

Simulation der transienten Spannungsverläufe im Eigenbedarfsnetz eines Großkraftwerks bei einem kraftwerksnahen Blitzeinschlag in die Hochspannungs-Freileitung

Simulation of transient voltage curve of a house-load operation network of large power plant by a lightning strike in a high-voltage overhead line closed to the power plant

Jörg Behrens, Vattenfall Europe Nuclear Energy, Hamburg, Deutschland, joerg.behrens@vattenfall.de
 Dr.-Ing. Ralf Frentzel, TÜV Süd Industrie Service, München, Deutschland, Ralf.Frentzel@tuev-sued.de
 Prof. Dr.-Ing. Alexander Kern, FH Aachen, Campus Jülich, Deutschland, ap.kern@t-online.de

Kurzfassung

Großkraftwerke können durch Blitzentladungen mit potentiellen Auswirkungen auf deren Verfügbarkeit und Sicherheit gefährdet werden. Ein sehr spezielles Szenario, welches aus aktuellem Anlass zu untersuchen war, betrifft den kraftwerksnahen Blitzeinschlag in die Hochspannungs-Freileitung am Netzanschluss der Anlage. Wird nun noch ein sogenannter Schirmfehler unterstellt, d.h. der direkte Blitzeinschlag erfolgt in ein Leiterseil des Hoch- bzw. Höchstspannungsnetzes und nicht in das darüber gespannte Erdseil, so bedeutet dies eine extreme elektromagnetische Einwirkung. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Simulation eines solchen Blitzeinschlages und dessen Auswirkungen auf den Netzanschluss und die Komponenten der elektrischen Eigenbedarfsanlagen eines Kraftwerks auf den unterlagerten Spannungsebenen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich ohne Einschränkungen auf Industrieanlagen mit Mittelspannungs-Netzanschluss und ohne eigener Stromversorgung übertragen.

Abstract

Lightning discharge can endanger large power plants with potential influence on their availability and reliability. A very special scenario, which was currently to analyse, is the lightning strike close to the high-voltage overhead line at the grid of the power plant. Supposing a failure of shielding and that the lightning strike goes directly into the line then the electromagnetic effect is extremely high.

The following article gives attention to the simulation of lightning strike and their effects to the connection with the grid and the components of the house-load operation of a large power plant especially to the lower voltage level sections. These results are transferable to industrial plants which have no own power supply.

1 Einleitung

In den letzten Jahren wurden in der nationalen wie internationalen Literatur vermehrt von Störungen aufgrund von Naturereignissen in größeren Kraftwerksanlagen und überregionalen Hochspannungsnetzen berichtet. Diese Ereignisse sind nicht neu und traten auch in der Vergangenheit immer wieder auf. Aufgrund der gestiegenen Sensibilität in der Bevölkerung und der größeren Instabilität der Versorgungsnetze, was auch auf die zunehmende Auslastung zurückzuführen ist, gewinnen derartige Ereignisse aber gerade im Hinblick der überregionalen Abhängigkeit bei der Energieversorgung zunehmend an Brisanz.

Ein spezielles Ereignis in einem nordeuropäischen Großkraftwerk wurde zum Anlass genommen, einen derartigen Sachverhalt konservativ nachzubilden und zu bewerten. Es wird dabei unterstellt, dass ein kraftwerksnaher Blitzein-

schlag in die Hochspannungs-Freileitung am Netzanschluss eines Kraftwerks erfolgt. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass ein unerkannter Schirmfehler zum Zeitpunkt des Ereignisses vorliegt, d.h. dass der Blitzeinschlag direkt auf ein Leiterseil des Hoch- bzw. Höchstspannungsnetzes erfolgt, und nicht auf das darüber gespannte Erdseil, das eigentlich den Blitzeinschlag aufnehmen soll. Die damit verbundenen Folgen für die Komponenten des Eigenbedarfs der betroffenen Spannungsebene wie für die Komponenten der unterlagerten Spannungsebenen werden untersucht.

2 Definition der Störgröße

Die Sichtung der nationalen und internationalen Regelwerke ergab, dass derartige Betrachtungen innerhalb der Regelwerke bislang nicht abdeckend durchgeführt wurden. Weiterhin sind die anzusetzenden Stehspannungsprüfungen [1] als Störgrößen für die beabsichtigte Analyse weit-

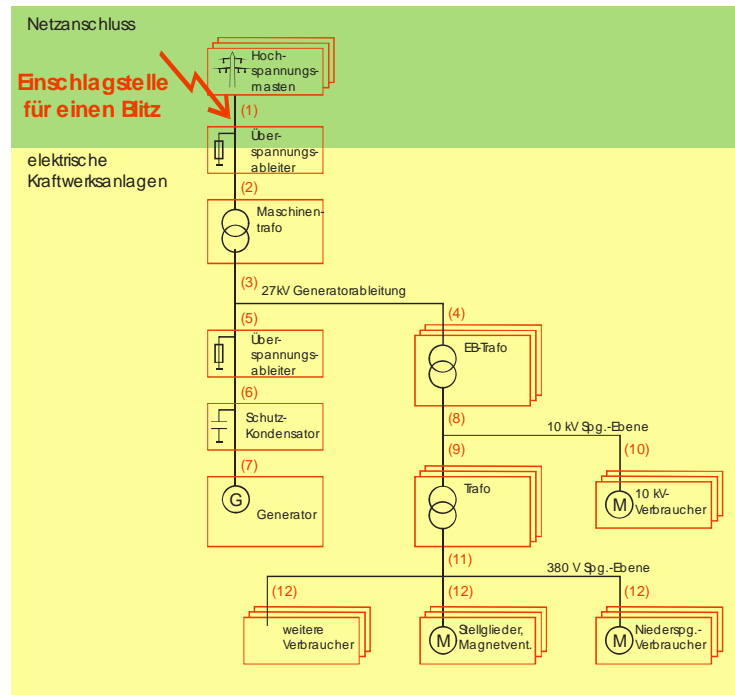


Bild 1: Aufbau der Musteranlage Großkraftwerk

gehend unbrauchbar. Damit können zwar Prüfungen an Betriebsmitteln der Hochspannungstechnik durchgeführt werden; für Simulationsrechnungen von Kopplungsvorgängen in und über die verschiedenen Betriebsmittel (z.B. Transformatoren) ist diese Beschreibung einer Störquelle nicht ausreichend.

Zielführend ist für die vorliegende Aufgabenstellung vielmehr die Einspeisung eines Blitzstromes direkt an der Einschlagstelle, d.h. die Beschreibung der Störgröße „Blitz“ als Stromquelle. Daher wurde für die Simulationen auf die Vorgaben aus DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1):2006 [2] und KTA 2206:2000 [3] zurückgegriffen.

Zur direkten Einspeisung von Blitzströmen muss beachtet werden, dass nach [3] drei verschiedene Blitzstrom-Komponenten (Blitztypen) zu berücksichtigen bzw. zu simulieren sind:

Positiver Erstblitz

Stromscheitelwert:	200 kA
Mittlere Stromsteilheit:	20 kA/ μ s
Stirnzeit:	10 μ s
Rückenhalfwertzeit:	350 μ s

Negativer Erstblitz

Stromscheitelwert:	100 kA
Mittlere Stromsteilheit:	100 kA/ μ s
Stirnzeit:	1 μ s
Rückenhalfwertzeit:	200 μ s

Negativer Folgeblitz

Stromscheitelwert:	50 kA
Mittlere Stromsteilheit:	200 kA/ μ s
Stirnzeit:	0,25 μ s
Rückenhalfwertzeit:	100 μ s

In [2] sind der positive Erstblitz und der negative Folgeblitz ebenfalls enthalten, nicht aber der negative Erstblitz. In der Überarbeitung dieser Norm auf IEC-Ebene ist allerdings dieser Blitztyp nun ebenfalls vorgesehen [4]. Für die Untersuchung werden, wie in [2, 3] vorgesehen, die jeweiligen Blitztypen mit analytischen Blitzstromfunktionen beschrieben (siehe Abschnitt 5).

Die Enddurchschlagstrecke am Ende des Blitzkanals wurde nicht berücksichtigt, da sie für die hier betrachtete galvanische Kopplung des Blitzstroms von untergeordneter Bedeutung ist. Hinsichtlich des Blitzeinschlagortes wurde angenommen, dass bei der betrachteten Hochspannung-Freileitungstrasse ein sogenannter Schirmfehler gemäß DIN EN 60099-5 [5] vorliegt, bei dem die Erdseile auf den Masten und andere, gegebenenfalls vorhandene Fangeinrichtungen versagen. Der Einschlag erfolgte daher mit den höchsten, nach [2, 3] zu unterstellenden Blitzstromamplituden direkt in das Leiterbündel einer Phase des Drehstromsystems vor dem letzten Mast der Trasse am Kraftwerk.

Es wurde noch ein zweiter Mast dieser Trasse in Richtung Freileitungsnetz berücksichtigt, um festzustellen, wie stark dessen Wirkung in Bezug auf die Blitzstromableitung ist, wenn es zum Überschlag am Isolator des Leiterbündels an diesem Mast kommt.

3 Festlegung einer Musteranlage

Die Musteranlage eines Großkraftwerks enthält alle typischen Komponenten, Verbraucher und Schutzeinrichtungen in den unterschiedlichen Spannungsebenen des Eigenbedarfsnetzes (Bild 1). Die Verbindungsleitungen wurden

als worst-case Ansatz in den typischen Leitungslängen und -querschnitten variiert.

Am 400 kV-Kraftwerksanschluss wirkt ein Überspannungsableiter gegen Überspannungen aus dem Netzanschluss. Dem nachgeschaltet befindet sich in unmittelbarer Nähe ein 420 kV / 27 kV-Maschinentransformator (1070 MVA).

In der 27 kV-Spannungsebene – der Generatorableitung – befinden sich zudem ein weiterer Überspannungsableiter, ein Schutzkondensator gegen Störspannung vom Generator in der Größenordnung von 10 bis 100 nF und der Generator. Parallel zum „Generatorpfad“ liegt die Eigenbedarfsversorgung des Kraftwerks. Über einen 27 kV / 10 kV-Eigenbedarfs-Öl-Transformator wird die Spannung auf die kraftwerksinterne 10 kV-Mittelspannung transferiert. An ihr befinden sich alle leistungsstarken Verbraucher des Kraftwerks. Zumeist sind das Motoren für größere Pumpen oder Lüfter. In der Musteranlage werden hierfür zwei exemplarische Motoren verwendet: ein vergleichsweise kleinerer Motor mit 250 kW und ein größerer mit 2450 kW, um somit eine gewisse Bandbreite in der Simulation abdecken zu können. Die Anzahl wie die Art der verwendeten Verbraucher wird innerhalb der Simulation variiert.

Für die meist etwas schwächeren Verbraucher existiert in der Musteranlage noch eine weitere Spannungsebene, die 0,4 kV-Niederspannungsebene. Sie wird über einen Niederspannungs-Transformator (GEAFOL) eingespeist und versorgt Verbraucher, wie kleinere Motore, Stellantriebe, Magnetventile, Heizungen und leittechnische Einrichtungen etc. Im Rahmen der Simulation werden diese Verbraucher nur durch ihre Versorgungsleitungen berücksichtigt. Die Verbraucher selbst werden als hochohmiger Widerstand nachgebildet.

Jegliche Schutzeinrichtungen, die nicht gegen Überspannungen wirken oder zum Aggregatschutz zuzählen sind, werden in der Simulation nicht belastet.

4 Hochfrequenz-taugliche Modelle für typische Betriebsmittel des Eigenbedarfsnetzes eines Kernkraftwerks

Einer zentralen Bedeutung kommt bei der Simulation der Auswahl und Parametrierung der Modelle für den Eigenbedarf zu. Da diese seitens der Komponentenhersteller typischerweise nicht zur Verfügung gestellt werden und auch öffentlich nicht im erforderlichen Detaillierungsgrad frei zugänglich sind, mussten sie zum Teil experimentell bestimmt werden. In Anlehnung an die Vierpoltheorie erfolgt dieses z.B. für Transformatoren (Abs. 4.5) und Generatoren und Motoren (Abs. 4.7) mittels einer Frequenzganganalyse in dem jeweils erforderlichen Bereich.

Im vorliegenden blitzrelevanten Frequenzbereich sollen die Modelle die Vorgänge soweit möglich korrekt wiedergeben; dieser wird hier auf 10 Hz bis 10 MHz angesetzt,

wobei der weitaus größte Teil der elektromagnetischen Einkopplungen sich zwischen 10 kHz und 1 MHz konzentriert.

Nachdem der Blitzeinschlag in ein Leiterseil erfolgt, ist ein einphasiges Ersatzschaltbild ausreichend. Damit sind auch nur einphasige Modelle der Betriebsmittel erforderlich. Berechnet wird die blitzbedingte Längsspannung, also die Belastung zwischen aktivem Leiter und Erdungsanlage bzw. Potentialausgleichssystem. Die Darstellung von geometrisch ausgedehnten Strukturen, wie Freileitungsabschnitten, Masten, Mastauslegern, muss dabei als Wanderwellenleitung erfolgen, wenn deren Länge größer als s_{\max} ist [6]:

$$s_{\max} = \frac{v}{5 * f_{\max}}$$

Hierin ist v die Ausbreitungsgeschwindigkeit (bei Freileitungen ca. die Lichtgeschwindigkeit $v \sim c = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$) und f_{\max} die höchste zu erwartende Frequenz. Setzt man f_{\max} konservativ zu 3 MHz, so sind alle Elemente mit mehr als zwanzig Metern Länge als Wanderwellenleitung oder als Schaltung mit mehr als einer Pi-Sektion zu modellieren.

4.1 Hochspannungs-Freileitungen

Die Berechnungsgrundlage erfolgt, wie eingangs bereits beschrieben, einphasig.

Basierend auf den Geometriedaten werden die Hochspannungs-Freileitungen als grundsätzlich verlustbehaftete Leitungen nachgebildet [6]. Allerdings kann hier der Quer-Verlustleitwert eindeutig vernachlässigt werden, da das Dielektrikum Luft als quasi verlustfrei angesehen werden kann ($G' = 0$). Weiterhin kann für Frequenzen größer 1 kHz auch der Längswiderstand vernachlässigt werden, da der induktive Anteil an der Längsimpedanz eindeutig überwiegt ($R' = 0$).

Der Wellenwiderstand Z_L des Leiterseils bzw. Leiterbündels ergibt sich nach [9] zu:

$$Z_L = 60 \cdot \Omega \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h}{r_E} \right)$$

$$\text{wobei: } r_E = \sqrt[n]{r \cdot n \cdot (r_b)^{n-1}}$$

mit: h : Höhe des Leiterseils bzw. -bündels über Grund;

r_b : Radius des Leiterbündels;

r : Radius des Leiterseils;

n : Anzahl der Leiterseile des Leiterbündels (für einen Einzelleiter ist $n = 1$ und es ergibt sich $r_E = r$).

Die Wellen-Laufzeit lässt sich aus der Länge des Leitungsabschnittes und der o. a. Ausbreitungsgeschwindigkeit ermitteln. Die Erdoberfläche wird als perfekt leitende Ebene angenommen, vgl. auch [10].

4.2 Freileitungs-Mast und -Isolatoren

Der Freileitungs-Mast und der Mastausleger werden als Wanderwellenleitungen mit Konusform beschrieben. Der Wellenwiderstand ergibt sich nach [7] zu:

$$Z_M = 60 \cdot \Omega \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot h}{r} \right)$$

mit: h: Höhe der Aufhängung des betroffenen Seiles am Mast;
r: Radius des Mastfußes.

Für typische Freileitungs-Maste ergeben sich Werte für den Wellenwiderstand von 150 ... 250 Ω . Die Wellen-Laufzeit ergibt sich für den Mast aus der Höhe vom Erdboden bis zum Mastausleger (für den Mastausleger aus dessen Länge vom Mast bis zum Isolator) und der o. a. Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Die Freileitungs-Isolatoren werden grundsätzlich als ideal betrachtet, nur für den Zusammenbruch im Falle einer zu hohen Spannungsbelastung, d.h. beim Erreichen ihrer Überschlagspannung, muss ein Modell vorliegen. Nach IEC 60071-2 Annex G [8] kann die Überschlagspannung von Freileitungsisolatoren für Blitzstoßspannungen abgeschätzt werden zu:

$$\frac{U_{d/50}}{kV} = 700 \cdot \frac{d}{m}$$

mit: d: Länge des Isolators (Abstand der Elektroden).

Für Spannungsbeanspruchungen mit noch höheren Spannungssteilheiten steigt die Überschlagspannung noch weiter an. Im vorliegenden Fall erscheint allerdings die Berücksichtigung dieser Stoßkennlinie nicht erforderlich.

Wenn die Überschlagspannung erreicht ist, also die Bedingungen für den Überschlag gegeben sind, kann der Freileitungs-Isolator nach IEC 60071-4 [7] für den Fall von Blitzstoßspannungs-Beanspruchungen als idealer

Schalter nachgebildet werden, der innerhalb eines Zeitschrittes schließt. Der sich dann einstellende Stromanstieg wird durch die Induktivität des Lichtbogens beschränkt. Daher wird in Reihe mit dem idealen Schalter eine zusätzliche Induktivität geschaltet, deren Wert ca. 1 $\mu\text{H/m}$ beträgt.

4.3 Erdungsanlagen und -widerstände

Die Erdungsanlagen im Außenbereich des Großkraftwerks werden als weitgehend „ideal“ betrachtet, d.h. die Anschlüsse von Betriebsmitteln erfolgen niederohmig an die ideale Erde. Dies gilt auch für die Komponenten innerhalb der Freiluft-Schaltanlage. Dafür wird jeweils ein Wert von $RE/S = 1 \Omega$ angenommen.

Die Freileitungsmaste außerhalb des Kraftwerksgeländes werden über einen einfachen ohmschen Widerstand geerdet. Dies ist in Übereinstimmung mit einfachen Abschätzungen nach [7]. Hier wird ein Wert von $RE/M = 10 \Omega$ angenommen.

Das Potentialausgleichssystem innerhalb von Bauwerken kann, da hier grundsätzlich die baustatischen Bewehrungen von Wänden und Decken einbezogen sind, als „ideal“ vorausgesetzt werden. Beim Anschluss von Komponenten an das Potentialausgleichssystem kommt daher nur die Induktivität des Anschlussleiters (üblicherweise Cu-Seil mit 70 mm² Querschnitt) zum Tragen, die mit 1 $\mu\text{H/m}$ berücksichtigt wird.

4.4 Überspannungsschutzgeräte

Bei den zu berücksichtigenden Überspannungsschutzgeräten auf der Hoch- und Höchstspannungsebene handelt es sich um Metalloxid-Varistoren. Für diese Varistoren liegen Strom-Spannungs-Kennlinien (siehe Bild 2) vor, wobei deren grundsätzlicher Verlauf insbesondere von der Scheibenfläche abhängt. Ist die Restspannung des Varistors bei einem bestimmten Stromwert bekannt (z.B. 10 kA), kann bei bekanntem Scheibendurchmesser der Gesamtverlauf der Strom-Spannungs-Kennlinie angegeben werden.

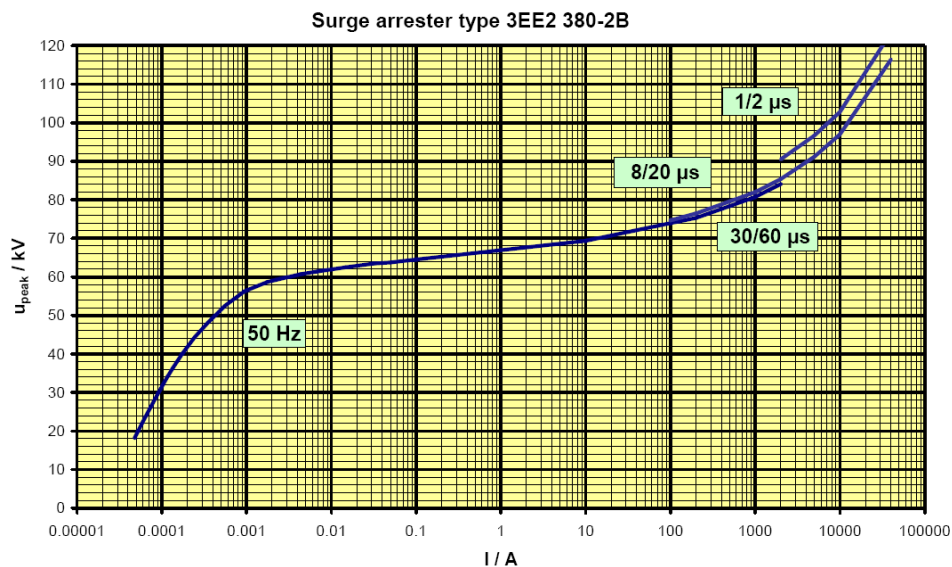


Bild 2: Exemplarische Kennlinie eines 380 kV-Überspannungsableiters

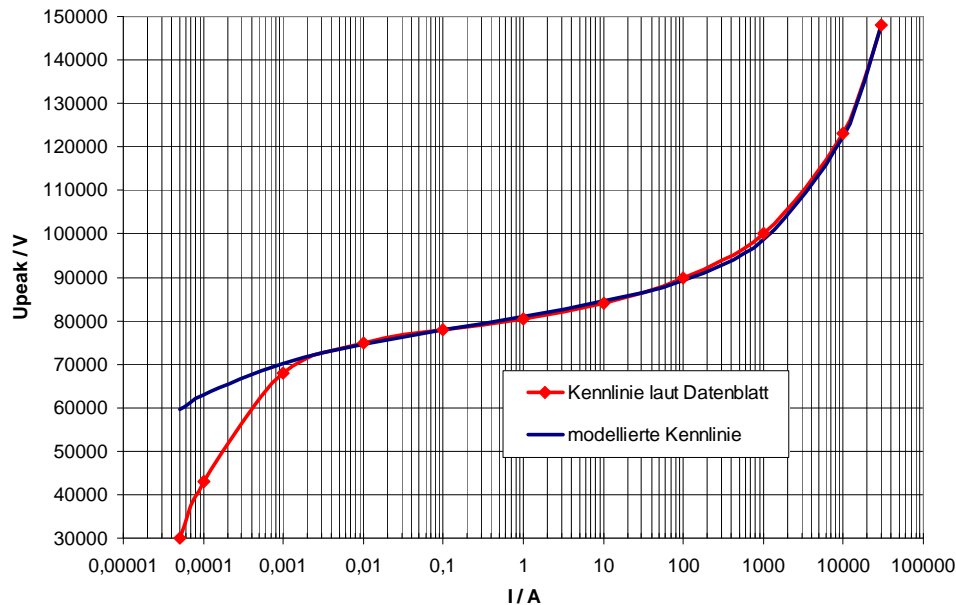


Bild 3: Vergleich zwischen der Datenblatt- und modellierten Kennlinie des 27 kV-Überspannungsableiters

Die Varistoren werden dabei zweckmäßig als stromgesteuerte Spannungsquellen mit stetiger Kennlinie modelliert (siehe [Bild 3](#)).

4.5 Transformatoren

Für Transformatoren bestehen, wie eingangs beschrieben, keine parametrisierten Modelle, so dass man darauf angewiesen ist, sie experimentell zu ermitteln. Dieses erfolgt in Anlehnung an die Vierpoltheorie über die Übertragungsfunktion, die ihrerseits mittels Frequenzganganalyse bestimmt wird. Maßgebliche Kenngrößen sind dabei:

- Kapazität der Hochspannungswicklung (Primärwicklung) gegen Erde
- Kapazität der Niederspannungswicklung (Sekundärwicklung) gegen Erde
- Kapazität zwischen Primärwicklung und Sekundärwicklung
- Leitungsinduktivitäten der Primär- und Sekundärwicklungen

Die erforderlichen Messungen wurden im vorliegenden Fall selektiv mit einer sinusförmigen Anregung und der Messung der dazugehörigen Systemantwort aufgenommen. Der Frequenzbereich wurde mit ca. 2000 Stützstellen logarithmisch verteilt untersucht. Als Versorgungsquelle diente eine frequenzvariable Spannungsquelle mit einer Amplitude von 10 Vpp. Durch Verwendung der kleinen Spannung sind kleine Abweichungen im unteren Frequenzbereich zu erwarten, die zu vernachlässigen sind. Die Gründe hierfür sind die Nichtlinearität und Spannungsabhängigkeit des Eisenkerns, die bis etwa 10 kHz wirken. Oberhalb dieser Frequenz ist der Eisenkern praktisch feldfrei und damit ohne Bedeutung. Verifiziert wurden die Ergebnisse nochmals mittels Vergleich im FFT- und Zeitbereich mit einer zweiten breitbandigen Messung mittels Sprungantwort bei

400 V. Die so gewonnenen Daten stellten die Basis für die Parametrierung der Modelle dar.

Darauf aufbauend wurden im ersten Ansatz die Modelle aus dem Bericht des CIGRE Study Committee 33 [6] und einem Draft Technical Report des IEC TC 28 [7] verwendet. Es stellte sich heraus, dass sich diese Modelle für die Art der Betrachtung als zu ungenau erwiesen ([Bild 4](#)). Folglich ergaben sich bei der Gesamtsimulation Abweichungen von mehr als 50 % im Endergebnis.

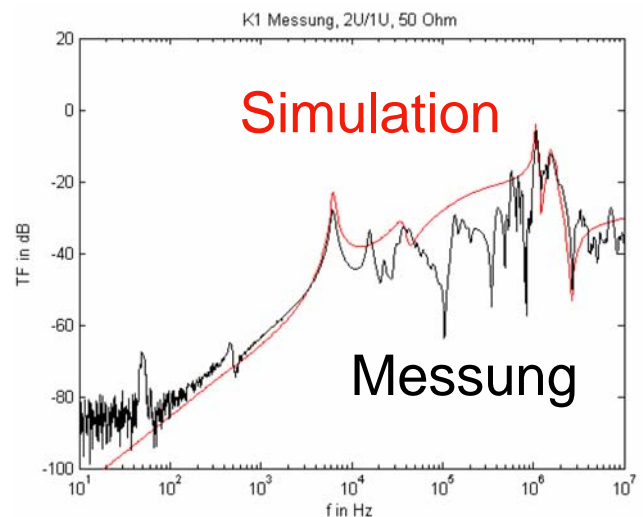


Bild 4: Amplitudenspektrum gemäß [6, 7] für einen Maschinentransformator BBC GM 100 990

Alternativ wurden die Komponenten mittels Kettenleiter am Institut ITEM der Universität Bremen nachgebildet. Hierbei zeigte sich eine gute bis sehr gute Übereinstimmung im Amplituden- und Phasengang zwischen den ge-

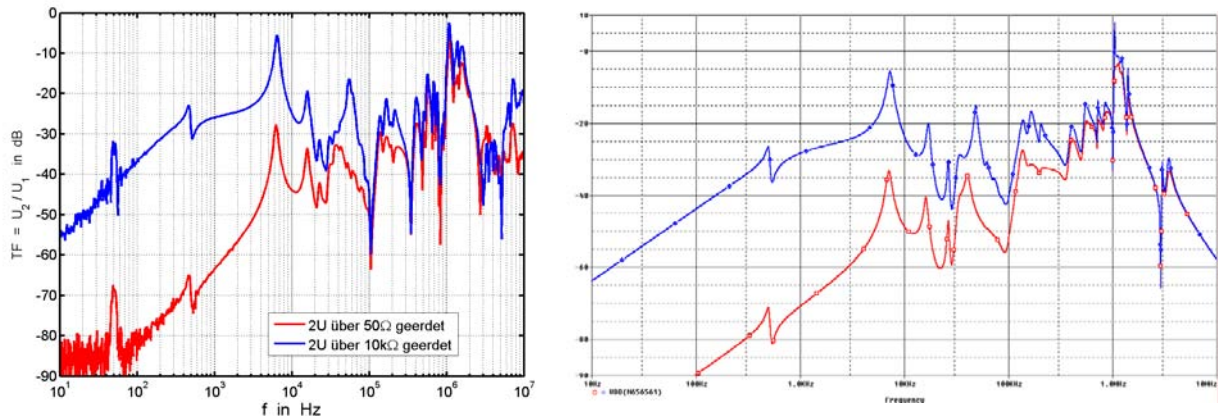


Bild 5: Amplitudenspektrum: links Messung, rechts Simulation

messenen und simulierten Ergebnissen (Bild 5). Gemäß dieser Erkenntnisse wurden deshalb auf diese Art und Weise alle Modelle für die Transformatoren entwickelt.

4.6 Kabel

Basierend auf den Geometriedaten und den Daten für die Dielektrika werden auch die Kabel, analog zu Hochspannungs-Freileitungen, als grundsätzlich verlustbehaftete Leitungen nachgebildet. Allerdings kann auch hier, im zu betrachtenden Frequenzbereich, der Quer-Verlustleitwert vernachlässigt werden ($G' = 0$).

Bei der Berechnung der Kabelparameter geschirmter Kabel der Mittelspannungsebene mit Einzeladerschirmen ist in zwei Stromkreise aufzuteilen. Der innere Stromkreis besteht aus dem Innenleiter und der Schirminnenseite, während der äußere Stromkreis aus Schirmaußenseite und dem umgebenden Potentialausgleichssystem gebildet wird. Es ist daher erforderlich, ein Mittelspannungskabel in der Simulation durch zwei gekoppelte Wanderwellenleitungen darzustellen, die sich durch differente Wellenwiderstände auszeichnen. Adäquate Berechnungsformeln für die induktiven und kapazitiven Leiterbeläge des inneren Stromkreises (kreisrunder Leiter im Hohlzylinder) und des äußeren Stromkreises (kreisrunder Leiter über leitender Ebene) finden sich beispielsweise in [11, 12].

4.7 Generatoren und Motoren

Für den Maschinengenerator wie die motorischen 10 kV-Verbraucher ergab sich ein mit den Transformatoren vergleichbarer Sachverhalt. In Analogie zu Abschnitt 4.5 wurden auch für diese Komponenten die Übertragungsfunktionen und die Modelle als Kettenleiter bestimmt.

5 Simulation

Wie eingangs beschrieben können bei einem Blitzschlag verschiedene Bedrohungssituationen auftreten, die alle durch die drei Blitztypen nach Abschnitt 2 abgedeckt werden sollen. Da sich die drei Blitztypen sowohl hinsichtlich der Leistung wie auch des Zeitverhaltens (Frequenzanteile) unterscheiden, gilt es den Stromimpuls mit dem größten Störpotential zu ermitteln. Daher erfolgt die Berechnung für die Musteranlagen bei den verschiedenen Betriebsituationen mit allen drei Blitztypen.

Für die Hauptanwendung Leistungsbetrieb – der Generator ist mit dem Versorgungsnetz gekoppelt – liegt der Generator parallel zum „Eigenbedarfspfad“. Zugleich wirkt die Einspeisung im Zusammenhang mit dem Generator als eine Art Spannungsteiler mit Tiefpassverhalten für den Eigenbedarf. Daraus ergibt sich, dass der negative Erstblitz die größten Störungen auf den 10 kV- und 400 V-Spannungsebenen bewirkt. Für den zweiten Betriebszustand, den ungekoppelten Generatorbetrieb, führt der negative Folgeblitz mit seinen höherfrequenten Spektralanteilen zu den größten Störungen.

Insgesamt zeigen die Simulationen, dass es sich bei einem Kraftwerk um eine komplexe Anordnung mit kaskadierten Schwingkreisen handelt (siehe Bild 6). Jeder Verbraucher oder Transformator bildet für sich bereits eigenständige Schwingkreise, die mit den Anschlussleitungen wiederum weitere Schwingkreise bilden. Alle diese Schwingkreise stehen in direkter Abhängigkeit zueinander und beeinflussen sich hinsichtlich ihrer Güte gegenseitig. Damit lassen sich unabhängige Parameteranalysen, wie beispielsweise die Untersuchung der Variation einer Leitungslänge, nicht separat sondern nur im Zusammenhang mit anderen Größen bewerten. Deshalb sind Aussagen über den optimalen Auslegungsstand insgesamt nicht und hinsichtlich einzelner Einflussgrößen nur als Tendenz möglich.

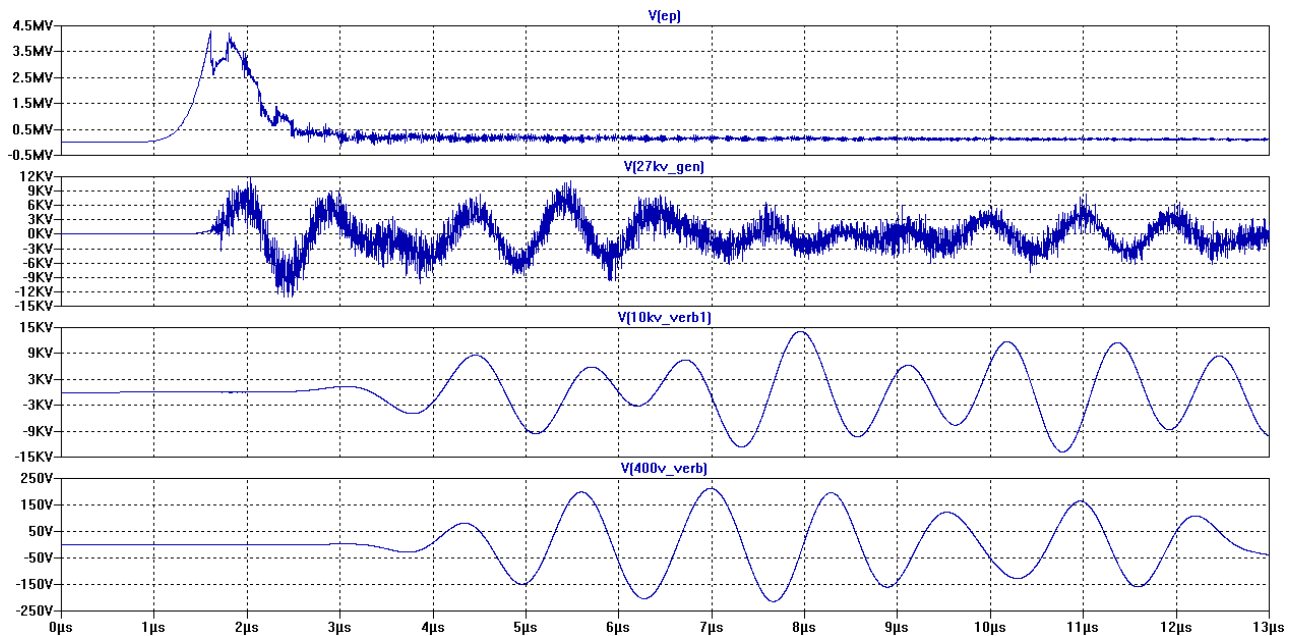


Bild 6: Spannungsverläufe einer typischen Betriebssituation mit Generator am Netz

Rückkopplungen von unterlagerten Spannungsebenen auf die nächst höhere Spannungsebene sind für gewöhnlich sehr gering, so dass diese im ersten Ansatz zu vernachlässigen sind. Gleichzeitig stellt jeder Transformator eine Dämpfung zur nächsten Spannungsebene dar. Die Höhe der Dämpfung ist durch sein im hochfrequenten Bereich kapazitives Übertragungsverhalten bestimmt und nicht durch sein klassisches Übersetzungsverhältnis. Damit kann im Einzelfall die Dämpfung geringer ausfallen als das jeweilige Übersetzungsverhältnis, so dass sich, relativ gesehen, die Störung auf den niedrigeren Spannungsebenen deutlicher auswirkt. Weiterhin maßgeblich sind die Art und Anzahl der elektrischen Verbraucher auf der jeweils höheren Spannungsebene. Prinzipiell wirken sich leistungsstärkere sowie eine größere Anzahl von Motoren dämpfend für das System aus.

Zur exemplarischen Darstellung sind im Folgenden zwei Untersuchungsergebnisse kurz dargestellt: Im ersten Szenario

(Bild 6) – negativer Folgeblitz, drei 10 kV-Verbraucher unterschiedlicher Größe und zwanzig 400 V-Verbraucherleitungen – wird der zeitliche Verlauf eines leitungsgebundenen Blitzeinschlags in den Kraftwerksanschluss 25 m vor dem Kraftwerk gezeigt. Zum Zeitpunkt von 1,52 μ s wird die Überslagsspannung am Isolator der Freileitung erreicht, und es erfolgt ein Überslag mit Lichtbogen. Der Blitzkanal bleibt für die Dauer des Blitzstroms erhalten. Etwas zeitversetzt erfolgt ebenfalls ein Überslag am Ableiter vor dem Maschinentransformator. Über beide Störlichtbögen wird ein Großteil der Blitzenergie abgeführt. Es stellt sich ein Maximum der Störspannungen am 10 kV-Verbraucher bei 7,94 μ s mit 14,2 kV und an einem 400 V-Verbraucher bei 6,98 μ s mit 216 V als Amplitudenspitzenwert ein. Weitere Simulationen zeigen zudem, dass unter Wegfall der Überspannungsableiter oder der Missachtung der Störlichtbögen am Isolator bzw. Ableiter die Spannungswerte erwartungsgemäß deutlich ansteigen.

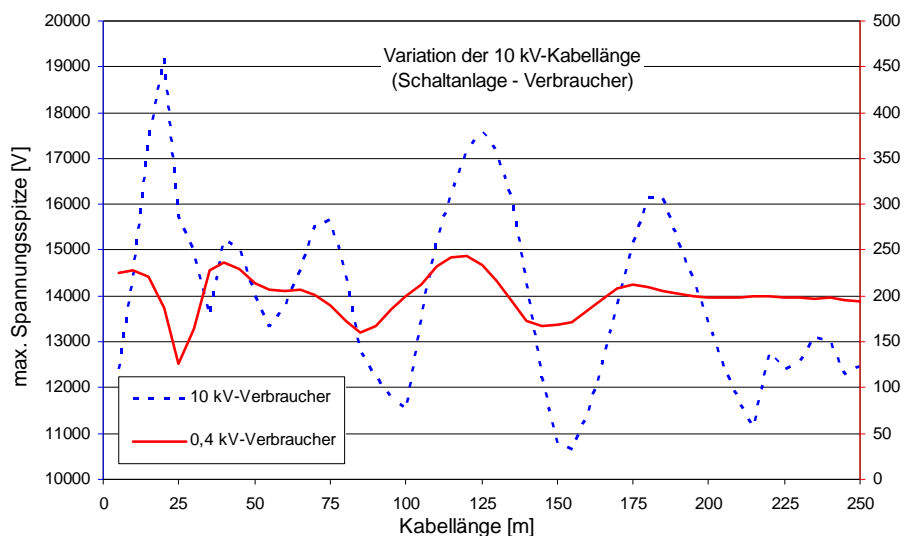


Bild 7: 400 V- und 10 kV-Verbraucherspannungen in Abhängigkeit der Längenvariation eines 10 kV-Kabels

Im zweiten Szenario (Bild 7) wird der Einfluss einer Leitungslänge auf das Schwingungsverhalten und den Maximalwert der Störspannungen dargestellt. Hier wird die Variation der Leitungslänge zwischen dem Eigenbedarfs-Transformator und der 10 kV-Sammelschiene gezeigt. Der Untersuchungsbereich liegt zwischen 5 m und 250 m mit einer Schrittweite von 5 m. Das Schwingverhalten in Abhängigkeit der Leitungslänge ist deutlich zu sehen. Zudem zeigt sich, dass mit Zunahme der Leitungslänge der Maximalwert der Störspannung bedämpft wird.

Grundsätzlich zeigen die Simulationen, dass unter Berücksichtigung der Überspannungsableiter und der Störlichtbögen am Isolator die zu erwartenden Spannungsüberhöhungen zu jedem Zeitpunkt in den zulässigen Toleranzbereichen verbleiben. Wird hingegen der Überschlag am Ableiter vor dem Maschinentransformator nicht berücksichtigt, so liegen die Spannungswerte auf der 10 kV-Ebene bei zirka dem vierfachen Wert; sie sind damit außerhalb der zulässigen Grenzwerte für Kabel oder Verbraucher.

6 Fazit

Zur Analyse von transienten Überspannungen als Folge eines kraftwerksnahen Blitzeinschlags in eine Hochspannungs-Freileitung wurden numerische Simulationen an einem typischen Eigenbedarfsnetz durchgeführt. Basis dafür waren einerseits umfangreiche Messungen zum Transferverhalten von Großkomponenten (bspw. Transformatoren, Maschinengeneratoren, Motoren) im relevanten Frequenzbereich der Blitzentladung. Aus diesen Messdaten wurden Modelle zur Verwendung in einem Netzwerkanalyse-Programm erstellt. Dies stellt ein Novum dar, da Messdaten in dieser Vollständigkeit der Fachliteratur bis dato nicht zu entnehmen waren. Weiterhin wurden auch bestehende Modelle verwendet (z.B. für die Blitzstromspeisung als eingepprägter Stoßstrom, für Varistoren), und es wurden eigene Modelle aus den relevanten physikalischen Gegebenheiten und unter Verwendung einschlägiger Fachliteratur abgeleitet (z.B. für Freileitungen, für Kabel, für Erdungswiderstände).

Aus den vorgenannten Modellen wurden Ersatzschaltbilder zusammengestellt und dafür mit einem Netzwerkanalyse-Programm numerische Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden abschließend ausgewertet.

7 Literatur

- [1] DIN EN 60071-1 (VDE 0111-1):2006-11: „Isolationskoordination – Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen“
- [2] DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1):2006-10: „Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze“
- [3] KTA 2206:2000-06: „Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen“
- [4] IEC 81/295/CD (IEC 62305-1 Edition 2.0): 2007-11: “Protection against lightning – Part 1: General Principles”
- [5] DIN EN 60099-5 (VDE 0675-5):2000-09: „Überspannungsableiter - Teil 5: Anleitung für die Auswahl und die Anwendung“
- [6] CIGRE Study Committee 33 „Overvoltages and Insulation Coordination, WG 02 “Internal Overvoltages”: Guidelines for representation of network elements when calculating transients”, 1990.
- [7] IEC 28/156/DTR (IEC 60071-4, TR, Ed. 1):2002-12: “Insulation coordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks”
- [8] IEC 60071-2:1996-12: “Insulation coordination – Part 2: Application guide”
- [9] Metwally, I. A.; Heidler, F.: “Induced Voltages in AC Overhead Power Lines and Shared-Corridor Pipelines during Normal Operation and Lightning Strikes”, ICLP 2004, 27th International Conference on Lightning Protection, AVIGNON, FRANCE, 2004
- [10] Beierl, O.: “Elektromagnetische Verträglichkeit beim Blitzeinschlag in ein Gebäude”; Dissertation, TU München 1991
- [11] Hilberg, W.: “Impulse auf Leitungen”, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1981
- [12] Lindenmeier, S.: “Electromagnetic Coupling”, Carl-Cranz-Gesellschaft e.V., Fachtagung “Electromagnetic Compatibility” vom 27.05. – 30.05.2008 in Oberpfaffenhofen

Danksagung

Die in diesem Beitrag präsentierten Ergebnisse entstanden im Rahmen der Arbeiten einer Arbeitsgruppe des VGB e.V. (Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber), die durch die Energieversorgungsunternehmen ENBW, E.On, RWE, Vattenfall Europe finanziert wird. Für ihre Mitarbeit und Unterstützung gilt den Firmen und allen Beteiligten der Arbeitsgruppe ein besonderer Dank.