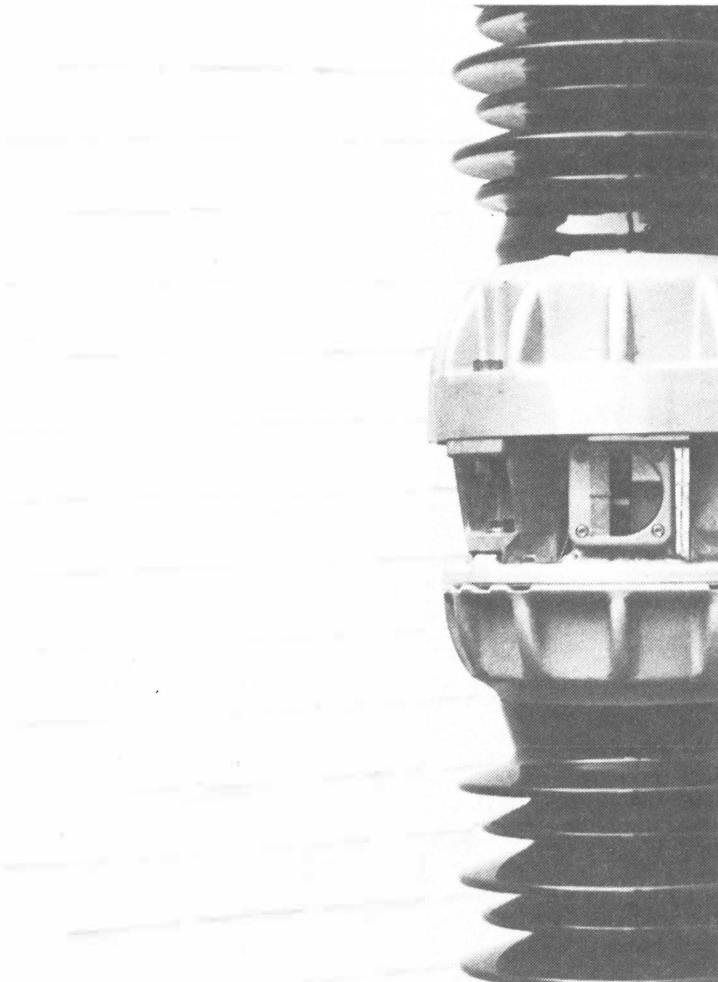


Fig. 9
Kombination zweier
Kondensatoreinheiten mit
Überwachungseinheit
bestehend aus
Balgstellungsanzeige und
Gasindikator

Im Netzsystem richtig platzierte kapazitive Spannungswandler können auch zur bewussten Dämpfung von Überspannungen herangezogen werden. Dies insbesondere bei dafür speziell kritischen Schaltzuständen. Die einlaufende transiente Spannungswelle wird deutlich abgeflacht durch die Kapazität des kapazitiven Spannungswandlers.

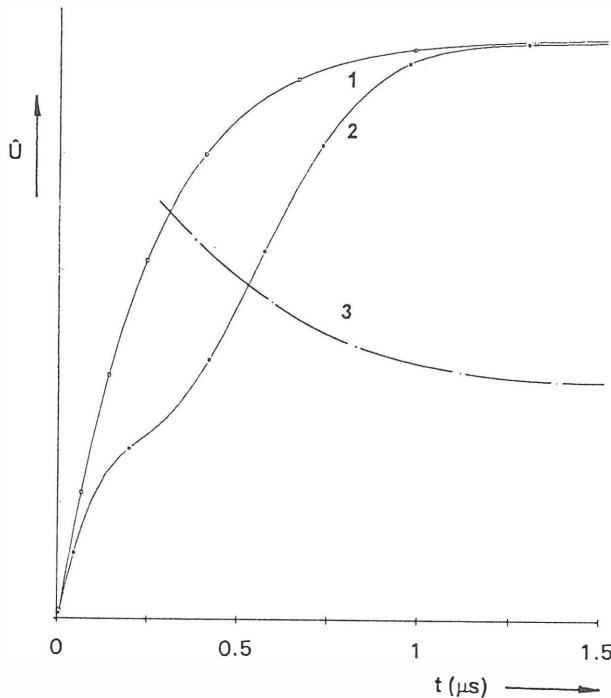


Fig. 10
Prinzip der
Transienten -
abflachung durch kapazitiven
Spannungswandler

1 zu begrenzende,
einlaufende Spannungswelle

2 durch Teilerkapazität
abgeflachte Welle

3 Ableiter -
Ansprechcharakteristik

Der erzielbare Filterungseffekt ist in einem hohen Masse abhängig von den Impedanzverhältnissen des zu schützenden Anlagenteils. Neben der eigentlichen Teilerkapazität sind sowohl Zuleitungen (Induktivität) und Leitungsenden oder - übergänge (Ursprung von Reflexionen) massgebend.

Im Idealfall ist es möglich den Schutz mittels Ableiter auf genügend tiefem Niveau zu realisieren wo dies ohne kapazitiven Spannungswandler nicht möglich wäre.

Andererseits muss neben dem guten transienten Verhalten des kapazitiven Spannungswandlers beachtet werden, dass über ihn keine Gleichspannungsladungen abgeführt werden können.

Im schlimmsten Falle resultieren dadurch kritische Unlinearitäten in der Spannungsverteilung des kapazitiven Teilers (gefangene Ladungen) und/oder Sättigungseffekte auf dem Zwischenspannungstransformator.

7. Entwicklungstendenzen

Moderne kapazitive Spannungswandler haben einen hohen technologischen Stand erreicht. Neue Materialien haben unter anderem zu neuen, verlustarmen Kondensatordielektriken geführt mit wesentlich höheren möglichen Energiedichten bei gleichbleibenden oder sogar höheren elektrischen Festigkeitswerten. Drastische Volumenreduktionen waren damit möglich. Diese neuen Möglichkeiten sind in neue Konstruktionen eingeflossen. Das freie Isolierflüssigkeits -Volumen der Kondensatoren wurde um ein mehrfaches reduziert und setzt damit auch aus Umweltsicht positive Akzente.

Erprobte und optimierte Ferroresonanz - Dämpfungssysteme haben sich etabliert und sind den ursprünglichen Kinderkrankheiten entwachsen.

Die Verbesserungen der Technologie haben allgemein dazu geführt, dass ursprüngliche dielektrischen Ausfälle praktisch eliminiert sind. Der Schwerpunkt liegt heute auf einer qualitativ hochstehenden Produktion im umfassendsten Sinne, welche letztlich nur sichergestellt werden kann durch ein konsequent durchgeführtes Qualitätsmanagement. ISO 9001 setzt hierfür den Massstab.

Technologisch sind auch zukünftig weitere Schritte zur Optimierung des Gesamtsystems abzusehen. Gewandelte Anforderungen (Reduktion der geforderten Bürdenwerte, erwünschte schnellere Transienten - Antwortzeiten) erfordern die Überprüfung der bisherigen Konzepte und eine darauf ausgerichtete neue Optimierung. Neue Materialien und Techniken eröffnen auch zukünftig den Weg zu neuen Lösungen.

Literatur

- | | | |
|----|--|--|
| 1/ | CEI/IEC 186 : 1987
wird ersetzt durch | Voltage transformers
44-2 Induktive Spannungswandler
44-3 (1980) Messgruppen
44-4 (1980) Teilentladungsmessung
44-5 Kapazitive Spannungswandler
44-7 Elektronische Spannungswandler |
| 2/ | CEI/IEC 358 : 1990 | Coupling capacitors and capacitor dividers |
| 3/ | VDE 0414 Teil 1/12.70 | Bestimmungen für Messwandler |
| 4/ | VDE 0414 Teil 4/8.73 | Besondere Bestimmungen für kapazitive Spannungswandler |
| 5/ | ANSI C93.1 - 1990 | Power-Line Carrier Coupling Capacitors and Coupling Capacitor Voltage Transformers (CCVT) - Requirements |
| 6/ | Peter Matthiessen | Haefely Publikation D 2S 10
1972 Elektrische Messwandler |