Methode zur messtechnischen Beurteilung der LEMP-Schutzwirksamkeit von Erdungs- und Potentialausgleichsmassnahmen am Beispiel eines Unterwerks der Elektrizitätsversorgung

Dr. Reinhold Bräunlich

FKH Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

Kurzfassung

Der Beitrag beschäftigt sich mit der messtechnischen Untersuchung von Blitz- und Schalttransientenbeeinflussungen der Sekundäranlagen in Unterwerken.

Die am häufigsten angewendeten Messungen von Längs- und Querspannungen an Signalkabeladern während der Applikation von Blitzstromimpulsen oder während Schalthandlungen erlauben im wesentlichen die Beurteilung von Massnahmen der Schirmung und Schirmverbindung leittechnischer Komponenten und Kabel. Diese Messungen erfassen den obersten Frequenzbereich der Störungseinkopplungen (einige 100 kHz und darüber). Eine Beurteilung von Erdungs- und Potentialausgleichsmassnahmen erfordert aber Untersuchungen im Bereich tieferer Frequenzen (einige kHz). Bei den genannten Längs- und Querspannungsmessungen kann dieser Schirmausgleichsströmen Frequenzbereich wegen den und wegen den Signalüberlagerungen im MHz-Bereich nicht erfasst werden.

Zur Ergänzung der Längs- und Querspannungsmessungen an Signalleitungen wird eine Messung an ungeschirmt verlegten Litzen vorgeschlagen. Diese werden an einem Ende geerdet und am anderen Ende mit einer grossen Kapazität von einigen 10 μ F beschaltet. Durch Stromstösse in das Erdungssystem oder durch Schalthandlungen werden solche Litzen zu Schwingungen bei Frequenzen von einigen kHz angeregt.

Aus der Spannungsamplitude der Schwingungen über der Kapazität und dem zeitlichen Integral das Stossstroms wird ein Kopplungsfaktor K_s bestimmt, welcher die EMV-Eigenschaften der Erdungsanlage und des Potentialausgleichs charakterisiert. Der genannte Kopplungsfaktor ist sowohl von der Erdleiterführung am Ort der Störquelle wie auch von jener am Ort der Störsenke abhängig.

Als besonders einfache und praxisnahe Variante der Methode wird die Schwingungsanregung der Litzen durch das betriebsmässige Zuschalten eines leerlaufenden Hochspannungskabelabgangs empfohlen, da der Aufladevorgang des Kabels einen reproduzierbaren, annähernd rechteckigen Stromstoss erzeugt.

1 Einführung

Beeinflussungen der Sekundäranlagen von Unterwerken durch das elektromagnetische Feld von Blitzschlägen (LEMP) und durch Schalthandlungen im Hochspannungsnetz wurden seit Jahrzehnten immer wieder eingehend untersucht. Besonders motiviert wurden diese Bemühungen mit dem Einzug elektronischer Komponenten in die Leittechnik aber auch wegen der sehr hochfrequenten Vorgänge bei Schalthandlungen in gasisolierten Schaltanlagen (GIS). Durch die Einführung entsprechender Normen und Empfehlungen [1] ... [5] und durch gezielte Entwicklungsarbeiten der Anlagenhersteller sind wirksame Massnahmen für den LEMP-Schutz und die elektromagnetische Ver-

träglichkeit (EMV) zwischen Primär- und Sekundäranlagen heutzutage Standard geworden.

Die IEC-Normengruppe 61312 [1] gibt eine Übersicht über die Schutzmassnahmen gegen LEMP. Sie lassen sich methodisch in zwei Gruppen unterteilen:

- 1) Gebäudeseitige Massnahmen am Erdungssystem: Einbezug der Gebäudearmierung, Einbindung aller Anlageteile, Potentialausgleich.
- Massnahmen an der zu schützenden Infrastruktur selbst: Schrank- und Kabelschirmungen, Verkabelungstechnik, Beschaltungen mit Schutzelementen.

Demzufolge werden heute nebst einer lückenlosen Schirmung der Leittechnik–Komponenten und der zugehörigen Signalkabel, mit entsprechendem Mehraufwand auch wesentliche Verbesserungen bezüglich Erdung und Potentialausgleich realisiert [6]... [16]. Bei GIS wird ein hoher Vermaschungsgrad im Erdungssystem mit Einbindung aller metallischer Gebäudestrukturelemente und aller Anlagenteile gefordert.

Bei wichtigen Anlagen mit hoher Verfügbarkeitsanforderung, z.B. an kritischen Orten der öffentlichen Energieversorgung wird die Wirksamkeit der getroffenen Massnahmen häufig am fertiggestellten System überprüft. Dabei wird die Auswirkung künstlicher, mit reduzierter Intensität erzeugter LEMPs oder die Auswirkung von Schalthandlungen in den empfindlichen Anlagenteilen gemessen [17]. Die registrierten Transienten (z.B. Längs- und Querspannungen an leittechnischen Signalkabeln) werden auf die erwarteten tatsächlichen LEMP-Einwirkungen von Blitzschlägen hochgerechnet und mit den zulässigen Maximalpegeln verglichen [18]. Mit der Methode der Längs- und Querspannungsmessungen kann die Wirkung von Schirmung und Schirmverbindungen bei hohen Frequenzen bewertet werden (Massnahmengruppe 2).

Eine Beurteilung der unter 1) genannten Massnahmen des Potentialausgleichs und Erdungssystems ist insbesondere wegen der hohen Realisierungskosten ebenfalls von grossem Interesse. Man stösst hierbei aber auf die Schwierigkeit, dass bei den vorgenannten üblichen EMV-Messungen die günstigen Auswirkungen eines feinvermaschten Erdungssystems mit einer engen Einbindung aller empfindlicher Anlageteile nicht befriedigend bewertet werden kann. Dies bedeutet, dass bei Längsund Querspannungsmessungen zwischen den Wirkungen der beiden obengenannten Massnahmengruppen nicht unterschieden werden kann und dass die Signale im ausschlaggebenden mittelfrequenten Bereich von einigen kHz durch Schirmströme und HF-Überlagerungen nicht auswertbar sind.

In der vorliegenden Arbeit wird deshalb eine einfache, ergänzende Methode beschrieben, welche die Massnahmengruppe 1), d.h. die gebäudeseitigen Erdungs- und Potentialausgleichsmassnahmen, für sich allein bewertet.

2 Messmethode

Das vorgeschlagene Verfahren nutzt die Tatsache, dass sich Erdungs- und Potentialausgleichsmassnahmen (Massnahmengruppe 1) vor allem im spektralen Bereich bis ca. 100 kHz auswirken. Von hochfrequenz-dichten Gebäudeabschirmungen wird hier abgesehen, zumal bei derart geschirmten Unterwerken die Kosten kaum tragbar wären. Die Massnahmengruppe 2 (Schirmung von Leitungen und Komponenten) betrifft im wesentlichen den höheren Frequenzbereich, ca. 100 kHz – 100 MHz.

Die vorgestellte Methode kann am bestehenden Objekt oder an der noch in Bau befindlichen Anlage angewendet werden:

Ausgehend von einem zentralen Ort in der Anlage, z.B. von der Leitwarte, werden einzelne ungeschirmte Litzen, nach Möglichkeit sternförmig, durch das Gebäude verlegt, wobei die wichtigsten bestehenden oder vorgesehenen Kabelwege benützt werden. Am Endpunkt, meist an der Anlagenperipherie, werden diese Litzen mit der bestehenden Gebäude- oder Aussenerdung verbunden. Am zentralen Messort werden die ankommenden Litzen einzeln je mit einer Kapazität der Grössenordnung 100 μF mit möglichst hoher Güte belastet.

Ein impulsartiges Magnetfeld erzeugt über der Kapazität eine messbare abklingende Schwingung mit der Resonanzfrequenz im kHz-Bereich, welche sich aus der Induktivität der Erdschleife über die Litze und die Abschlusskapazität ergibt. Die Auswirkung geeigneter reproduzierbarer Stromstösse, z.B. Blitzstromimpulse an möglichen Einschlagsorten des Gebäudes oder auch Stromstösse eines Einschaltvorgangs kann damit quantitativ aus der Schwingungsamplitude bewertet werden.

Ein niederinduktiver Potentialausgleich im Gebäude bzw. ein hoher Vermaschungsgrad des Erdungssystems äussert sich durch eine geringe magnetische Kopplung und damit durch eine kleine Schwingamplitude. Der Effekt wirkt sich dabei sowohl bei der Störquelle wie auch bei der Störsenke aus:

- Bei einer zweckmässig angeordneten Erdungsanlage fliesst der anregende Stromimpuls (Störquelle) in einer minimiert kleinen Erdungsschleife und teilt sich auf mehrere Pfade auf.
- Die ausgelegte Messlitze (Störsenke) spannt mit dem Erdungssystem ebenfalls eine kleine Leiterschleife auf.

Die beschriebene "Schwinglitzen-Methode" erlaubt somit eine Bewertung der EMV-Massnahmengruppe 1 (Erdung und Potentialausgleich).

Im folgenden wird das Messprinzip durch ein einfaches elektrisches Modell erläutert. Wegen des auf einige kHz beschränkten Frequenzbereichs können Laufzeiterscheinungen vernachlässigt werden. Bild 1 zeigt das Ersatzschema für die Anregung einer kapazitiv beschalteten Litze durch einen Stossstrom in einer definierten Leiterschleife.

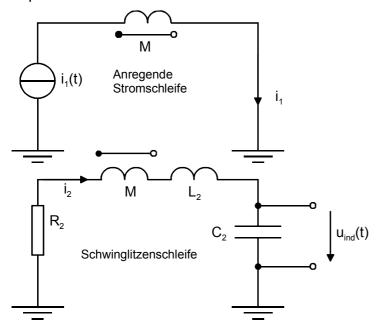


Bild 1: Ersatzschema zur Beschreibung der Einkopplung eines Stromstosses in eine Schwinglitze

Mit den in Bild 1 eingeführten Schaltelementen lautet die Übertragungsfunktion im Laplacebereich:

$$\frac{U_{ind}}{I_1} = \frac{s \cdot M}{s^2 \cdot C_2 L_2 + s \cdot R_2 C_2 + 1} = \frac{M}{C_2 L_2} \cdot \frac{s}{\left(s + \frac{R_2}{2L_2}\right) + \frac{1}{C_2 L_2} - \frac{R_2^2}{4L_2^2}} \tag{1}$$

Im Zeitbereich ergibt sich hieraus die Impulsantwort:

$$\frac{u_{ind}(t)}{I_{1,0}} = \frac{M}{C_2 L_2} \cdot e^{-t/\tau} \cdot \left(\cos(\omega_0 t) - \frac{1}{\omega_0 \cdot \tau} \cdot \sin(\omega_0 t) \right)$$
mit:
$$\tau = \frac{2L_2}{R_2} \quad \text{und} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_2 \cdot C_2} - \frac{R_2^2}{4L^2}}$$

Erfolgt die Anregung der Schwinglitze in einer kürzeren Zeitdauer Δt als eine Viertelperiode $T_0/4$ der Litzenresonanzschwingungen, d.h.:

$$\Delta t < \frac{1}{4} T_0 = \frac{1}{4} 2\pi / \omega_0 , \qquad (3)$$

so verhält sich die erste maximale Amplitude zu Beginn des Ausschwingvorgangs $u_{ind,max}$ proportional zum zeitlichen Integral des anregenden Stroms. D.h. es wird:

$$u_{ind,\max} \cong \int_{M} i \cdot dt \frac{M}{C_2 L_2} = Q_1 \cdot \frac{M}{C_2 L_2} = Q_1 \cdot M \cdot \omega_0^2$$
(4)

Das Maximum der Ausschwingspannung $u_{ind,max}$ ist somit proportional zur Gegeninduktivität M zwischen der anregenden Stromschleife und der Schwinglitzenschleife. Günstigerweise ist diese Amplitude in erster Näherung unabhängig von der Länge der Litze, da diese sowohl in die Gegeninduktivität M wie auch in die Selbstinduktivität L_2 etwa proportional eingeht. Ihr Einfluss hebt sich deshalb im Nenner und Zähler auf. Es ist aber darauf zu achten, dass die Bedingung (3) für eine ausreichend tiefe Schwingfrequenz, die von der Litzenlänge abhängt, stets erfüllt ist.¹

Aus Gleichung (4), letzter Term, lässt sich erkennen, dass bei der Optimierung der Komponenten ein Kompromiss einzugehen ist: Die Schwingamplitude und mit ihr die Messempfindlichkeit nimmt mit dem Quadrat der Schwingfrequenz zu. Der Integrationsfehler für den anregenden Strom nimmt mit ansteigender Frequenz aber unter Umständen ebenfalls zu.

Als Bewertungskriterium für Störeinkopplung durch Blitzeinschläge und Schalthandlungen kann nun ein dimensionsloser Impulskopplungsfaktor K_s eingeführt werden:

$$K_s = u_{ind,\max} \cdot C_2 / \int_{\Delta t} i_2 \cdot dt = u_{ind,\max} \cdot C_2 / Q_1$$
 (5)

Bild 2 zeigt Matlab-Simulationen der Integration von Impulsströmen mit einer kapazitiv beschalteten Schwinglitze. Die Integrationsfehler lagen unter 10 %. Diese Abweichungen werden aber in Anbetracht des verhältnismässig groben Zwecks des Verfahrens als akzeptabel angesehen.

Den Simulationen lagen folgende Daten der Litze und ihrer Beschaltung zu Grunde: L_2 =50 μ H, R_2 =0.12 Ω , C_2 =120 μ F, M=40.0 nH;

Hier besteht eine Analogie zur Integrationsbedingung von Impulsen bei der schmalbandigen Teilentladungsmessung [19].

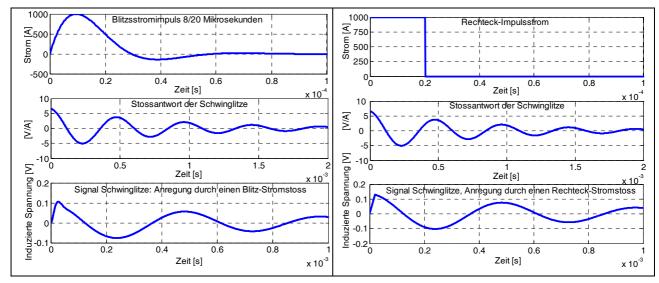


Bild 2: Simulation der Integration eines Stosstromimpulses der Form 8/20 μs (links) und eines Rechteckstromstosses von 20 μs Dauer (rechts) bei einer Schwinglitzenmessung. Man beachte die unterschiedlichen Zeitmassstäbe, durch welche die Signalformen besser sichtbar gemacht werden

3 Praktische Messungen

Der in einem abgeschirmten Gehäuse untergebrachte Oszillograf und die variable Kondensatorbatterie zur Beschaltung der Schwinglitzen ist in Bild 3 zu sehen.



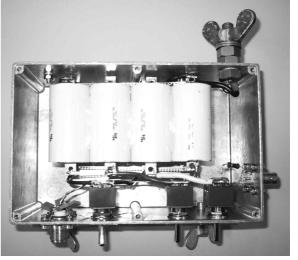


Bild 3: Messeinrichtung zur Erfassung der induzierten Spannungen an den Schwinglitzen.

Links: Abgeschirmte Messbox mit angeklemmtem Kondensatorgehäuse,

(Litzenabgang gegen die Blickrichtung, Erdungsband nach links)

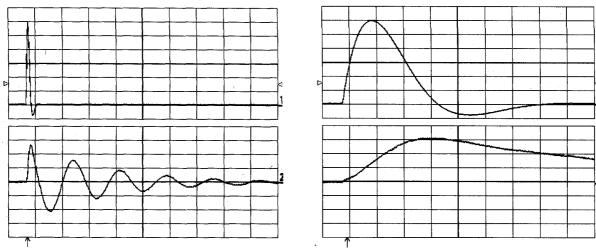
Rechts: Blick in das Innere des Kondensatorgehäuses

Die Erdungsverbindung zum Anschlusspunkt an die Anlagenerdung geht in die Messung ein und sollte deshalb möglichst kurz und niederinduktiv ausgeführt werden. Um einige Schwingungsperioden mit dem Oszillografen verfolgen zu können, muss der Schwingkreis aus Litze und Abschlusskapazität eine ausreichende Güte (>5) besitzen. Es wurde ein Kupferlitzenquerschnitt von 2.5 mm² verwendet. Ausserdem wurden Kondensatoren mit kleinem Verlustfaktor (Polystyrol- oder Polypropylen-Dielektrikum)

eingesetzt. Zur Unterdrückung der höherfrequenten Magnetfeldeinkopplungen im MHz-Bereich wurden die Kondensatoren in ein HF-dichtes Gehäuse eingebaut, der Litzeneingang mit zusätzlichen Vielschichtkondensatoren und der Messausgang mit einem Dämpfungsglied beschaltet. Ebenso musste eine ausreichend hohe Eigenresonanzfrequenz der Kondensatoren durch eine "extended-foil"-Konstruktion und durch kurze Anschlussleiter sichergestellt werden.

3.1 Labormessungen

Zur Untersuchung der Schwinglitzenfunktion wurden zunächst Simulationen im Labor bei schwachen Stossströmen von einigen Ampere durchgeführt. Die Versuchsanordnung entsprach dem im Bild 1 angegebenen Prinzipschema, wobei sowohl für den Stossstrom als auch für die Litze je eine Leiterschleife von einigen Metern Länge ausgelegt wurde. Bild 4 zeigt die mit dieser Anordnung erzeugten Oszillogramme bei Anregung mit einem Stromstoss der Form 8/20 us.



Horizontal: 0.2 ms/div, Horizontal: 10 μs/div,

Vertikal oben: 1A/div unten 20 mV/div Vertikal oben: 1A/div unten 20 mV/div

Bild 4 Oszillogramme einer Schwinglitzen-Labormessung mit einem Versuchsaufbau nach dem Prinzipschema im Bild 1 und einem anregenden Stosstromimpuls der Form 8/20 μ s. Die obere Kanalaufzeichnung zeigt jeweils die Stromform, die untere das Antwortsignal über der Kapazität C_2

Die Werte der Litzeninduktivität und der Beschaltungskapazität lagen in der selben Grössenordnung wie bei der Computer-Simulation (Bild 2) im vorangehenden Abschnitt:

$$L_2$$
=74 µH, R_2 =1.1 Ω , C_2 =140 µF,

3.2 Feldversuche mit Stromstössen in die Blitzschutzanlage eines Unterwerks mit einer gasisolierten Innenraum-Schaltanlage (GIS)

Die beschriebene Methode wurde in einem modernen Unterwerk mit 110-kV-GIS des Elektrizitätswerks des Kantons Zürich (EKZ) getestet, wo die Wirksamkeit eines besonders engmaschigen Erdungssystem nachzuweisen war. Bild 5 zeigt die Verlegung der ungeschirmten Litzen im Unterwerk, an welchen eingekoppelte Schwingspannungen bei Anregung mit verschiedenen Stromimpulsen gemessen wurden.

Die transiente Magnetfelder wurden mittels eines Stossgenerators durch Stromimpulse in die Fangleiter der Blitzschutzanlage am Dach des Unterwerks erzeugt (Bild 6, siehe auch Prinzipschaltung, Bild 7 und Oszillogramm, Bild 8).

Anstelle eines Normblitzstosses wurde für diese Messung eine Stossform mit möglichst steiler Front angestrebt, da zusammen mit den beschriebenen Versuchen gleichzeitig noch weitere EMV-Messungen vorgenommen werden sollten. Für die Litzenanregung ist dies von geringer Bedeutung, da die Methode lediglich eine definierte Stossladung Q_2 notwendig macht, welche der Auswertung der Kopplungsfaktoren zugrunde liegt. Diese Ladung ist jeweils aus dem Stossstromoszillogramm zu ermitteln.

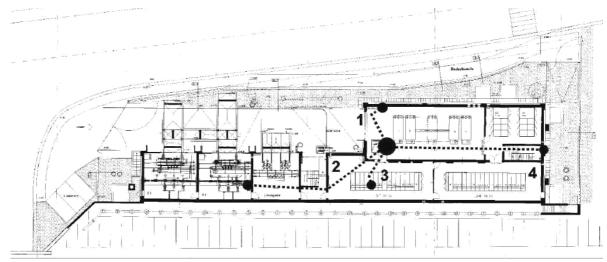


Bild 5 Grundriss des untersuchten Unterwerks mit eingezeichneter Lage der verlegten Schwinglitzen. Der grosse zentrale Punkt im GIS-Raum bezeichnet die Messstelle, wo die Schwinglitzen mit der Kapazität beschaltet wurden. An den peripheren kleineren Punkten wurden die Schwinglitzen geerdet



Bild 6 Prüfaufbau zur Injektion von Stromstössen in das Blitzschutzsystem am Unterwerksdach.

(1) Stossgenerator, (2) Blitzfangleiter auf dem UW-Dach, (3) Gegenerdung an den Trafoschienen, (4) niederinduktive Drahtgeflechtzuleitung

Der über alle verlegte Litzen gemittelte Wert der Impulskopplung K_s wurde als Gütekriterium für den Potentialausgleich herangezogen (Resultate siehe Abschnitt 3.4).

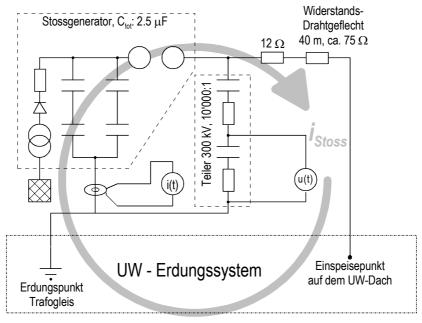
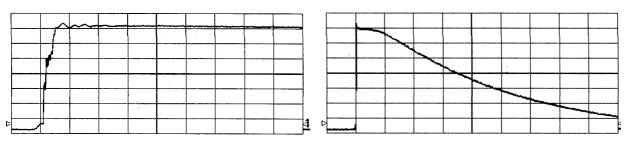
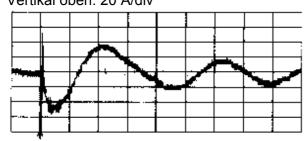


Bild 7 Prinzipschaltbild des Stossversuchsaufbaus.



Horizontal: 2 μs/div, Vertikal oben: 20 A/div



Horizontal: 0.2 ms/div, Vertikal oben: 20 mV/div Horizontal: 20 μs/div, Vertikal oben: 20 A/div

Bild 8 Oszillogramme, Stromstoss auf das Dach des Unterwerks: oben links: Stromstoss-Front oben rechts: Stromstoss-Abfall unten links: Signal an der Litze

3.3 Feldversuche mit Stromimpuls durch Zuschaltung einer Kabelstrecke

Als einfache Alternative für einen definierten transienten Stromstoss wurde für das Schwinglitzenexperiment die betriebsmässige Zuschaltung eines leerlaufenden Kabels von 1.1 km Länge an die GIS-Sammelschiene benutzt. Dieser praxisnahe Vorgang ist ausreichend reproduzierbar. Eine Kabellänge von 1 km erzeugt einen rechteckigen Stossstrom von ca. 10 μ s Dauer (doppelte Laufzeit). Die Stromamplitude ergibt sich näherungsweise aus dem Quotienten des Scheitelwerts der Phasenspannung zur Wellenimpedanz des Kabels.

Der Stossstrom kann in der Regel einfach gemessen und über die Impulslänge integriert werden, woraus sich die Stossladung Q_2 ergibt, welche für die Bestimmung des Kopplungsfaktors benötigt wird.

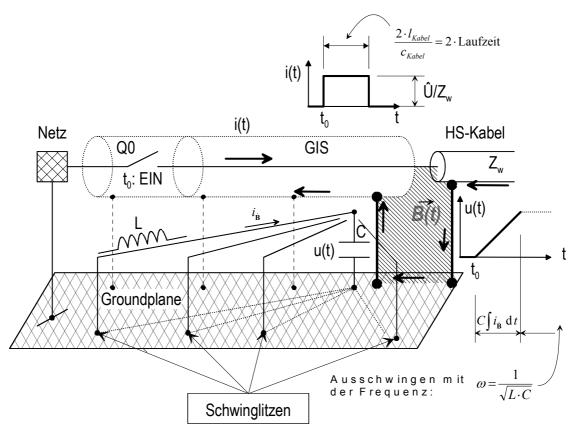


Bild 9: Prinzip der Schwinglitzenmethode beim Zuschaltung eines leerlaufenden Hochspannungskabels an einem GIS-Linienabgang. Eingezeichnet sind mehrere verlegte Litzen.

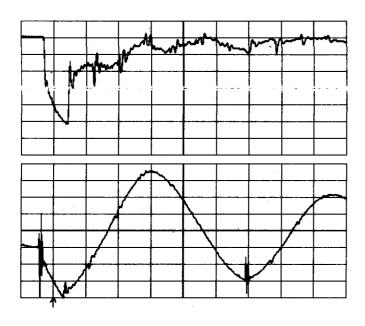


Bild 10: Oszillogrammbeispiel eines Schwinglitzenversuchs.
Oben: Stromverlauf bei der Zuschaltung eines leerlaufenden Hochspannungskabels (Länge ca. 1.1 km),
Unten: Spannungsverlauf am Litzenende über der Abschlusskapazität (20 µF),

Horizontal: 20 μs/div, Vertikal: oben: 50 A/div

unten 20 mV/div

3.4 Zusammenstellung der Messergebnisse

In Bild 11 sind die Resultate der Schwinglitzenmessungen bei Stossanregung in die Blitzschutzanlage (Abschnitt 3.2) und bei Zuschaltung eines leerlaufenden Hochspannungskabels (Abschnitt 3.3) einander gegenübergestellt. Das Säulendiagramm zeigt die Kopplungsfaktoren K_s , welche aus dem ersten Maximalwert der Schwingung $u_{ind.max}$, der Kapazität C_2 und dem Stromintegral Q_1 nach Beziehung (5) ermittelt wurden.

Die Messungen an den vier Litzen wurden zum Teil mehrmals ausgeführt, wonach festgestellt werden kann, dass die Streuung der Resultate beim Zuschalten des 110-kV-Kabels grösser ausfällt als bei den Stromstössen in die Blitzschutzanlage. Beim Zuschalten des Kabels, wurde jeweils die erstschaltende Phase beurteilt. Der Grund für die Resultatstreuung liegt zum einen im statistischen Zündvorgang beim Schalten, zum andern liegen zwischen den durch die Statistik ausgewählten Phasen leichte geometrische Unterschiede vor. Die Stromamplitude geht nicht in die Streuung ein. Sie wurde jeweils gemessen und berücksichtigt.

Das Zuschalten des 110-kV-Kabels erzeugt etwas grössere Kopplungsfaktoren als die Stromstösse auf die Blitzschutzanlage. Die Stromaufteilung über die etwa 15 Stromableitungen entlang des Unterwerksgebäudes bewirkt im Inneren offenbar sehr niedrige Feldstärken. Die Messungen zeigen, dass das magnetische Feld beim Zuschalten eines Hochspannungskabels trotz der kleinen Schleife, welche für die Rückführung der Erdung durch die Kabelumbau-Stromwandler notwendig ist, zu erheblichen Einkopplungen führen kann.

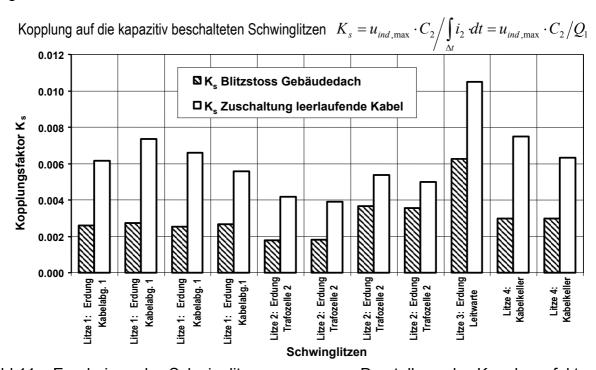


Bild 11: Ergebnisse der Schwinglitzenmessungen: Darstellung der Kopplungsfaktoren K_s für vier verschiedene Schwinglitzen bei Anregung durch einen Blitzstromstoss in das Unterwerksdach und bei Anregung durch Zuschaltung eines leerlaufenden Hochspannungskabels.

4 Schlussfolgerungen

Zur Ergänzung der messtechnischen Untersuchungsmöglichkeiten von EMV-Massnahmen in Unterwerken der Elektrizitätsversorgung wurde eine weitere Methode vorgeschlagen, mit welcher spezifisch die Ausführung des Erdungssystems und des Potentialausgleichs beurteilt werden kann.

Mit den bisher üblichen Längs- und Querspannungsmessungen werden in erster Linie nur Einkopplungen im Frequenzbereich über 100 kHz erfasst und bewertet. Die Höhe solcher Einkopplungen hängt nur von den Schirmungen und Schirmverbindungen ab, aber nicht von den Erdungs- und Potentialausgleichsmassnahmen. Um diese beurteilen zu können wird eine Methode benötigt, welche eingekopplte Spannungen im unteren kHz-Bereich erfasst.

Die vorgestellte Schwinglitzenmethode erfüllt diese Bedingung. Durch die Einführung des Kopplungsfaktors K_s liegt ein Kriterium vor, welches sowohl von der Erdleiterführung am Ort der Störquelle wie auch von den Leiterführungen am Ort der Störsenke abhängig ist. Er kann deshalb zur Beurteilung der Erdung und des Potentialausgleichs herangezogen werden.

Die Ergebnisse der Schwinglitzenmethode sind nur wenig von der Länge der Litzen abhängig, falls ausreichend niedrige Schwingfrequenzen erreicht werden. Letzteres ist eine Voraussetzung dafür, dass der magnetische Fluss, welcher zwischen dem Erdungssystem und der verlegten Litze durchgreift, über seine Impulslänge vollständig integriert wird.

Werden Messlitzen auf verschiedenen Wegen, z.B. Kabelkanälen, verlegt, so lassen sich die Kopplungen für die einzelnen Verlege-Arten vergleichen und optimieren.

In die messtechnisch ermittelten Kopplungsfaktoren K_s geht der Querschnitt bzw. der Radius der Litze über ihre Selbstinduktivität L_2 ein. Für vergleichende Messungen sollte deshalb immer der selbe Querschnitt verwendet werden. Bei einer Litze mit einem Querschnitt von 2.5 mm² wurde eine Selbstinduktivität von ca. 2 μ H/m festgestellt.

Als Alternative für die Einspeisung gezielter Stromimpulse in das Erdungs- oder Blitzschutzsystem, kann als Quelle für den anregenden Magnetfeldimpuls das betriebsmässige Zuschalten eines leerlaufenden Hochspannungskabels ausgenutzt werden. Da die Schalterzündung in der Regel im Spannungsscheitelwert erfolgt, ist ein solcher Vorgang ausreichend reproduzierbar.

Messungen mit der Schwinglitzenmethode wurden bisher nur an einem Unterwerk durchgeführt. Ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Erdungssystemen liegt deshalb zur Zeit noch nicht vor.

Schlussbemerkung

Der Autor spricht seinen Dank dem Elektrizitätswerk des Kantons Zürich EKZ für die Auftragserteilung aus, welche zu der beschriebenen Untersuchung geführt hat. Besonderen Dank gilt den Herren U. Imhof und H.-P. Häberli, welche das Projekt angeregt und begleitet haben.

5 Literatur

- [1] IEC-series 61312: parts 1...4: "Protection against lightning electromagnetic impulse".
- [2] Cigré Report No 124, "Guide on EMC in power plants and substations"; Working Group 36.04, December 1997.
- [3] Lewis J.: "Earthing of GIS An application guide", Cigré Report No 44; Electra Vol. 151 (1993).

- [4] Clarenne G., Ebersohl J., Vigreux G., Voisin G.: "The effect of high frequency transient regimes on secondary equipment in gas-insulated substations, design of the earthing system, low voltage wiring and electronic equipment"; Electra, Vol. 126 (1989), pp 95-116.
- [5] Meppelink. J: "Verhalten von gasisolierten Schaltanlagen gegenüber transienten Überspannungen", Elektrotechnik und Informationstechnik, Bd. 108 (1991), Heft 7/8, SS 329-335.
- [6] Meppelink J., Remde H.: "Elektromagnetische Verträglichkeit bei SF6-gasisolierten Schaltanlagen", Brown Boveri Technik, Bd. 73 (1986), Heft 9.
- [7] Albiez M., Meppelink J.: "Einkoplung von Störspannungen in geschirmte Leitungen einer Schaltanlage"; Bulletin SEV/VSE Bd. 80 (1989), Nr. 5, SS. 231-237.
- [8] Noack F., Zahlmann P., Brocke R., Schwarz H.: "Transient ground potential rise in GIS and their influence on the design of substation earthing"; CIGRE 23-87, WG 23.04, (1987).
- [9] Chevallay F., Sauvain H.: "Protection of microprocessor based distributed control units in gas insulated substations against electromagnetic interferences", Cigré Conference 1988, TC36, WG 05.
- [10] Aanestad H., Deter O., Röhsler H., Lewis J., Strnad A.: "Substation earthing with special regard to transient ground potential rise design aims to reduce associated effects"; Cigré-Conference 1988, TC36, WG 05.
- [11] Clément R., Sauvain H.: "Studie zum Schutz empfindlicher Anlageteile vor elektromagnetischen Einflüssen in Hochspannungsanlagen"; Bulletin SEV/VSE, Bd. 81 (1990), Nr. 7, SS. 54-56.
- [12] Hofmann F., Kreß K., Rudolph T., Seidler R.: "Sicherstellung der EMV in gasisolierten Schaltanlagen"; ETZ., Bd. 114 (1993), Heft 12, SS. 764-769.
- [13] Aguet M., Blech Ph., Ianoz M., Sauvain H.: "Perturbations électromagnétiques dans les réseaux électriques de distribution"; Bulletin ASE/UCS, Vol. 69 (1978), No 24, pp. 1310-1314.
- [14] Fujimoto N., Dick E.P., Boggs S.A., Ford G.L.: "Transient ground potential rise in gas insulated substations Experimental studies"; IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-101, No. 10, Oct. 1982.
- [15] Bauer H., Claus M., Gorablenkow J., Hentschel G., Suermann B.: "Zur Störbelastung und EMV der Leit- und Schutztechnik von SF6-isolierten Schaltanlagen"; Elektrizitätswirtschaft Bd. 94 (1995), Heft 9, SS. 498-503.
- [16] Strnad A.: "Beanspruchung von Sekundärgeräten und Sekundärsystemen in Hochspannungsanlagen durch elektromagnetische Störvorgänge"; Elektrizitätswirtschaft, Bd. 79 (1980), Heft 7, SS. 232-236
- [17] Fischer M., Strnad A.: "Bestimmung der bei Blitzeinschlägen zu erwartenden transienten Überspannung in Sekundärkreisen von Hochspannungsschaltanlagen."; Elektrizitätswirtschaft, Bd. 82 (1983), SS 87-91.
- [18] Matsumoto T., Aschwanden T., Bräunlich R., Hässig M., Kronauer P., Hess E., Guyer M.: "Lightning simulation with current injection in a nuclear power station"; 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama 1993, paper 75.06.
- [19] Beyer M., Boeck W., Möller K., Zaengl W.: "Hochspannungstechnik"; Springer-Verlag, 1986, Kapitel 10.8.4.2.

Adresse des Autors:

Dr. Reinhold Bräunlich, FKH, Fachkommission für Hochspannungsfragen, Voltastr. 9, CH-8044 Zürich Tel. +41-1-253 62 63, Fax.+41-1-253 62 60, E-mail: braeunlich@fkh.ch