

Anforderungen an Hochspannungswandler für Mess- und Schutzzwecke

Dipl. -Ing. W. Hadick, Energie-Versorgung Schwaben AG, Stuttgart

In Netzen der elektrischen Energieversorgung sind Hochspannungswandler wichtige Betriebsmittel, auf die nicht verzichtet werden kann. Hierbei handelt es sich im Prinzip um Spannungs- bzw. Stromtransformatoren verhältnismäßig kleiner Leistung. Auslegung und Bauart werden im wesentlichen von den spezifischen Anforderungen ihres jeweiligen Einsatzfalles bestimmt. In diesem Bericht genannte Anforderungen an Hochspannungswandler beschränken sich im wesentlichen auf Angaben zu Leistung und Genauigkeit, zum Übertragungsbereich und zum Verhalten bei Ausgleichsgliedern. Sie geben die Ansichten eines EVU wieder und können nicht unbedingt als repräsentativ angesehen werden.

1. Aufgaben der Hochspannungswandler

Hochspannungswandler werden im wesentlichen für folgende Aufgaben benötigt:

- Umwandlung der Hochspannung und der auf Hochspannungspotential fließenden Ströme in für Meßinstrumente und Zähler geeignete und gefahrlose Größen unter Einhaltung der jeweils erforderlichen Genauigkeit.
- Überwachung des Netzes, d.h., Übermittlung der in Störungsfällen auftretenden Ströme und veränderten Betriebsspannungen an die Selektivschutzeinrichtungen.

Für diese beiden Aufgabengebiete, nämlich Messung/Zählung und Schutz, sind ganz unterschiedliche Arbeitsbereiche der Meßwandler maßgebend. Bei Messung und Zählung geht es um die Erfassung von Betriebswerten. Das bedeutet gute Abbildungstreue und Einhaltung der geforderten Genauigkeitsklasse, bei Spannungswandlern im Bereich der Nennspannung und bei Stromwandlern von Null bis zum einfachen, evtl. auch zweifachen Wandlerennstrom. Dem Stromwandler fällt hier bekanntlich auch die Aufgabe zu, die sekundär angeschlossenen, gegen hohe Überströme empfindlichen Geräte zu schützen.

Für Schutzaufgaben dagegen ist eine verzögerungsfreie Übertragung und eine amplituden- und phasengetreue Abbildung in großen Bereichen von entscheidender Bedeutung. Der Spannungsbereich reicht z.B. von etwa 50 mV bis etwa 1,8-facher Nennspannung, der Strombereich von etwa 0,2- bis 100-fachem Wandlemennstrom. Für die Stromwandler kommt erschwerend hinzu, daß bei den meisten Kurzschlußvorgängen im Netz, auf die die Schutzeinrichtungen reagieren müssen, grundsätzlich mit Gleichstromgliedern infolge Verlagerung des Kurzschlußstromes zu rechnen ist.

Ein Versagen der Hochspannungswandler ist gleichbedeutend mit dem Ausfall der Messung, der Zählung und vor allem des Schutzes. Für einen sicheren Netzbetrieb müssen daher die Wandler sowohl richtig bemessen und ausgewählt werden als auch hohe Zuverlässigkeit aufweisen.

Bis heute werden überwiegend Hochspannungswandler eingesetzt, die auch den erhöhten Leistungsanforderungen der elektromechanischen Meß- und Schutztechnik im wesentlichen genügen. Hiervon ausgehend wird jeweils der Versuch gemacht, geänderte Anforderungen bei Einsatz neuer Techniken zu formulieren.

2. Anforderungen an Hochspannungswandler für Meßzwecke.

2.1. Spannungswandler

Im allgemeinen werden für Meß- und Schutzaufgaben eine gemeinsame Wicklung, aber getrennt abgesicherte Kreise verwendet. Für induktive Wandler werden bisher Leistungen von 30 VA bis 75VA, KL. 0,5 bzw. 150 VA, KL. 1 gefordert, je nach Spannungsebene (s. Tab. 1). Bei den eingesetzten kapazitiven Spannungswandlern begnügt man sich mit der Klasse 1 bzw. 3 bei den entsprechenden Leistungen.

Der Schutz gab bei den Leistungsanforderungen für die gemeinsame Meß-/Schutzwicklung bisher den Ausschlag. Deshalb werden die weiteren Aussagen hierzu unter Punkt 3.1 gemacht.

Für die Zählung sind beglaubigungsfähige Wandler bzw. Wicklungen erforderlich. Während bei Mittelspannungszählungen auch separate Spannungswandler eingesetzt werden, werden in der Hoch- und Höchstspannung separate Zählwicklungen verwendet. Ihre Leistungen betragen 25 (50) VA, KL. 0,2 (0,5), wie in der Tabelle 1 angegeben. Eine Reduzierung der Leistung für die Zählung erscheint möglich. Werte von 10 (20) VA, KL. 0,2 (0,5) sollten ausreichend sein (sh. Tab. 2). Da häufig Zählung von Wirk- und Blindleistung erfolgen muß und Abrechnungs- und Vergleichszählung gefordert ist, sind weitere Leistungsabsenkungen wohl kaum mehr zu erwarten.

2.2 Stromwandler

Für Messung, Zählung und Schutz werden im allgemeinen getrennte Stromwandlerkerne verwendet. Ausnahmen gibt es insbesondere im Bereich der Mittelspannung, z.B. kann ein zusätzlicher Aufsteckwandler in nur einem Leiter ausreichend sein und gegenüber separaten Meßkernen die wirtschaftlichere Lösung darstellen.

Von der Meßwicklung werden zur Zeit durchweg Leistungen von 15 (30) VA, KL. 0,5 G (1 G), M 10 (5) und von der Zählwicklung solche von 15 (30) VA, KL. 0,2 G (0,5 G), M 10 (5) gefordert, wie auch in Tab. 3 angegeben.

Tendenziell werden für Meßaufgaben gegenüber früher weniger anzeigende Meßgeräte benötigt, dafür aber mehr Meßumformer. Der Leistungsbedarf ändert sich dadurch nicht nennenswert.

An die Zählwicklungen werden vermehrt statische Zähleinrichtungen anzuschließen sein, deren Leistungsaufnahme ist aber der von elektromechanischen Zählern ähnlich.

Dennoch erscheinen Leistungsreduzierungen möglich. In Tabelle 4 wird vorgeschlagen, künftig die Meßwicklung für eine Leistung von 10 (20) VA, KL. 0,5 G (1 G), M 10 (5) und

die Zählwicklung für 5 (10) VA, KL. 0,2 G (0,5 G), M 10 (5) auszulegen.

Leistungsmäßig unnötig hoch ausgelegte Meß-/Zählwicklungen haben entsprechende Unterbürdungen zur Folge. Dadurch geht dann aber die strombegrenzende Wirkung des Wandlermeßkerns bei größeren Kurzschlußströmen zum Teil verloren.

Die Auslegung von Meß- und Zählwicklung als Großbereichswandler ist notwendig, weil durch die Möglichkeit der primären Wandlernennstromumschaltung immer alle Kerne gemeinsam umgeschaltet werden und der Schutzkern vorteilhafterweise auf einen möglichst hohen Nennstrom geschaltet wird.

3. Anforderungen an Hochspannungswandler für Schutzzwecke.

Die Schutzeinrichtungen in den Hochspannungsnetzen aller Spannungsebenen sind heute noch überwiegend elektromechanischer Bauart. Erst im Verlauf von vielen Jahren werden diese nach und nach durch statische Einrichtungen ersetzt.

3.1 Spannungswandler

Während elektromechanische Schutzeinrichtungen die Spannungswandler mit bis zu 100 VA und mehr belasten konnten, haben statische Schutzeinrichtungen im allgemeinen nur noch eine Leistungsaufnahme im Spannungspfad von ≤ 1 VA. Demnach ist es zulässig, auch die Leistung der Meß-/Schutzwicklung von Spannungswandlern zu reduzieren. Unter Beachtung des möglichen Anschlusses mehrerer Schutzeinrichtungen an eine Spannungswandlerwicklung und des gleichzeitigen Anschlusses von einzelnen Meßinstrumenten und Meßumformern, letztere eventuell mit Speisung aus der Meßspannung selbst, erscheint eine Wandlerleistung von 10 (20) VA in KL. 0,5 (1) für alle Hochspannungsebenen ausreichend (sh. a. Tab. 2).

Die Spannungswandlerwicklung muß aber so dimensioniert sein, daß im Fall eines sekundären Kurzschlusses ein Schutzschalter innerhalb etwa 10 ms ansprechen und einen Hilfskontakt betätigen kann. Der Schutz benötigt diese schnelle Information zwecks rechtzeitiger Unwirksamschaltung seiner Unterimpedanzanregung. Hinsichtlich des Nennspannungsfaktors gelten auch in Zukunft die bisherigen Anforderungen. Die Forderungen der Schutzgerätetechnik werden von induktiven Spannungswandlern im allgemeinen gut erfüllt.

3.1.1 Besonderheiten bei kapazitiven Spannungswandlern

Kapazitive Spannungswandler haben ein induktives Basisteil und stellen vereinfacht gesehen auf 50 Hz abgegliche Schwingkreise dar. Zusätzliche Dämpfungsschaltungen zur Unterdrückung von stationären Kippschwingungen haben ebenfalls Einfluß auf das Übertragungsverhalten des Wandlers bei Schalthandlungen.

Plötzliches Zusammenbrechen der Primärspannung an einem kapazitiven Wandler führt in Abhängigkeit von dessen Zeitpunkt zu Schwingungen mit hohem Scheitelwert und Frequenzen oberhalb etwa 200 Hz und kurzer Abklingzeit, sowie zu einer Schwingungsamplitude bis etwa 10 % der sekundären Nennspannung und Frequenzen kleiner etwa 25 Hz und ca. 100 ms Abklingzeit bzw. zu einer Überlagerung dieser beiden Ausgleichsschwingungen. Die Scheitelwerte und Abklingzeiten dieser Schwingungen hängen vom Momentanwert der Primärspannung, von der Ausführung des Aktivteils und von der Beladung ab.

Da im Störfall die Amplituden der Ausgleichsschwingungen viel höher sein können als die der 50 Hz-Meßgröße, der Schutz seine Entscheidungen aber innerhalb der ersten 20 bis 30 ms nach Störungseintritt treffen muß, gibt es für den Schutz meßtechnische Probleme. Durch Inkaufnahme nennenswerter Kommandozeitverlängerungen und den Einsatz zusätzlicher Speicherschaltungen für die Fehlerrichtungsmessung können diese Schwierigkeiten meist beherrscht werden. Aus diesen Gründen aber wird der kapazitive Spannungswandler vielfach abgelehnt.

Besondere Bedämpfungseinrichtungen an den Wandlern haben meistens den Nachteil, daß sie auch die Meßgröße selbst verfälschen. Aktive elektronische Bedämpfungsschaltungen stellen zudem eine weitere Störungsquelle dar.

Aus schutztechnischer Sicht sollten die in den bisherigen Wandlervorschriften enthaltenen Fehlergrenzen drastisch reduziert werden. So sollte die sekundärseitige Ausgleichsschwingung bei primärseitigem Kurzschluß innerhalb von 10 ms auf $\leq 4\%$ und binnen 20 ms auf $\leq 2\%$ der Sekundärspannung vor Kurzschlußeintritt abgeklungen sein (sh. a. Tab. 2).

Beim zeitlichen Abklingen der Ausgleichsvorgänge nach Auftrennung eines sekundärseitigen Kurzschlusses können eventuell Erleichterungen zugestanden werden, wenn das zu kleineren Fehlern bei Primärkurzschlüssen führen sollte.

3.1.2 Besonderheiten bei kapazitiven Teilern mit Verstärker.

In einigen metallgekapselten SF₆-isolierten 110 kV- und 380 kV-Schaltanlagen sind seit nunmehr über 10 Jahren als Spannungswandler kapazitive Teiler mit nachgeschalteten elektronischen Verstärkern eingesetzt. An diese Verstärker wurden seinerzeit u.a. folgende Anforderungen gestellt:

- Separate Verstärker für Schutz und Messung mit je 10 VA Ausgangsleistung, KL. 0,2, 0,5 < COS φ < 1 ind.
- Potentialtrennung zwischen Ein- und Ausgang.
- Von den kapazitiven Teilern herrührende Restladungen dürfen zu keiner Sättigung des Ausgangsübertragers führen, auch nicht bei einem kompletten KU-Vorgang.
- Kurzschlußfester Ausgang
- Sowohl bei sekundärem Kurzschluß als auch bei Hilfsspannungsausfall Kontaktmeldung zur Sperrung der Unterimpedanzanregung innerhalb von 4 ms.
- Bei Primärkurzschlüssen zu beliebigem Zeitpunkt, bei Aufhebung eines Sekundärkurzschlusses, sowie auch bei Spannungszuschaltung mittels Trenner oder Leistungsschalter, müssen die Ausgleichsschwingungen innerhalb 10 ms auf einen Wert $\leq 2\%$ der Nennausgangsspannung abgeklungen sein.
- Überwachung der Ausgangsspannung durch Vergleich mit der Eingangsspannung mit Störmeldung. Dabei sind fehlerhafte Erkennungen zu unterdrücken, z.B. bei Trennerschaltungen in der Anlage.

Ein verhältnismäßig hoher elektronischer Schaltungsaufwand, sowie beachtliche Prüf- und Reparaturaufwendungen sind der Preis für die Erfüllung der genannten notwendigen technischen Anforderungen. Bei weiterem Einsatz solcher Verstärker müssen diese wesentlich weniger Elektronik-Hardware benötigen, eine möglichst vollständige Selbstüberwachung sämtlicher Funktionen und sehr hohe Zuverlässigkeit aufweisen.

3.2 Stromwandler

Amplituden- und phasentreue Stromübertragung durch die Wandler sind eine wichtige Voraussetzung für eine zuverlässige und richtige Fehlereinmessung durch die Schutzeinrichtungen. Mit Rücksicht auf Netzstabilität, Schadensminimierung und Versorgungsqualität der Abnehmer im Störfall, werden von den Schutzeinrichtungen Kommandozeiten ab z.B. 20 ... 30 ms gefordert. Dies bedeutet aber, daß die Schutzeinrichtungen ihre Meßgrößenverarbeitung meistens dann durchführen müssen, während das bei den meisten Kurzschlußvorgängen zu Beginn im Kurzschlußstrom enthaltene Gleichstromglied noch im Abklingen ist.

Daher ist das Verhalten der Stromwandler bei diesen transienten Vorgängen von großer Bedeutung und bei ihrer Projektierung und Dimensionierung zu beachten. Mit welcher Genauigkeit die Gleichstromkomponente selbst übertragen wird, ist nur von geringer Bedeutung. Die Schutzeinrichtungen können nämlich durch geeignete Meßwertverarbeitung solches leichter berücksichtigen als z.B. starke Verzerrungen der Meßgröße infolge Wandler sättigung.

3.2.1 Stromwandler mit geschlossenem Eisenkern

Stromwandler ohne Kernluftspalt übertragen bei entsprechender Dimensionierung die Gleich- und Wechselstromkomponente eines Kurzschlußstromes mit hoher Genauigkeit. Die Remanenz solcher Wandler ist sehr hoch. Dadurch bleibt die bei einem Kurzschlußstrom erreichte Induktion nach Abschaltung nahezu erhalten. Folgt nun ein zweiter Kurzschlußvorgang, z.B. im Verlauf einer erfolglosen Kurzunterbrechung, so steigt der Fluß im Kern auf den doppelten Wert an und bleibt nach Abschaltung ebenfalls nahezu erhalten. Der Abbau des Flusses erfordert Zeiten bis zu mehreren Minuten.

Weil bei vollverlagerten Kurzschlußströmen der magnetische Fluß im Wandlerkern ein Vielfaches des Flusses bei stationären Kurzschlußströmen beträgt, müssen Wandlerkerne ohne Luftspalt sehr große Eisenquerschnitte aufweisen, um solche Ströme sättigungsfrei übertragen zu können. Die erforderliche Höhe der Kernüberdimensionierung bzw. des Transientfaktors ist stark abhängig von der Zeitkonstanten des Gleichstromglieds, also von der Netzzeitkonstanten.

Die für Schutzzwecke noch häufig eingesetzten Stromwandler der Klasse 10 P 10 bzw. 10 P 20 sind nur für die Übertragung stationärer Kurzschlußströme ausgelegt. Insbesondere für den Einsatz in Mittelspannungsnetzen mit den dort vorherrschenden kleinen Netzzeitkonstanten sind diese Wandler ohne größere Nachteile für den Schutz einsetzbar. Stromwandler 500/1A, 10 VA, KL.5P20 in 20-kV-Leitungen dürften den Anforderungen beim Einsatz statischer Schutzeinrichtungen voll genügen und sind wirtschaftlich vertretbar.

Diese Wandler können bei einer Kurzschlußleistung von etwa 250 MVA (Einspeisenähe eines 40-MVA-Umspanners) zwar nur bis zu Netzzeitkonstanten von etwa 10 ms sättigungsfrei übertragen (Bürdenfaktor ca. 0,33, Kurzschlußfaktor ca. 0,8). Kurzschlußstrom und Netzzeitkonstante nehmen aber mit zunehmender Fehlerentfernung schnell ab, so daß bei Fehlern gegen Ende eines Stromkreises im allgemeinen ausreichend gute Übertragungseigenschaften vorliegen und die Schutzeinrichtungen zufriedenstellend arbeiten können.

Höhere Anforderungen müssen schon an die Wandler der Mittelspannungseinspeisungen gestellt werden. An diese Wandler wird auch der Transformator-Differentialschutz angeschlossen. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse für unterschiedliche Stromwandler und Bebürdungen durch elektromechanischen und statischen Schutz wiedergegeben. Während der eisengeschlossene Wandler 600/1A, 30 VA, 10P10 auf der 110-kV-Transformatorseite wegen seines hohen Nennstromes und der starken Unterbürdung bis zu Netzzeitkonstanten von etwa 69 ms bei 20-kV-seitigen Kurzschlüssen sättigungsfrei bleibt, geht der 20-kV-seitige Wandler 600/5A G, 30VA, 10P10 bei vollverlagertem Kurzschlußstrom und 50 ms Netzzeitkonstante bereits nach etwa 1 ms in Sättigung. Hier ist der Differentialschutz überfordert, eine andere Wandlerdimensionierung ist notwendig.

In den höheren Spannungsebenen steigen die Netzzeitkonstanten an, und die eisengeschlossenen Wandler genügen den Anforderungen oft nicht mehr. Ein Praxisbeispiel ist in Tabelle 6 wiedergegeben. In einer 220-kV-Anlage waren Stromwandler 600/1A G, 60 VA, 10P10 eingesetzt. Der einpolige Kurzschlußstrom betrug bis zu $45 \times I_n$ und die Bebürdung ca. 11 VA beim elektromechanischen und etwa 5 VA beim statischen Schutz. Trotz der starken Unterbürdung trat bereits nach kürzester Zeit Sättigung ein, was dann zu Problemen beim Sammelschienenschutz führte.

Aus den genannten Gründen werden in den Höchstspannungsnetzen heute nur noch, und in den 110-kV-Hochspannungsnetzen meistens sogenannte Linearwandler der Klasse TPZ eingesetzt.

3.2.2 Stromwandler mit Linearkern

Linearwandler der Klasse TPZ haben im Eisenkern verteilte Luftspalte, so daß sich durch den erhöhten Magnetisierungsstrom schon im stationären Betrieb ein Winkelfehler von etwa 3° ergibt. Die Luftspalte bewirken außerdem bei der Übertragung der Gleichstromkomponente erhebliche Fehler. Die Abbildung der Wechselstromkomponente erfolgt jedoch mit guter Genauigkeit.

Der eigentliche Vorteil der Linearwandler liegt in der kleineren Zeitkonstante des Sekundärkreises. Eine kleine Zeitkonstante bewirkt ein deutlich langsames Ansteigen des Flusses während der Übertragung und ein schnelles Abklingen des Flusses nach Abschaltung des Kurzschlußstromes. Ferner sind bei Linearwandlern wesentlich geringere

Kernquerschnitte erforderlich als bei Wandlern ohne Luftspalt mit gleichen Übertragungseigenschaften.

Betrachtet man nun das Übertragungsverhalten von Linearwandlern für die Praxisfälle in den Tab. 5 und 6, so werden deren wesentlich bessere Eigenschaften deutlich. Im Beispiel des 20-kV-Wandlers im Transformatorfeld (Tab. 5) wurde der eisengeschlossene Wandler 600/5A G, 30 VA, 10 P 10 ersetzt durch einen Linearwandler Klasse TPZ, 1250/1A, 5W. Dieser Wandler überträgt bei Nennbebürdung und $T_n = 50$ ms einen vollverlagerten Kurzschlußstrom von 7kA dauernd sättigungsfrei. Selbst bei einer Bebürdung mit 15Ω (el.-mech. Schutz) wie beim gen. eisengeschlossenen Wandler, beginnt bei $T_n = 50$ ms die Sättigung frühestens nach ca. 9 ms. Der Differentialschutz würde hierbei stabil bleiben. Ein Anschluß moderner statischer Schutzeinrichtungen beseitigt hier das Problem der Wandlersättigungen völlig.

Der Einsatz von Linearwandlern war auch im Beispiel der Tab. 6 eine gute Lösung. Die Wandler 600/1A G, 60VA, 10P10 wurden durch Linearwandler 1200/1A, 5W, TPZ ersetzt. Diese Wandler sind so ausgelegt, daß sie 40kA vollverlagert und $T_n = 75$ ms für eine Dauer von 50 ms sättigungsfrei übertragen können. Letzteres ist gleichzusetzen mit einer 40kA dauernd sättigungsfreien Übertragung bei $T_n = 50$ ms. Selbst bei annähernd doppelter Nennbürde (el.-mech. Schutz) übertragen diese Linearwandler bis $T_n = 70$ ms sättigungsfrei. Eine Bürdenverringerung bei Anschluß von statischen Schutzeinrichtungen bringt weitere Induktionsabsenkungen. Es wäre aber kein guter Weg, die Leistung der Linearwandler zu erhöhen, um dann durch entsprechend höhere Unterbürdungen deren Übertragungsverhalten verbessern zu wollen. Hier ist zu bedenken, daß sich bei Unterbürdung die Zeitkonstante des Sekundärkreises erhöht. So bewirkt z.B. eine 50 %ige Ausbürdung nur eine gut 1,2-fach höhere Strombelastbarkeit bei $T_n = 50$ ms und dauernd sättigungsfreie Übertragung. Umgekehrt läßt eine um nur 25 % erhöhte Strombelastbarkeit des Linearwandlers eine Erhöhung der Außenbürde auf etwa doppelte Nennbürde zu, bei sonst gleichen Übertragungseigenschaften. Diese Zahlenbeispiele gelten für eine Innenbürde von ca. 4.5Ω .

Der Vorschlag für Stromwandlerkenndaten in Tab. 4 erscheint zweckmäßig und ausreichend, solange die Kurzschlußströme und Netzzeitkonstanten in den Hoch- und Höchstspannungsnetzen die in den Anmerkungen genannten Werte nicht wesentlich übersteigen.

4. Optische Strom– und Spannungswandler

Optische Strom– und Spannungswandler befinden sich seit einigen Jahren in der Entwicklungsphase. Es werden erste Erfahrungen mit Prototypen gemacht. Dabei wird meist die gewonnene strom– oder spannungsproportionale Größe in eine elektrische umgewandelt, verstärkt und den Analogeingängen, z.B. des Schutzes, zugeführt. Schon zu diesem frühen Zeitpunkt sollte auf einige den Schutztechnikern wichtig erscheinende Punkte hingewiesen werden:

- Bei künftigen optischen Wandlern sollten Verfahren bevorzugt werden, die keine elektronischen Bauelemente auf Hochspannungspotential benötigen. Passive Wandler sollten demnach angestrebt werden.
- Die über LWL übertragenen strom–/spannungsproportionalen Größen (z.B. Drehwinkel von polarisiertem Licht) sollten nach entsprechender Umsetzung über eine serielle kompatible Schnittstelle und LWL dem Schutz zugeführt werden. Das setzt voraus, daß Wandler– und Schutzhersteller gemeinsam die Schnittstelle, Datenstruktur und Übertragungsprozeduren zu einem möglichst frühen Zeitpunkt festlegen.
- Bei der A/D–Wandlung der optischen strom–/spannungsproportionalen Größen ist weitestgehende Selbstüberwachung notwendig. Interne Störungen sind unverzüglich zu signalisieren.
- Der A/D–Wandler der optischen spannungsproportionalen Größen muß in der Lage sein, bei eigenen Störungen innerhalb von 5 ms dieses dem Schutz mitzuteilen, damit die Sperrung der Unterimpedanz–Anregfunktion rechtzeitig und sicher erfolgen kann.
- Es ist zu beachten, daß neben dem Schutz auch andere Dienste (Messung, Zählung, ...) rückwirkungsfrei anschließbar sein müssen.

Hinsichtlich Zuverlässigkeit und Wartungsaufwand sind die Erwartungen bei neuen Wandlern sehr hoch. Sie müssen sich hier mit den bestehenden konventionellen Wandlern vergleichen lassen.

5. Zusammenfassung/Ausblick

In allen Hochspannungsebenen sind zur Zeit noch überwiegend elektromechanische Schutzeinrichtungen im Einsatz. Deshalb werden noch vielfach die Strom- und Spannungswandler für den höheren Leistungsbedarf dieser Relais ausgelegt. Inzwischen werden Neuanlagen praktisch nur noch mit statischen Schutzeinrichtungen ausgerüstet. Leistungsreduzierungen bei den Strom- und Spannungswandlern sind hier möglich und technisch sinnvoll. Kapazitive Spannungswandler für kleinere Leistungen sollten aber nennenswerte Verbesserungen im Schwingungsverhalten erfahren. Für den Anschluß schneller statischer Schutzeinrichtungen kommen in Hoch- und Höchstspannungsnetzen bevorzugt Linearwandler TPZ mit kleiner Leistung zum Einsatz. Ihr Vorteil ist besseres transientes Übertragungsverhalten.

Künftige optische Wandler sollten keine Elektronik auf Hochspannungspotential benötigen, eine serielle kompatible Schnittstelle für den LWL-Anschluß des Schutzes und anderer Dienste haben, weitgehende Selbstüberwachung aufweisen und sehr zuverlässig sein.

Literatur

- (1) Lipken, H. und Nöller, J.H.: Beitrag zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens von Stromwandlern für Schutzzwecke. Elektrizitätswirtschaft, Jg. 74 (1975), Heft 8
- (2) Müller, W.; u.a.: Schutztechnik in elektrischen Netzen. Elektrokolleg, VDE-Verlag, 2. Auflage 1993, S. 199
- (3) Halama, W.; u.a.: Meßwandler für Hochspannungsnetze. Lehrgang TAE, 30. und 31.10.1978.

Spgs. - ebene:	20kV	110kV		220kV	400kV	
Wandlerart :	induktiv	induktiv	kapazitiv	kapazitiv	kapazitiv	induktiv (GIS)
<u>Meß-/Schutzwickl.:</u>						
Leistung, Klasse	30VA, Kl0,5 ¹⁾	50(150)VA, Kl0,5(1)	50(150), Kl1 (3)	50(150), Kl1 (3)	75VA, Kl0,5	75(150), Kl0,5 (1)
<u>Zählwicklung</u> ¹⁾						
Leistung, Klasse	50VA, Kl0,5	25(50)VA, Kl0,2(0,5)			25VA, Kl0,2	25(50)VA, Kl0,2(0,5)
Nennspgs - faktor	$1,9 \cdot U_n$ 8h	$1,9 \cdot U_n$ 8h	$1,9 \cdot U_n$ 8h	$1,9 \cdot U_n$ 30s	$1,5 \cdot U_n$ 30s $1,9 \cdot U_n$ 1s	$1,5 \cdot U_n$ 30s $1,9 \cdot U_n$ 1s
Nennkapazität			5 nF	5 nF	5 nF	
Besonderheit			Schwingverh. 2) 4)	Schwingverh. 3) 4)	Schwingverh. 3) 4)	

1) beglaubigungsfähig

- 2) 3) Bei einem primärseitigen Kurzschluß zum Zeitpunkt des Spgs-Nulldurchganges sowie des Spgs-maximums muß die sekundärseitige Ausgleichsschwingung
- 2) binnen 20ms auf $\leq 10\%$
- 3) binnen 10ms auf $\leq 8\%$ und binnen 20ms auf $\leq 4\%$
des Scheitelwertes der Sekundärspannung vor Kurzschlußeintritt abgeklungen sein. Gilt für Bürde 0VA u. Nennbürde
- 4) Nach Auftrennung eines sekundärseitigen Kurzschlusses zum Zeitpunkt des Stromnulldurchganges müssen alle Ausgleichsvorgänge binnen 100ms soweit abgeklungen sein, daß kein Scheitelwert der Sekundärspannung um mehr als 10% vom Sollwert abweicht. Diese Bedingung ist für den primären Spannungsbereich $0,8 \cdot U_n \div 1,9 \cdot U_n$ bei sekundärseitig nicht bebürdetem Wandler einzuhalten.

Tab. 1

Kenndaten von Spannungswandlern bei der EVS, 1993

Spgs - ebene:	M - spannung	Hochspannung		Höchstspannung	
Wandlerart:	induktiv	induktiv	kapazitiv	induktiv	kapazitiv
<u>Meß-/Schutzwickl. :</u>					
Leistung/Klasse	10(20)VA,Kl,0,5(1)	10(20)VA,Kl,0,5(1)	10(20)VA,Kl,0,5(1)	10(20)VA,Kl,0,5(1)	10(20)VA,Kl,0,5(1)
<u>Zählwicklung:</u> ¹⁾					
Leistung/Klasse	10(20)VA,Kl,0,2(0,5)	10(20)VA,Kl,0,2(0,5)	10(20)VA,Kl,0,2(0,5)	10(20)VA,Kl,0,2(0,5)	10(20)VA,Kl,0,2(0,5)
Nennspgs - faktor	$1,9 \cdot U_n$ 8h	$1,9 \cdot U_n$ 8h	$1,9 \cdot U_n$ 8h	$1,5 \cdot U_n$ 30s $1,9 \cdot U_n$ 1s	$1,5 \cdot U_n$ 30s $1,9 \cdot U_n$ 1s
Nennkapazität					
Besonderheit ⁴⁾			Schwingverh. 2) 3)		Schwingverh. 2) 3)

- 1) beglaubigungsfähig
- 2) Bei einem primärseitigen Kurzschluß zum Zeitpunkt des Spgs-Nulldurchganges sowie des Spgs-maximums muß die sekundärseitige Ausgleichsschwingung binnen 10ms auf $\leq 4\%$ und binnen 20ms auf $\leq 2\%$ des Scheitelwertes der Sekundärspannung vor Kurzschlußeintritt abgeklungen sein. Gilt für Bürde 0VA u. Nennbürde
- 3) Nach Auftrennung eines sekundärseitigen Kurzschlusses zum Zeitpunkt des Stromnulldurchganges müssen alle Ausgleichsvorgänge binnen 100ms soweit abgeklungen sein, daß kein Scheitelwert der Sekundärspannung um mehr als 10% vom Sollwert abweicht. Diese Bedingung ist für den primären Spannungsbereich $0,8 \cdot U_n \div 1,9 \cdot U_n$ bei sekundärseitig nicht bebürdetem Wandler einzuhalten
- 4) Bei sekundärseitigem Kurzschluß muß ein Schutzschalter innerhalb von 10ms ansprechen und einen Hilfskontakt betätigen können (Unwirksamschaltung der Z-Anregung). Gilt in allen Fällen.

Tab. 2 Vorschlag für Kenndaten von Spannungswandlern, nur für statischen Schutz

Spgs - Ebene Schutz - Bauart	20-kV-Leitungsfeld		20-kV-Umspannerfeld	
	elektromech.	statisch	elektromech.	statisch
Messung :	Aufsteckwandler sekundär umschaltb. 400-200/1A bzw. 200-100/1A ¹⁾ 5VA Kl.1 M5			1250/1A 10VA, Kl.1 M5
Zählung :	15(30)VA, Kl.0,2(0,5) M10(5)		15(30)VA, Kl.0,2(0,5) M10(5)	
Schutz :	2x200/5A, 30VA Kl.10P10	500/1A, 10VA Kl. 5P20	600/5A G, 30VA Kl. 10P10	1250/1A lin, 5W bei $\cos\beta=1$, $\delta=180'$ Kl.1 ²⁾

Spgs - Ebene	110kV	220kV	380kV
Messung :	4x300/1A, 15 (30)VA, Kl.0,5G (1G) M10 (5)	2x600/1A, 15 (30)VA, Kl.0,5G (1G) M10 (5)	2x600/1A, 15 (30)VA, Kl.0,5 (1) ext.240% M10 (5)
Zählung :	4x300/1A, 15 (30)VA, Kl.0,2G (0,5G) M10 (5)	—	Kern1 = Kern2 (Beglaubigt) 2x600/1A, 5 (10)VA Kl.0,2 (0,5) ext.200% M10 (5)
Schutz :	4x600/1A lin, 5W : 3) 15W : 4)	2x1200/1A lin, 5W : 5) 15W : 4)	Kern4 = Kern5 2x1200/1A, lin, 5W : 6) 15W : 4)

- 1) Bei einer Bürde von minimal 3VA mit $\cos\beta=1$ und $I_{\text{prim}} = 14\text{kA}$ darf $I_{\text{sek max}}$ mal 10A betragen.
Der Wandler muß bei offenem Sekundärkreis spannungsfest sein, und zwar bei primärem Nennstrom dauernd und bei primär 14kA für mindestens 1s.
- 2) Bei einer Netzzeitkonstanten von $T_n=50\text{ms}$ muß ein voll verlagertes Kurzschlußstrom von $I_k = 7\text{kA}$ dauernd sättigungsfrei übertragen werden.
- 3) Bei 5W Bürde in 600/1-Schaltung müssen 21kA voll verlagert und $T_n=50\text{ms}$ für eine Dauer von 50ms ohne Sättigung übertragen werden
- 4) Bei 15W Bürde gilt Kl.5P40, jedoch Stromfehler bei Nennstrom $\pm 1\%$, $\delta=180' \pm 9'$
- 5) Wie ³⁾, jedoch Schaltung 1200/1 u. 40kA bei $T_n=75\text{ms}$ für 50ms sättigungsfrei
- 6) Wie ³⁾, jedoch Schaltung 1200/1 u. 38kA bei $T_n=100\text{ms}$ für mind. 50ms ohne Sättigung

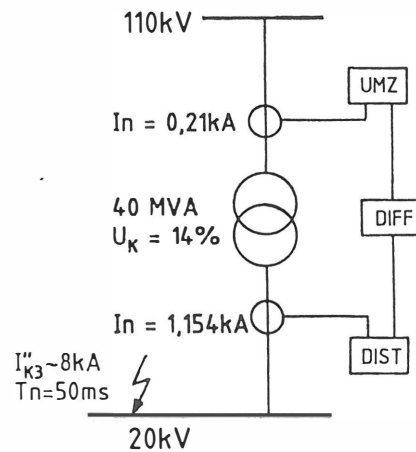
Tab. 3 Kenndaten von Stromwandlern bei der EVS, 1993

Spgs – ebene Schutz – Bauart	20-kV-Leitungsfeld		20-kV-Umspannerfeld	
	elektromech.	statisch	elektromech.	statisch
Messung :	Aufsteckwandler sekundär umschaltb. 400-200/1A bzw. 200-100/1A ¹⁾ 5VA Kl.1 M5		—	1250/1A 10VA, Kl.1 M5
Zählung :	5VA, Kl.0,5, M10		5VA, Kl.0,5, M10	
Schutz :	2x200/5A, 30VA Kl.10P10	500/1A, 10VA Kl. 5P20	600/5A G, 30VA Kl. 10P10	1250/1A lin, 5W bei $\cos\beta=1$, $\delta=180'$ Kl.1 ²⁾

Spgs – ebene	110kV	220kV	380kV
Messung :	4x300/1A, 10 (20)VA Kl.0,5G (1G) M10 (5)	2x600/1A, 10 (20)VA Kl.0,5G (1G) M10 (5)	2x600/1A, 10 (20)VA Kl.0,5 (1) ext.240% M10 (5)
Zählung :	4x300/1A, 5 (10)VA Kl.0,2(0,5) ext.240% M10(5)	2x600/1A, 5 (10)VA Kl.0,2(0,5) ext.240% M10(5)	Kern1 = Kern2 (Beglaubigt) 2x600/1A, 5 (10)VA Kl.0,2 (0,5) ext.240% M10 (5)
Schutz :	4x600/1A lin, 5W : 3) 15W : 4)	2x1200/1A lin, 5W : 5) 15W : 4)	Kern4 = Kern5 2x1200/1A, lin, 5W : 6) 15W : 4)

- 1) Bei einer Bürde von minimal 3VA mit $\cos\beta=1$ und $I_{\text{prim}} = 14\text{kA}$ darf I_{sek} maximal 10A betragen.
Der Wandler muß bei offenem Sekundärkreis spannungsfest sein, und zwar bei primärem Nennstrom dauernd und bei primär 14kA für mindestens 1s.
- 2) Bei einer Netzzeitkonstanten von $T_n=50\text{ms}$ muß ein voll verlagter Kurzschlußstrom von $I_K = 7\text{kA}$ dauernd sättigungsfrei übertragen werden.
- 3) Bei 5W Bürde in 600/1-Schaltung müssen 21kA voll verlagert und $T_n=50\text{ms}$ für eine Dauer von 50ms ohne Sättigung übertragen werden
- 4) Bei 15W Bürde gilt Kl.5P40, jedoch Stromfehler bei Nennstrom $\pm 1\%$, $\delta=180'\pm 9'$
- 5) Wie ³⁾, jedoch Schaltung 1200/1 u. 40kA bei $T_n=75\text{ms}$ für 50ms sättigungsfrei
- 6) Wie ³⁾, jedoch Schaltung 1200/1 u. 40kA bei $T_n=100\text{ms}$ für mind. 50ms ohne Sättigung

Tab. 4 Vorschlag für Kenndaten von Stromwandlern, nur für stat. Schutz



$$\text{Kurzschlußfaktor } KF = I''_{K3} / I''_{KN} =$$

I''_{KN} überträgt der Wandler bei Nennbebürdung sättigungsfrei bei



$T_n = 0$ für Wandler ohne Luftspalt, ($TF_N = 1$)

$T_n = 50 \text{ ms}$ für Wandler mit Luftspalt, ($TF_N = 7,3$)

$$\text{Bürdenfaktor } BF = (R_i + R_a) / (R_i + R_{an})$$

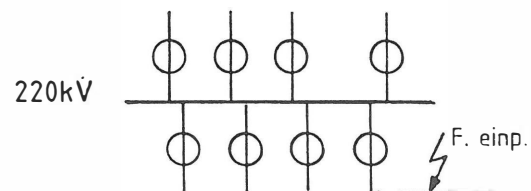
$$\text{Transientfaktor } TF = TF_N \cdot \frac{1}{KF \cdot BF}$$

Der Transientfaktor gibt für $KF = 1$ und $BF = 1$ das Vielfache von I''_{KN} an, bis wohin der Wandler noch sättigungsfrei überträgt.

 110kV	600/1A 30VA,10P10 $R_i \sim 3\Omega, R_a \sim 3\Omega$	600/1A lin, 5W, $T_w = 60\text{ms}$ $\delta = 180^\circ, R_i \sim 4,5\Omega, R_a \sim 3\Omega$	 20kV	600/5A G,30VA,10P10 $R_i \sim 0,12\Omega, R_a \sim 0,6\Omega (15\text{VA})$	1250/1A lin, 5W, $T_w = 60\text{ms}$ $R_i \sim 4,5\Omega, R_a \sim 3\Omega$	1250/1A lin, 5W, $T_w = 60\text{ms}$ $R_i \sim 4,5\Omega, R_a \sim 15\Omega$
		21kA werden b.Nennbürde sättigungsfrei übertragen, $T_n = 50\text{ms}$, vollverlagert.			7kA werden bei Nennbürde u. $T_n = 50\text{ms}$ dauernd sättigungsfrei übertragen	
I''_{KN}	6kA (10x600A)	21kA	I''_{KN}	6kA (10x600A)	7kA	7kA
I''_{K3}	1,45kA	1,45kA	I''_{K3}	8kA	8kA	8kA
KF	0,24	0,07	KF	1,33	1,143	1,43
BF	0,182	0,79	BF	0,546	0,79	2
TF	22,9	132	TF	1,38	8,1	3,2
bei $T_n = 50\text{ms}$ Sättigung nach	keine	keine	bei $T_n = 50\text{ms}$ Sättigung nach	$\sim 1\text{ms}$	keine	$\sim 8 \div 9\text{ms}$
dauernd sätti- gungsfr. Über- trag. bis $T_n =$	69ms	Für $T_n = 50\text{ms}$ sättigungs- freie Übertragung bis $KF \sim 1,14$	dauernd sätti- gungsfr. Über- trag. bis $T_n =$	$\sim 1\text{ms}$	$\sim 61\text{ms}$	$\sim 13\text{ms}$

Tab. 5

Verhalten der Stromwandler im Transformatorfeld 110-/20kV



$$I''_{K1} \leq 27 \text{ kA}$$

$$T_n \leq 50 \text{ ms}$$

$$\text{Kurzschlußfaktor } KF = I''_K / I''_{KN} =$$

$$\text{Bürdenfaktor } BF = (R_i + R_a) / (R_i + R_{an})$$


$$\text{Transientfaktor } TF = TF_N \cdot \frac{1}{KF \cdot BF}$$

I''_{KN} überträgt der Wandler bei Nennbebürdung sättigungsfrei bei

$T_n = 0$ für Wandler ohne Luftspalt, ($TF_N = 1$)

$T_n = 50 \text{ ms}$ für Wandler mit Luftspalt, ($TF_N = 7,3$)

Der Transientfaktor gibt für $KF = 1$ und $BF = 1$ das Vielfache von I''_{KN} an, bis wohin der Wandler noch sättigungsfrei überträgt.

 220kV	600/1A G, 60VA, 10P10, $R_i \sim 3\Omega$		1200/1A lin, 5W, $T_w = 60 \text{ ms}$, $\delta = 180^\circ$, 40kA für 50ms sättigungsfrei bei $T_n = 75 \text{ ms}$ u. Bn. $R_i \sim 5\Omega$	
	$R_a \sim 11\Omega$ [el.-mech.Sch.]	$R_a \sim 5\Omega$ [stat.Schutz]	$R_a \sim 11\Omega$ [el.-mech.Sch.]	$R_a \sim 5\Omega$ [stat.Schutz]
I''_{K1}	27kA	27kA	27kA	27kA
I''_{KN}	6kA (10x600A)	6kA	40kA	40kA
KF	4,5	4,5	0,675	0,675
BF	0,22	0,13	1,6	1
TF	1	1,7	6,8	10,8
bei $T_n = 50 \text{ ms}$ Sättigung nach:	$\ll 1 \text{ ms}$	$\sim 2,5 \text{ ms}$	keine	keine
sättigungsfreie Übertragung bis T_n :	—	$\sim 3 \text{ ms}$	$\sim 70 \text{ ms}$	$\sim 130 \text{ ms}$

Tab. 6

Verhalten der Stromwandler in einem 220-kV-Leitungsfeld