

Bewertung des Blitzschutzes von Schaltanlagen und Betriebsmitteln der Hoch- und Mittelspannung durch Simulationen.

Dr.-Ing. Ricard Petranovic, ABB AG, Elektrische Systemberatung

1. Einleitung

Blitzeinschläge stellen für elektrische Betriebsmittel hinsichtlich der Isolationskoordination die höchsten auftretenden Belastungen dar. Trotz der Prüfung der Betriebsmittel mit einer Stehspannung, die nach der höchsten Spannung für Betriebsmittel U_m ausgesucht wird, kann bei verschiedenen Konfigurationen von Schaltanlagen ein Überschreiten dieser Prüfspannung und somit ein Isolationsversagen erfolgen. Da es, speziell für die höheren Spannungsebenen ($U_m > 245$ kV), nicht wirtschaftlich ist alle wahrscheinlichen Überspannungen abzudecken, sollte man hier fallweise den nötigen zusätzlichen Anlagenschutz mit Hilfe von Simulationen ermitteln. Dafür kommen i.d.R. Überspannungsableiter zum Einsatz, die die einlaufende Blitzspannungswelle auf die Restspannung U_{res} des Ableiters begrenzen. Da Ableiter für gasisolierte Schaltanlagen, im Vergleich zu Ableitern in Freiluftschaltanlagen, in höheren Spannungsebenen teuer sind, sollte man diese zur Vermeidung von Kosten nur dort einsetzen, wo sie auch benötigt werden. Eine solche Bewertung wird am besten mit einer Simulation an einem entsprechenden Modell durchgeführt. Hierbei werden zuerst anhand der Mastgeometrie der direkt an der Anlage angrenzenden Hochspannungsmasten die kritischen Blitzströme ermittelt. Das Modell der Anlage wird dann mit diesen Blitzparametern beaufschlagt, um die auftretenden Spannungsbelastungen zu untersuchen. Dabei wird mit dem letzten Mast vor der Schaltanlage, dem sogenannten Abspannmast, begonnen. Mit der maximal zulässigen Überspannung der Betriebsmittel kann dann bewertet werden, bei welchen Einschlagorten noch unzulässig hohe Überspannungen auftreten und an welchen Stellen Ableiter zum Schutz notwendig sind.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte anhand eines Beispiels näher erläutert und die Ergebnisse diskutiert.

2. Modellbildung

2.1 Blitzparameter

Der Blitzeinschlag in eine Freileitung wird anhand zweier unterschiedlicher Fälle betrachtet. Zum einen gibt es den direkten Leiterseileinschlag in einen der Leiter und zum anderen den rückwärtigen Überschlag nach einem Einschlag in das Erdseil oder den Freileitungsmast mit anschließendem Überschlag am Isolator. In dieser Veröffentlichung wird lediglich der Naheinschlag ($l < 1$ km) betrachtet, da dieser in der Regel zu kritischeren Ergebnissen hinsichtlich Spannungsbeanspruchung führt. Der Ferneinschlag wird folglich nicht berücksichtigt.

2.1.1 Direkter Leiterseileinschlag

Nach [1] können Blitze mit einer maximalen Einschlagdistanz von $r_{s \max}$ das Erdseil unterwandern und in das Leiterseil einschlagen. Die maximale Einschlagdistanz $r_{s \max}$ hängt hierbei von der Mastgeometrie ab und kann anhand von Gleichungen berechnet werden. Ebenfalls mit $r_{s \max}$ verknüpft ist der maximale Strom I_{\max} . Blitze mit einer höheren Amplitude schlagen entweder in den Erdboden, das Erdseil oder den Mast ein. Die Höhe des maximalen Blitzstroms I_{\max} wird über die Spannungsfestigkeit des Isolators nach oben begrenzt und im Folgenden mit I_{krit} bezeichnet. Die Durchschlagspannung der Luftstrecke des Isolators hängt zudem noch von der Polarität der anliegenden Systemspannung ab, weshalb eine Unterteilung in positive und negative Systemspannung stattfindet. Daher werden neben I_{krit} auch noch $I_{\text{krit+}}$ und $I_{\text{krit-}}$ eingeführt. Die Steilheit der Blitzwelle kann anhand von [2] über den maximalen Strom I_{\max} berechnet werden. Dabei wird zwischen Erst- und Folgeblitzen unterschieden. Nach [2] besteht ein Blitz im statistischen Mittel aus drei Einschlägen pro Blitz. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wird von der größeren Steilheit des Folgeblitzes ausgegangen. Die Rückenhalbwertszeit der Welle wird nach [3] mit $140 \mu\text{s}$ angenommen. Für den direkten Leiterseileinschlag ist es daher notwendig, die folgenden Parameter der einlaufenden Welle zu bestimmen, da diese die Eingangsgröße für die Simulation darstellen:

- Blitzstromamplitude (I in kA)
- Blitzstromsteilheit (S in $\text{kA}/\mu\text{s}$)

In Abhängigkeit vom Einschlagort, läuft die Welle in beide Richtungen und erfährt dabei durch Korona-Dämpfungseffekte eine Abflachung, so dass die ursprüngliche Steilheit in Abhängigkeit von der Leiterart (Einfachleiter, Zweierbündel,...) sowie der Strecke zur Schaltanlage vermindert wird [3]. Bild 1 zeigt einen Freileitungsmast einer 380 kV-Leitung mit zugehörigem Verlauf des Blitzstroms für den direkten Leiterseileinschlag. Anhand der Mastgeometrie kann man die zuvor definierten Parameter zu $I_{\max} = 26,13 \text{ kA}$, $I_{\text{krit}} = 21,7 \text{ kA}$, $I_{\text{krit+}} = 19,6 \text{ kA}$, $I_{\text{krit-}} = 23,8 \text{ kA}$ und $S = 0,56 \text{ kA}/\mu\text{s}$ berechnen.

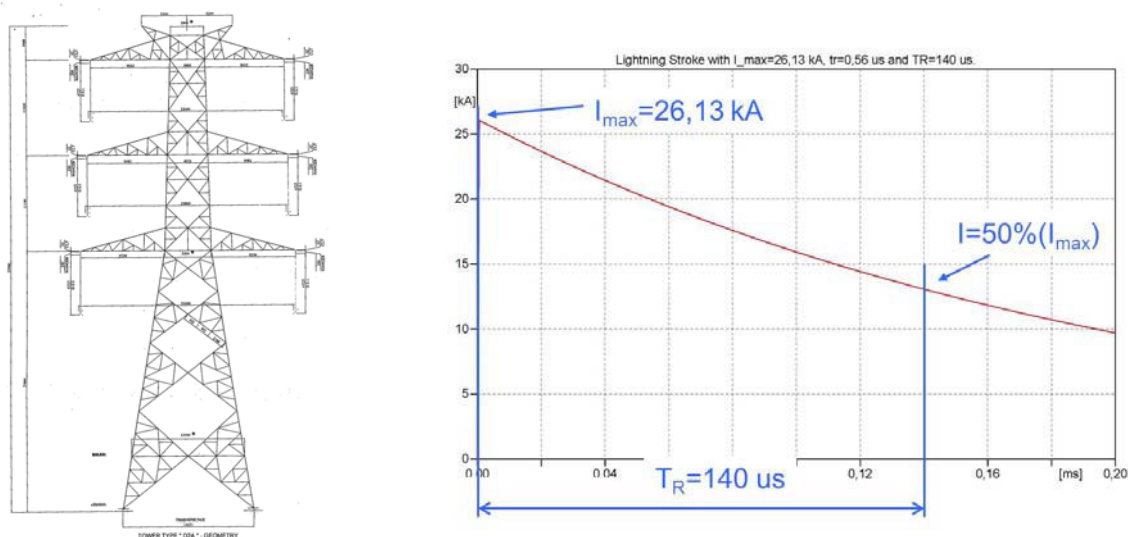


Bild 1: Freileitungsmast für 2 x 380 kV-Systeme mit zugehörigem Stromverlauf bei direktem Leiterseileinschlag.

2.1.2 Rückwärtiger Überschlag

Bei einem Blitzeinschlag in das Erdseil oder den Freileitungsmast kann das Potenzial der geerdeten Teile gegenüber dem Leiterseil so weit angehoben werden, dass die Spannungsfestigkeit des Freileitungsisolators überschritten wird und ein Überschlag über dem Isolator stattfindet. Als Folge dieses Zusammenbruchs läuft eine steile Spannungswelle (Steilheit $\approx 0,1 \mu\text{s}$) in die Schaltanlage ein. Hierfür maßgebend sind die Wellenwiderstände des Erdseils und des Freileitungsmasts, der Stoßerdungswiderstand des Masts sowie die zeitabhängige Spannungsfestigkeit des Isolators. Für den rückwärtigen Überschlag ist es daher notwendig, die folgenden Parameter der einlaufenden Welle zu bestimmen, da diese die Eingangsgröße für die Simulation darstellen:

- Spannung über dem Isolator (U_{isol} in kV)
- Rückenhalbwertszeit der Welle (τ in μs)

Für den in Bild 1 gezeigten Mast ermittelt man die relevanten Parameter zu $U_{\text{isol}} = 1543 \text{ kV}$ und $\tau = 16,6 \mu\text{s}$. Der für den Überschlag am Isolator erforderliche Blitzstrom beträgt hierbei $I = 123 \text{ kA}$. D.h. kleinere Blitzströme führen bei dieser Konfiguration nicht zu rückwärtigen Überschlägen. Um eine Abschätzung auf der sicheren Seite zu machen, wird als weiterer Strom zusätzlich der nach [2] maximal gemessene Strom von 200 kA verwendet. Hiermit erhält man als relevante Parameter $U_{\text{isol}} = 2042 \text{ kV}$ und $\tau = 16,6 \mu\text{s}$. Bild 2 zeigt den Spannungsverlauf für den ersten Fall mit $I = 123 \text{ kA}$. Die Anstiegszeit wird jeweils mit den oben erwähnten 100 ns angenommen.

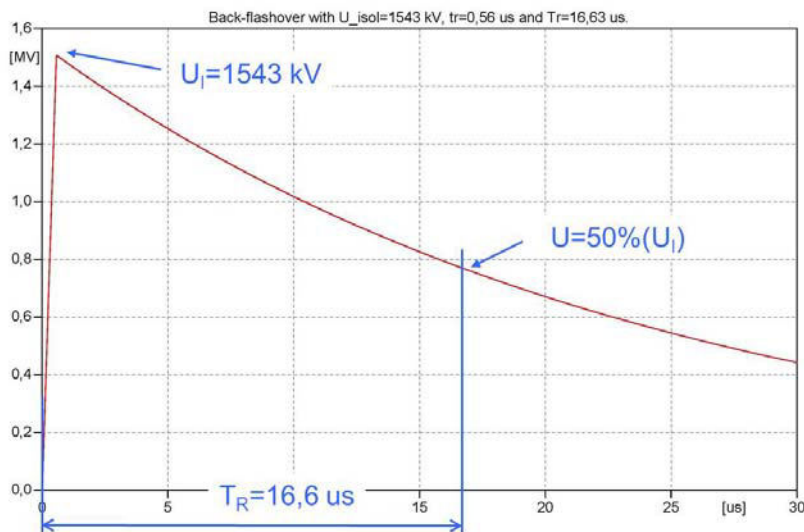


Bild 2: Verlauf des rückwärtigen Überschlages für den zuvor gezeigten 380 kV-Mast.

2.1.3 Wahrscheinlichkeit

Ein weiterer wichtiger Parameter bei der Betrachtung von Blitzeinschlägen ist die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses. Hierfür wird anhand der Mastkonfiguration und der durchschnittlichen jährlichen Blitzstromdichte die Anzahl der Leitungsblitze pro 100 km und Jahr (N_S) nach [2] berechnet. Von diesen Leitungsblitzen ist nur ein geringer Anteil ein direkter Leiterseileinschlag oder hat eine so hohe Amplitude, dass daraus ein

rückwärtiger Überschlag entsteht. Der Rest schlägt ohne Folgen für den Betrieb in den Mast oder das Erdseil ein. Tabelle 1 zeigt die berechneten Werte für den hier betrachteten Mast mit einem sogenannten keraunischen Pegel von 6 Tagen/Jahr (Anzahl der Blitze pro Jahr).

Ereignisse / 100 km / Jahr	
N_{tot}	24
N_{dir}	0,149
$N_{\text{rück1}}$	0,648
$N_{\text{rück2}}$	0,187

Tabelle 1: Wahrscheinlichkeitsverteilung für die verschiedenen Ereignisse des Masts aus Bild 1.

D.h. pro Jahr und auf 100 km schlagen 24 Blitze in die Leitung ein (pro Gewittertag können mehrere Blitze einschlagen), wovon lediglich 0,149 Blitze direkte Leiterseileinschläge sind. Für den rückwärtigen Überschlag wird ein minimaler Blitzstrom von 123 kA benötigt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Ereignis stattfindet, wird mit 0,648 angegeben. Als „Worst Case“-Abschätzung wird dann noch mit einem Blitz mit einer Amplitude von 200 kA gerechnet. Durch die höhere Amplitude erhält man eine geringere Wahrscheinlichkeit von 0,187 Ereignissen pro 100 km und Jahr.

2.2 Simulationsmodell

Die Simulationen werden mit dem weltweit anerkannten Programm EMTP/ATP [4] durchgeführt, wobei als Eingabeprogramm der graphische Präprozessor ATP Draw [5] zum Einsatz kommt. Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Komponenten mit entsprechender Nachbildung erläutert.

2.2.1 Freileitung

Die Freileitung wird mit dem in ATP Draw verfügbaren Modell LCC nachgebildet. Hierbei gibt man sowohl die geometrischen Daten des Masts als auch die Materialdaten der Leiter- und Erdseile an. Das verwendete Modell arbeitet mit konstanten Parametern. D.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die Dämpfung und der Wellenwiderstand sind frequenzunabhängig. Die Isolatoren werden bei dem hier gemachten Ansatz nicht nachgebildet, da der erforderliche Blitzstrom und die daraus resultierende Spannung über dem Isolator für einen rückwärtigen Überschlag mit einem eigenen Programm berechnet wird, welches die Mastparameter berücksichtigt.

2.2.2 Überspannungsableiter

Ableiter werden mit dem Modell eines nichtlinearen Widerstands nachgebildet. Anhand der maximalen Dauerspannung U_C kann ein Ableiter ausgewählt und die für die Modellierung erforderliche Restspannung bei unterschiedlichen Amplituden in einem entsprechenden Datenblatt des Herstellers abgelesen werden. Zur Vervollständigung des Modells wird noch die Anbindung des Ableiters an die zu schützenden Betriebsmittel mit

1 μ H/m berücksichtigt. Auf die Nachbildung frequenzabhängiger Vorgänge wird hierbei verzichtet.

2.2.3 Kabel

Kabel können, wie die in 2.2.1 behandelten Freileitungen auch, mit unterschiedlichen Modellen nachgebildet werden. Im vorliegenden Fall wird das Modell LCC mit dem geometrischen Aufbau des Kabels unter Berücksichtigung der Verlegeart (Dreieck oder Flach) in der Erde verwendet.

2.2.3 Schaltanlage

Bei den Schaltanlagen unterscheidet man zwischen luftisolierten - (AIS) und gasisolierten Schaltanlagen (GIS). Bei einer AIS hat man vereinfacht Rohrsammelschienen und Leiterseile, um die Komponenten wie Trenner, Leistungsschalter Wandler,... miteinander zu verbinden. Die Nachbildung der AIS erfolgt daher mit dem bereits bei der Freileitung eingesetzten LCC-Modell mit konstanten Parametern. Die einzelnen Komponenten können mit Ihrer Kapazität gegen Erde berücksichtigt werden. Bei Nichtberücksichtigung liegt man mit den Überspannungen auf der sicheren Seite. Bei einer GIS hängt der Aufbau von der Spannungsebene ab. Je nach Hersteller hat man bei Spannungen bis 170 kV alle drei Phasen in einem metallenen Gehäuse, was eine Nachbildung mit dem Modell der „Enclosing Pipe“ im LCC-Modul ermöglicht. Für höhere Spannungsebenen erfolgt der Aufbau einphasig, wodurch jede Phase mit ihrem Wellenwiderstand sowie der Ausbreitungsgeschwindigkeit nachgebildet werden kann.

2.2.4 Transformatoren

Die Nachbildung eines Transformators erfolgt in Blitzstudien recht einfach über die Klemmenkapazität zwischen Trafodurchführung und Trafokessel, sowie der Stoßimpedanz des Trafos. Diese kann über die Klemmenkapazität sowie die Hauptinduktivität ermittelt werden. Weiter wird noch der Stoßerdungswiderstand berücksichtigt.

3. Fallstudie

Mit den zuvor erläuterten Grundlagen soll nun für eine 400 kV GIS mit Betriebsmitteln eine Untersuchung durchgeführt werden.

3.1 Modell

Bei der Anlage handelt es sich um eine GIS, die über Freileitungen an das 400 kV-Netz angebunden ist und die Energie über 400/300/33 kV Umspanner weiterverteilt. Die berücksichtigten Schaltzustände, die zu Ergebnissen auf der sicheren Seite führen, sind zum einen die Kopfstation mit einer Freileitung, die über die GIS einen Transformator speist und zum anderen ein geöffneter Leistungsschalter am Freileitungsabgang, was z.B. nach einem Fehler während einer Kurzunterbrechung (KU) auftreten kann. Alle an-

deren Szenarien mit zusätzlich zugeschalteten Abgängen führen hinsichtlich Spannungsbeanspruchung zu unkritischeren Ergebnissen. Bild 3 zeigt das für die Simulationen verwendete EMTP-Modell. Hierbei wird die Freileitung über ein 3 km-Kabel mit der GIS verbunden. Der Trafo ist über GIS-Durchführungen direkt mit der Schaltanlage verbunden. In der Konfiguration sind sowohl an den Trafoklemmen als auch am Übergang Freileitung - Kabel Ableiter vorhanden. In der Studie sollte nachgewiesen werden, dass diese Konfiguration ausreichend ist und daher auf zusätzliche Ableiter am Übergang Kabel - GIS verzichtet werden kann. Im Folgenden werden die beiden Fälle des direkten Leiterseileinschlags sowie des rückwärtigen Überschlags untersucht und bewertet.

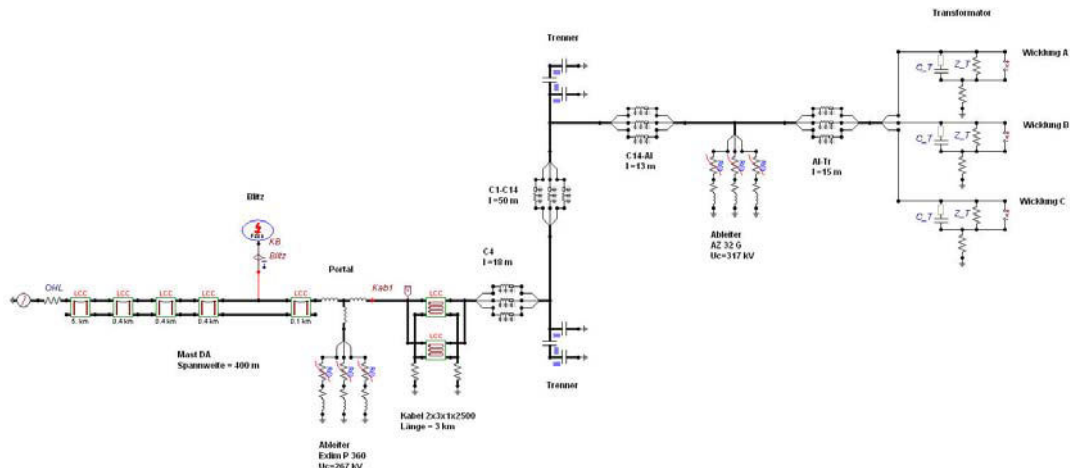


Bild 3: EMTP-Modell für den Fall mit einer Freileitung und einem Transformatorabgang.

3.2 Direkter Leiterseileinschlag

Generell wird zuerst der direkte Leiterseileinschlag in den letzten Mast vor der Schaltanlage, den sogenannten Abspannmast, untersucht. Durch die geringe Strecke zwischen Einschlagort und zu schützenden Betriebsmitteln erfolgt lediglich eine kleine Abflachung der Steilheit der einlaufenden Blitzwelle durch Corona-Dämpfung. Dadurch stellt dieses Ereignis den „Worst Case“ hinsichtlich einlaufender Welle beim direkten Leiterseileinschlag dar. Dann wird der Einschlagort sukzessive um eine Spannfeldweite zum nächsten Mast erhöht, was wiederum in einer verringerten Steilheit der Blitzwelle resultiert. Diese Prozedur wird so lange fortgesetzt, bis die maximal auftretende Spannung an den untersuchten Betriebsmitteln unter der maximal zulässigen Spannung $U_{\text{max-zul}}$ bleibt. $U_{\text{max-zul}}$ wird aus der genormten Bemessungs-Blitzstoßspannung der Betriebsmittel und einem Sicherheitsfaktor K_s [3] ermittelt. Im vorliegenden Fall kommt man auf $U_{\text{max-zul}} = 1240 \text{ kV}$. Tabelle 2 zeigt die Simulationsergebnisse für die direkten Leiterseileinschläge in die beiden ersten Masten mit den unterschiedlichen Strömen. Die Spannungen werden am Kabelein- und -ausgang sowie an den Trafoklemmen ermittelt.

Mast	Strom / kA	Systemspannung	U_{Kabel_1} / kV	U_{Kabel_2} / kV	U_{Trafo} / kV
1	26	Pos.	928	937	979
2	20	Pos.	881	892	869
2	24	Neg.	811	814	820

Tabelle 2: Leiter-Erde-Spannungen am Kabeleingang, -ausgang sowie an den Trafoklemmen bei direktem Leiterseileinschlag in den Abspannmast, sowie den zweiten Mast.

Dabei wird der Abspannmast mit der maximalen Amplitude $I_{\max} = 26,13 \text{ kA}$ beaufschlagt, da dort durch die angrenzende Schaltanlage von besseren Erdungsbedingungen ausgegangen wird, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines rückwärtigen Überschlags verringert wird. Ab dem zweiten Mast wird dann, je nach Vorzeichen der Systemspannung, mit den beiden kritischen Werten $I_{\text{krit}+} = 19,6 \text{ kA}$, und $I_{\text{krit}-} = 23,8 \text{ kA}$ simuliert. Bild 4 zeigt zwei Spannungsverläufe für einen Einschlag in den Abspannmast sowie den zweiten Mast für den Fall der positiven Systemspannung. Die rote Gerade stellt die maximal zulässige Spannung von 1,24 MV dar. Wie man erkennen kann, liegen die Spannungen bereits für den Fall des direkten Leiterseileinschlags in den Abspannmast mit $U_{\text{Trafo}} = 979 \text{ kV}$ unter der maximal zulässigen Spannung. Für den zweiten Mast sinkt die maximale Spannung erwartungsgemäß weiter auf $U_{\text{Kabel}_2} = 892 \text{ kV}$. Somit kann auf weitere Untersuchungen verzichtet werden. Der zweite Fall des offenen Leistungsschalters führt zu ähnlich unkritischen Ergebnissen. Der Übersichtlichkeit wegen wird auf eine Darstellung verzichtet.

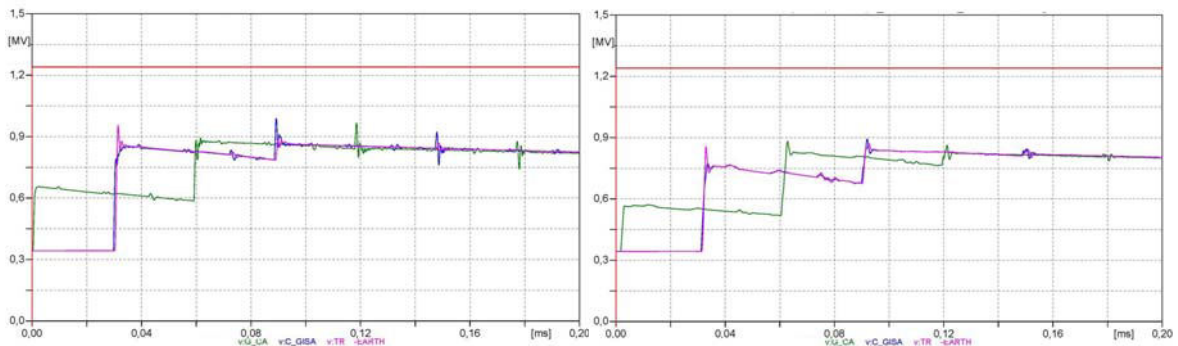


Bild 4: Simulationsergebnisse für den direkten Leiterseileinschlag in den Abspannmast, sowie den zweiten Mast.

3.3 Rückwärtiger Überschlag

Neben dem direkten Leiterseileinschlag erfolgt auch die Betrachtung des rückwärtigen Überschlags. Es wird angenommen, dass durch die Nähe zur Schaltanlage, mit deren verbesserten Erdungsbedingungen, am Abspannmast kleinere Erdungswiderstände als an den restlichen Masten vorhanden sind. Daher wird der rückwärtige Überschlag erst ab dem zweiten Mast betrachtet. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, erhält man für den betrachteten Mast als minimalen Strom der zum Überschlag führt $I = 123 \text{ kA}$ mit einer resultierenden Spannung von $U_{\text{isol}} = 1543 \text{ kV}$. Für den maximalen Strom von $I = 200 \text{ kA}$ erhält man $U_{\text{isol}} = 2042 \text{ kV}$. Tabelle 2 zeigt die Simulationsergebnisse für die beiden Fälle.

Mast	Strom / kA	U_{isol} / kV	U_{Kabel_1} / kV	U_{Kabel_2} / kV	U_{Trafo} / kV
2	123	1543	207	237	250
2	200	2042	307	347	363

Tabelle 2: Leiter-Erde-Spannungen am Kabeleingang, -ausgang sowie an den Trafoklemmen bei rückwärtigem Überschlag am 2ten Mast.

Wie man der Tabelle entnehmen kann, ist die maximale Spannungsbelastung mit 250 kV bzw. 363 kV an den Transformatorklemmen für die beiden Fälle mit 123 kA bzw. 200 kA weit unter der maximal zulässigen Spannungsbeanspruchung von 1240 kV. Bild 5 zeigt den Spannungsverlauf für die drei Punkte Kabelein- und ausgang und Trafoklemmen.

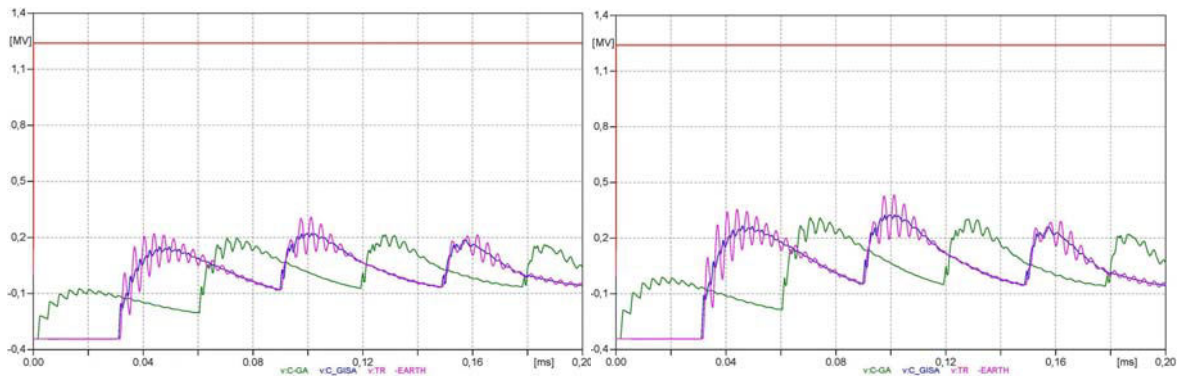


Bild 5: Simulationsergebnisse für den rückwärtigen Überschlag am zweiten Mast.

3.4 Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse der beiden untersuchten Fälle kann die vorliegende Schutzbechaltung mit Ableitern sowohl an den Trafoklemmen als auch am Übergang Freileitung - Kabel als ausreichend angesehen werden. Da die Spannungen selbst für den kritischsten Fall des Blitzeinschlags in die beiden ersten Masten 1 & 2 unterhalb der maximal zulässigen Spannung bleiben, kann auf eine Betrachtung der auftretenden Wahrscheinlichkeit für diese Ereignisse verzichtet werden.

4. Literatur

- [1] Gordon W. Brown; Lightning Performance – I, Shielding Failures Simplified; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97; 1978.
- [2] Anderson, R.B.; Eriksson, A.J.: Lightning Parameters for Engineering Application, Electra, No 69.
- [3] EN 60071-2, Isolationskoordination, Teil 2: Anwendungsrichtlinie
- [4] Hermann W. Dommel, .EMTP theory book, B.P.A., 1986
- [5] Laszlo Prikler, Hans Kristian Hoidalen: ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/ 2000/XP/Vista Users' Manual; Preliminary Release No. 1.0, November 2009.
- [6] ABB Schweiz AG, Anwendungsrichtlinien Überspannungsschutz; Bemessung, Prüfung und Einsatz von Metalloxidableitern in Mittelspannungsnetzen; Juli 2008