

# **Ermittlung des Schaltvermögens von Hochspannungs- Leistungsschaltern beim Auftreten generatornaher Kurz- schlussströme mit ausbleibenden Nulldurchgängen**

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der  
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen  
Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur Stefan Fenske

geboren am 18.10.1978 in Bad Muskau

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. K. Pfeiffer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Heinz-H. Schramm

Tag der mündlichen Prüfung: 11.03.2011

## **Kurzfassung**

### **Ermittlung des Schaltvermögens von Hochspannungs-Leistungsschaltern beim Auftreten generatornaher Kurzschlussströme mit ausbleibenden Nulldurchgängen**

Hochspannungs-Leistungsschalter vermögen den Kurzschlussstrom nur in seinem Nulldurchgang zu unterbrechen. Es ist also der jeweilige Fall daraufhin zu untersuchen, ob es bei generatornahen Kurzschlüssen zu Stromnulldurchgängen kommt, oder ob dem Schalter durch externe Maßnahmen die Möglichkeit zur Stromunterbrechung gegeben werden muss.

In dieser Arbeit wurde ein Rechenverfahren entwickelt, mit dem bei geringem Aufwand festgestellt werden kann, ob ein gegebener Hochspannungs-Leistungsschalter im vorgegebenen Kreis bei anzugebenden Betriebszuständen einen Kurzschluss mit ausbleibenden Stromnulldurchgängen beherrscht.

Das Rechenverfahren wurde mit Hilfe des Netzberechnungsprogramms PowerFactory der Firma DlgSILENT GmbH entwickelt. Es beinhaltet ein neues dreiphasiges Leistungsschaltermodell, das das Ein- und Ausschaltverhalten eines Leistungsschalters simuliert und alle wichtigen die ausbleibenden Stromnulldurchgänge verursachenden Faktoren berücksichtigt. Zudem werden sämtliche auftretenden Generatorbetriebszustände und die das Auftreten von ausbleibenden Stromnulldurchgängen verursachenden worst-case-Szenarien automatisch berechnet.

In der Arbeit wurde untersucht, unter welchen Umständen im zeitlichen Verlauf des generatorseitigen Kurzschlussstromes ausbleibende Stromnulldurchgänge auftreten und welche Parameter den größten Einfluss auf den Kurzschlussstromverlauf haben. Zudem wurde die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von ausbleibenden Stromnulldurchgängen in Abhängigkeit der genannten Parameter in realen Anwendungen abgeschätzt.

Die vorliegende Arbeit ist notwendig, da die zukünftige Entwicklung der Hochspannungs-Leistungsschalter dazu führt, dass die einzelnen Unterbrechereinheiten für eine höhere Bemessungsspannung ausgelegt werden als bisher. Damit sinkt bei höheren Nennspannungen (z.B. > 362 kV) die Zahl der Unterbrechereinheiten pro Schalterpol. Als Folge sinkt auch die Lichtbogenspannung je Schalterpol, und es verringert sich der die Gleichstromzeitkonstante verkürzende Einfluss, so dass gegebenenfalls konstruktive Maßnahmen erforderlich werden.

## **Abstract**

### **Determination of high voltage circuit-breaker breaking capability in case of generator short-circuit currents with delayed zero crossings**

High-voltage circuit breakers are capable of interrupting the short-circuit current only in its zero crossing. Therefore in the case of short circuits close to generators it has to be determined whether and when there are current zero crossings, or whether the circuit breaker must be given the possibility of current interruption by external measures.

In this work a computational procedure was developed. It can be determined with little effort whether a given high-voltage circuit breaker in a given circuit under predetermined operating conditions can control a short-circuit current with absence of zero crossings. As a result it is possible to make statements of the breaking capability of a new high-voltage circuit breaker even during the development.

The computational method is based on the network calculation program PowerFactory of the company DlgSILENT GmbH. It includes a new three-phase breaker model that simulates turn-on and turn-off transients and includes the factors which cause the absence of current zero crossings. In addition, all occurring generator operating conditions and the occurrence of absence of current zero crossings that cause worst-case scenarios are automatically calculated.

In the study it was investigated, under what generator conditions short-circuit currents with delayed zero crossings may occur and which parameters have the greatest impact on the short-circuit current flow. Moreover, the probability of absence of current zero crossings in dependence on those parameters was estimated in actual applications.

This work is a contribution to the future development of high-voltage circuit breakers, as the individual breaker units are designed for a rated voltage higher than before. Consequently at higher voltages (e.g. > 362 kV) the number of breaking units per circuit-breaker pole will decrease. As a result, the arc voltage per circuit-breaker pole will decrease as well, and reduce the d.c. time constant shortening effect.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Voraussetzungen für das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen.....	3
2.1	Fehlerort .....	3
2.2	Zeitpunkt des Eintritts eines generatornahen Kurzschlusses .....	6
2.2.1	Dreiphasiger simultaner Kurzschluss .....	6
2.2.1.1	Dreiphasiger simultaner Kurzschluss, wenn die Spannung einer Phase Null ist .....	6
2.2.1.2	Dreiphasiger simultaner Kurzschluss, wenn das Wechselstromglied schneller als das Gleichstromglied abklingt .....	8
2.2.2	Nicht-simultaner Kurzschluss.....	9
2.3	Betriebszustand des Generators.....	12
2.4	Spannungsregelung des Generators.....	13
2.5	Schnellentregung des Generators .....	14
2.6	Transformatorstufung.....	15
3	Der Leistungsschalter .....	17
3.1	Lichtbogen.....	17
3.2	Vorüberschlag .....	21
3.3	Transienter Einschaltstrom.....	23
4	Vorstellen von DIgSILENT PowerFactory .....	26
5	Simulation des Ausschaltvorgangs .....	31
5.1	Eingabe des Netzes in PowerFactory .....	31
5.2	Notwendige PowerFactory-Einstellungen.....	38

---

5.3	Einschaltverhalten .....	41
5.4	Eingabe der Parameter für den Ausschaltvorgang .....	44
5.5	Eingabe der Generatorarbeitspunkte .....	46
5.6	Ausschaltzenarien .....	47
5.7	Integration eines neuen Leistungsschaltertyps .....	49
5.8	Berücksichtigung der Generatorbetriebszustände .....	54
5.9	Ausgabe der Werte in PowerFactory.....	60
6	Beanspruchung des Leistungsschalters beim Ausschalten von Strömen mit ausbleibenden Nulldurchgängen.....	63
6.1	Einflussfaktoren für das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen.....	63
6.2	Wahrscheinlichkeit des Ausbleibens von Stromnulldurchgängen .....	67
6.3	Möglichkeit des Abschaltens.....	71
6.4	Abschaltvermögen bei Lichtbogenzeiten größer als $t_{arcmax}$ .....	72
7	Fazit .....	75
8	Anhang.....	81
8.1	Formelzeichen, Indizes, Einheiten .....	81
8.2	Abkürzungsverzeichnis .....	84
8.3	Abbildungsverzeichnis .....	85
8.4	Literaturverzeichnis.....	89
9	Anhänge.....	91

# 1 Einleitung

Tritt bei bestimmten Betriebszuständen eines Generators in seiner Nähe ein Kurzschluss auf, kann unter bestimmten Voraussetzungen dem Wechselstromglied des Kurzschlussstromes ein Gleichstromglied überlagert werden, das langsamer als das Wechselstromglied abklingt. Dies kann in einer oder zwei Phasen des kurzgeschlossenen Kreises zum Ausbleiben von Stromnulldurchgängen führen.

Die Abklingzeitkonstante  $\tau=L/R$  des Gleichstromgliedes ist gegeben durch die Daten des Kurzschlusskreises, d.h. der Generatoren und Transformatoren, Leitungsverbindungen, Leistungsschalter mit seinem Lichtbogenwiderstand und des Kurzschlusses selbst. Generatoren und Transformatoren neuerer Bauart haben durch ihre hohe Güte einen kleineren ohmschen Innenwiderstand als Geräte älterer Bauart. Die Wahrscheinlichkeit des Ausbleibens von Stromnulldurchgängen ist daher gestiegen.

Hochspannungs-Leistungsschalter vermögen jedoch den Kurzschlussstrom nur in seinem Nulldurchgang zu unterbrechen. Es ist also der jeweilige Fall daraufhin zu untersuchen, ob durch die Wirkung der Lichtbogenspannung des Schalters der ohmsche Widerstand des Kurzschlusskreises soweit erhöht wird, dass es dennoch zu Stromnulldurchgängen kommt, oder ob dem Schalter durch externe Maßnahmen die Möglichkeit zur Stromunterbrechung gegeben werden muss. Diese Problematik ist bekannt und wird rechnerisch für den jeweiligen Einsatzfall untersucht.

Die weitere Entwicklung von Hochspannungs-Leistungsschaltern führt dazu, dass die einzelnen Unterbrechereinheiten für eine höhere Bemessungsspannung ausgelegt werden können als dies bisher der Fall ist. Damit sinkt bei höheren Nennspannungen (z.B.  $> 362$  kV) die Zahl der Unterbrechereinheiten pro Schalterpol. Als Folge sinkt auch die Lichtbogenspannung je Schalterpol, und es verringert sich der die Gleichstromzeitkonstante verkürzende Einfluss.

---

Thema der vorliegenden Arbeit ist das Entwickeln eines Rechenverfahrens, mit dem bei verhältnismäßig geringem Aufwand festgestellt werden kann, ob ein gegebener Hochspannungs-Leistungsschalter im vorgegebenen Kreis bei anzugebenden Betriebszuständen einen Kurzschluss mit ausbleibenden Stromnulldurchgängen beherrscht. Damit wird es möglich, schon während der Entwicklung eines neuen Hochspannungs-Leistungsschalters Aussagen über sein diesbezügliches Schaltvermögen zu machen.

## 2 Voraussetzungen für das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen

### 2.1 Fehlerort

In Großkraftwerken speist der Generator in vielen Fällen direkt über Blocktransformatoren in das 380-kV- bzw. 500-kV-Netz. Am Generator befindet sich dann nur der Generatorlastschalter, der den Betriebsstrom, aber nicht den Kurzschlussstrom schaltet. Der Kurzschlussstrom wird vom Leistungsschalter Q1 auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators geschaltet. Die Entfernung zwischen Kraftwerk (mit Blocktransformator) und der Hochspannung-Schaltanlage kann ca. 1 km betragen (siehe Abbildung 1).

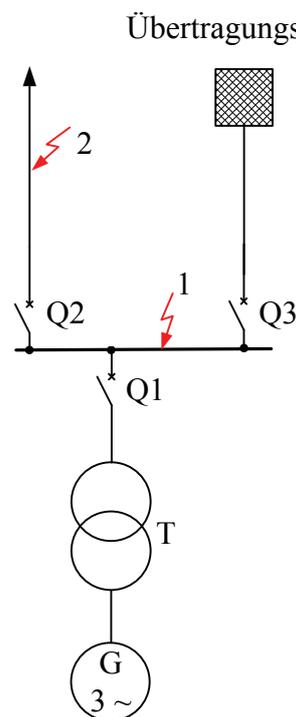


Abbildung 1: Grundsätzlich mögliche Fehlerorte

Beim generatornahen Kurzschluss fließt der vom Kraftwerk direkt gespeiste Kurzschlussstrom über den Hochspannungs-Leistungsschalter Q1 gespeist (Fehler 1 in Ab-

bildung 1). Der generatornahe Kurzschlussstrom besteht aus einem abklingenden Wechselstromglied und einem Gleichstromglied, dessen Höhe, in Relation zum Wechselstromglied, vom Zeitpunkt des Kurzschlusseintritts abhängt (Kapitel 2.2 und 2.4).

Das Gleichstromglied klingt mit der e-Funktion  $e^{-t/\tau}$  ab. Die Abklingzeitkonstante

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.1)$$

ist bestimmt durch die Reaktanz des Generators und des Blocktransformators sowie durch deren ohmsche Widerstände (einschließlich der ohmschen Widerstände der Verbindung zwischen Blocktransformator und dem den generatornahen Kurzschluss unterbrechenden Leistungsschalter Q1).

Der Lichtbogenwiderstand am Kurzschlussort ist eine weitere Einflussgröße. Wenn am Kurzschlussort zum Kurzschlusszeitpunkt statt einem metallischen Kurzschluss ein Kurzschluss mit Lichtbogen auftritt, z.B. als Überschlag über einen Isolator, verkürzt der Lichtbogenwiderstand die Dauer bis zum ersten resultierenden Stromnulldurchgang.

Generatoren und Transformatoren aktueller Bauweise haben so geringe ohmsche Widerstände, dass die Gleichstrom-Abklingzeitkonstante Werte von über 400 ms erreichen kann. Bei einem Kurzschluss am Fehlerort 2 in Abbildung 1 muss der Leistungsschalter Q2 einen Kurzschlussstrom unterbrechen, der aus dem vom Kraftwerk eingespeisten Kurzschlussstrom sowie aus einem vom angeschlossenen Netz gelieferten Beitrag besteht.

Während wie im Fall eines generatornahen Kurzschlusses der Verlauf des direkt aus dem Kraftwerk eingespeisten Anteils durch den vom Generator und Blocktransformator weitgehend bestimmten Verlauf des Wechselstromgliedes sowie durch die Höhe und Abklingzeitkonstante des Gleichstromgliedes gegeben ist, sind Höhe und Verlauf des vom Netz gelieferten Anteils durch die Netzimpedanz und sein Gleichstromglied weitgehend durch die Daten der zur Schaltanlage führenden Freileitungen bestimmt.

Typische Daten von 380-kV-Freileitungen mit Viererbündeln 380/50 Al/St sind:

$R' = 0,0185 \Omega/km$  und  $X' = 0,25 \Omega/km$ . Im 50-Hz-Netz ergibt sich daraus  $L' = 7,96 mH/km$  und eine Abklingzeitkonstante für das Gleichstromglied von

$\tau = L'/R' = 43 \text{ ms}$ . In der für Hochspannungs-Leistungsschalter relevanten Norm IEC 62271-100 [1] ist ein Wert  $\tau = 45 \text{ ms}$  genormt.

In den überwiegenden Fällen ist der Kurzschlussstrom-Anteil aus dem Netz größer als der generatorseitige Anteil. Ihre Überlagerung am Fehlerort 2 in Abbildung 1 ergibt einen Strom, der stets Nulldurchgänge aufweist und vom Leistungsschalter Q2 problemlos unterbrochen werden kann.

Der Strom- und Spannungsverlauf für einen dreipoligen Fehler ohne Erdberührung am Fehlerort 2 ist in der Abbildung 2 dargestellt.

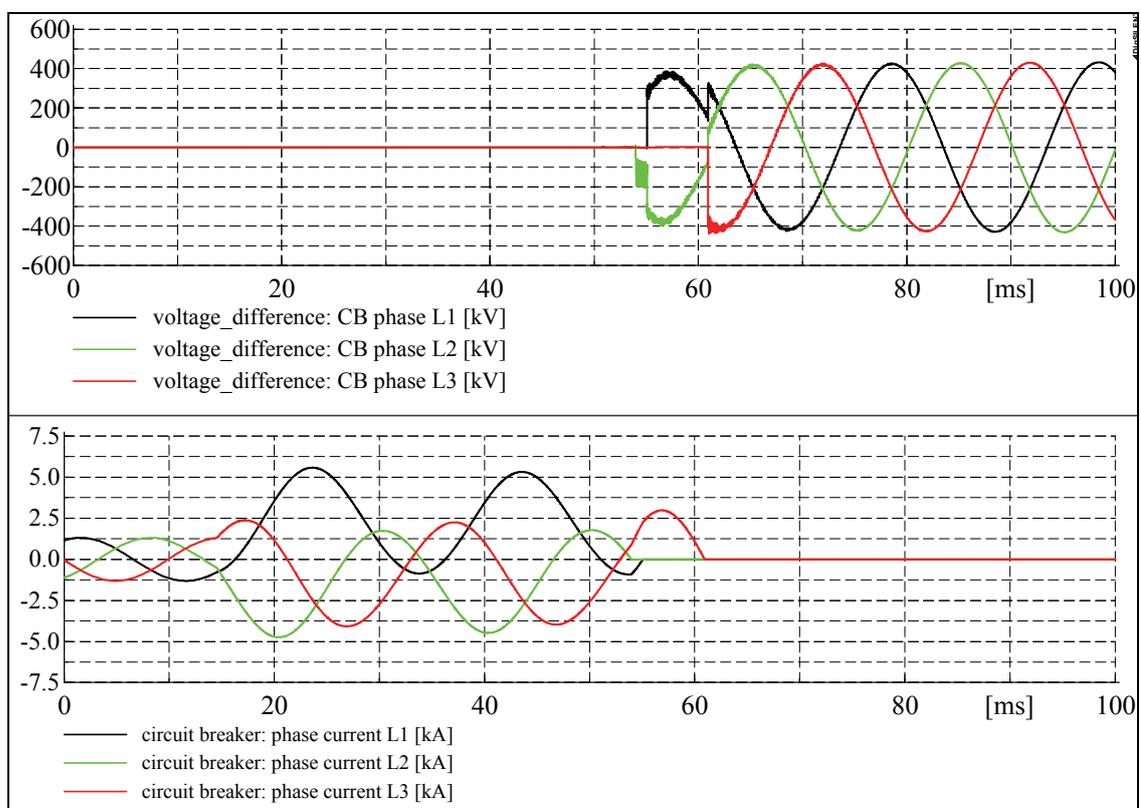


Abbildung 2: Strom- und Spannungsverlauf bei einem generatorfernen Kurzschluss

Der Fehlerort für das in Abbildung 2 dargestellte Szenario generatorfernen Kurzschluss befindet sich am Ende einer 10 km vom Leistungsschalter Q1 entfernten Freileitung.

Fehler mit ausbleibenden Stromnulldurchgängen werden grundsätzlich als zwei- oder dreipolige Fehler angesehen und daher dreipolig abgeschaltet. Auch im Fall eines einpoligen Fehlers tritt ein Gleichstromglied auf, dessen Anfangswert gleich dem des

Wechselstromglied ist. Ausbleibend Stromnulldurchgänge treten in diesem Fall im Allgemeinen nicht auf.

## **2.2 Zeitpunkt des Eintritts eines generatornahen Kurzschlusses**

Der Verlauf des Kurzschlussstromes ist weitgehend abhängig vom Zeitpunkt des Kurzschlusseintritts, bezogen auf den Verlauf der sinusförmigen treibenden Spannung, bzw. vom Momentanwert der Spannung an der Kurzschlussstelle. Kommt es im Spannungsscheitelwert zum Kurzschluss, so verläuft der Kurzschlussstrom symmetrisch zur Nulllinie.

Ein Gleichstromglied tritt bei einem generatornahen Kurzschluss immer auf, wenn der Kurzschluss nicht im Spannungsmaximum auftritt. Den größten Wert hat das Gleichstromglied, wenn der Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang eintritt. Das heißt, der Anfangswert des Gleichstromgliedes in einer Phase wird vom Momentanwert der Spannung an der Kurzschlussstelle unmittelbar vor Kurzschlusseintritt bestimmt.

### **2.2.1 Dreiphasiger simultaner Kurzschluss**

#### **2.2.1.1 Dreiphasiger simultaner Kurzschluss, wenn die Spannung einer Phase Null ist**

Ein dreiphasiger simultaner Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang der Phase L1 hat in der am meisten verlagerte Phase L1 ein Gleichstromglied von 1,0 p.u. Die beiden übrigen Phasen haben die Gleichstromglieder  $\pm 0,5$  p.u. (siehe Abbildung 3). Damit ist eine Stromunterbrechung in L1 und L3 jederzeit möglich.

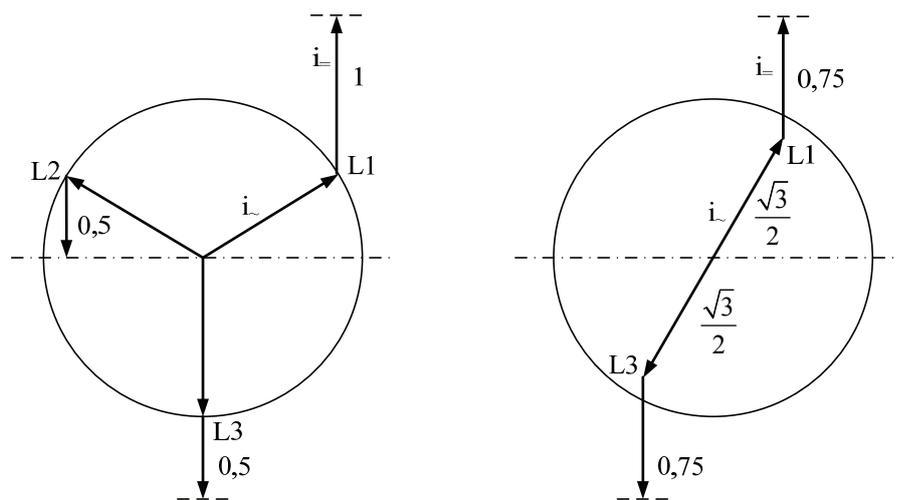


Abbildung 3: Stromzeigerdiagramme für den Übergang vom dreiphasigen zum einphasigen Fehler (Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang einer Phase)

Wird der Strom in Phase L2 als erstlöschende unterbrochen, so springen die Wechselstromglieder der beiden anderen Phasen auf  $\pm\sqrt{3}/2$  p.u. Durch das Abklingen des Wechselstromgliedes mögen, solange der Kurzschlussstrom dreiphasig floss, in L1 keine Nulldurchgänge aufgetreten sein (siehe Abbildung 4). Da sich bei diesem Phasensprung das Gleichstromglied auf  $\pm 0,75$  p.u. mehr verringerte als das Wechselstromglied, kann der Schalter nun auch die Ströme in L1 und L3 ohne weitere Verzögerung unterbrechen. [2]

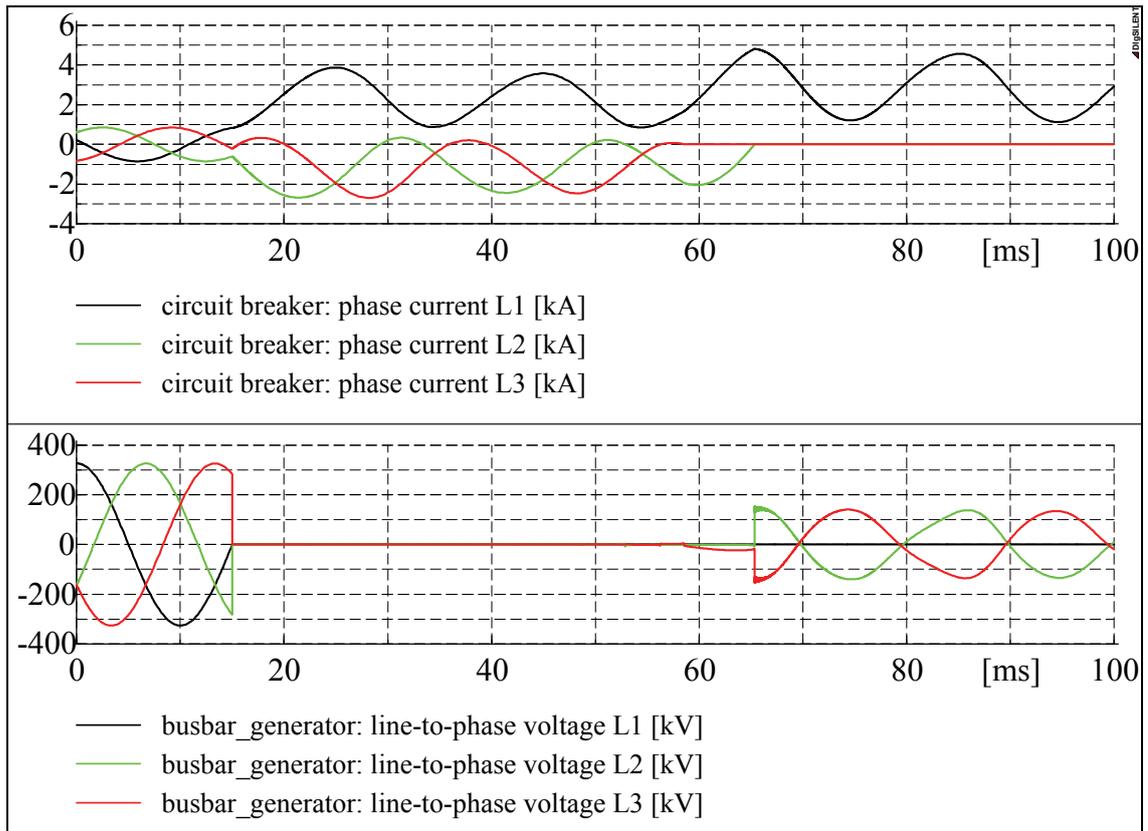


Abbildung 4: Simultane dreipoliger Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang der Phase L1 ohne Erdberührung

Das Szenario in Abbildung 4 ist mit untererregtem Betrieb des Generators simuliert worden. Der dreiphasige simultane Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang einer Phase ist ein hypothetischer Fall, der nur zur Erläuterung der Vorgänge dient.

### 2.2.1.2 Dreiphasiger simultaner Kurzschluss, wenn das Wechselstromglied schneller als das Gleichstromglied abklingt

Es wird angenommen, dass ein dreiphasiger simultaner Kurzschluss im Spannungsscheitelwert der Phase L2 auftritt (siehe Abbildung 5). Der Strom in L2 ist symmetrisch, die Gleichstromglieder in L1 und L3 betragen  $\pm\sqrt{3}/2$  p.u. In allen Phasen treten dadurch Stromnulldurchgänge auf.

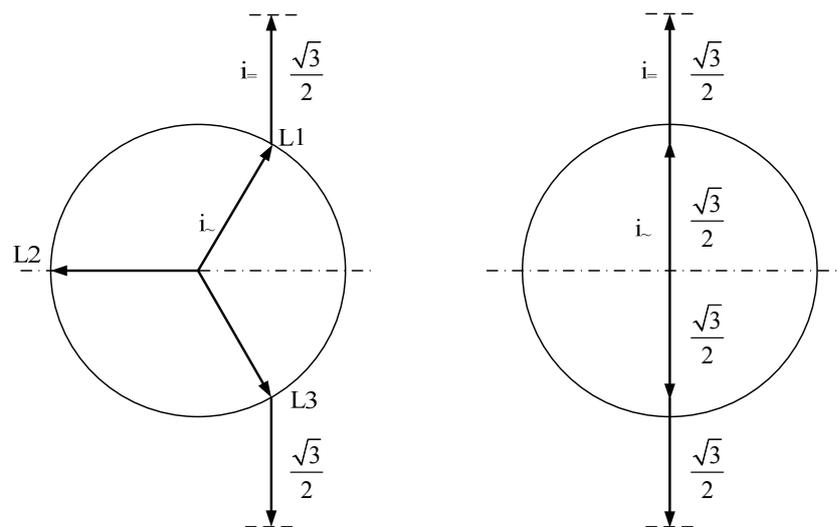


Abbildung 5: Stromzeigerdiagramme für den Übergang vom dreiphasigen zum zweiphasigen Fehler (Kurzschluss im Spannungsscheitelwert einer Phase)

Wird der Strom in L2 als erstlöschende Phase unterbrochen, springen die Wechselstromkomponenten der beiden anderen Phasen auf  $\pm\sqrt{3}/2$  p.u. Die Gleichstromglieder bleiben unverändert. Ist der Wechselstrom im dreiphasigen Kreis stärker abgeklungen als der Gleichstrom, kann es nun in L1 und L3 zu ausbleibenden Stromnulldurchgängen kommen. Für einen dreipolig abschaltenden Leistungsschalter kann damit ein Kurzschluss im Spannungsscheitelwert einer Phase, der zu einem rein symmetrischen Strom in dieser Phase führt, eine höhere Beanspruchung bedeuten als ein Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang mit einer voll verlagerten Phase. [2]

Der dreiphasige simultane Kurzschluss im Spannungsscheitelwert einer Phase ist ein hypothetischer Fall, der nur zur Erläuterung der Vorgänge dient.

### 2.2.2 Nicht-simultaner Kurzschluss

Ein Gleichstromglied mit  $> 1$  p.u. kann bei einem nicht-simultanen Kurzschlusseintritt auftreten. Der theoretisch ungünstigste Fall des nichtsimultanen Kurzschlusseintritts ist ein zweipoliger Kurzschluss im Nulldurchgang der verketteten Spannung zwischen zwei Phasen, z.B. L1 und L2. Er geht  $90^\circ$  später, im Nulldurchgang der Leiter-Erdspannung des Stranges L3 in den dreipoligen Kurzschluss über. Das Kurzschluss-szenario ist in Abbildung 6 dargestellt.

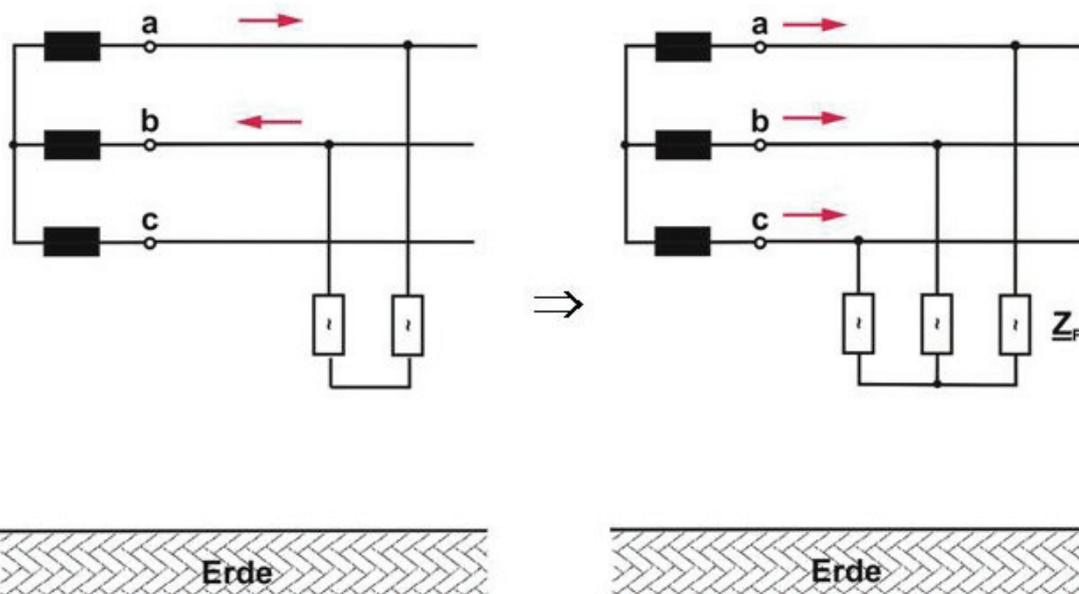


Abbildung 6: Zweipoliger Kurzschluss, der 90° später ein dreipoliger Kurzschluss wird

Solange der zweipolige Kurzschluss besteht, haben die Gleichstromglieder in den Phasen L1 und L2 den Wert  $\sqrt{3}/2$  p.u. = 0,866 p.u. Beim Übergang in den dreipoligen Kurzschluss kommt es in L3 zu einem Gleichstromglied von z.B. -1 p.u. In L1 und L2 überlagern sich dann dem bereits vorhandenen Gleichstromglied ein weiterer Gleichstromanteil von + 0,5 p.u.

Nimmt man an, dass in L1 während des zweipoligen Kurzschlusses das Gleichstromglied + 0,866 p.u. war, so addieren sich nun die Gleichstromanteile in L1 zu + 1,366, während in L2 nun ein Gleichstromglied von + 0,366 auftritt.

Dieser nicht gleichzeitige Fehler generiert also das theoretisch höchste Gleichstromglied. Setzt man voraus, dass das Gleichstromglied nicht abklingt, kann es um 36,6 % höher als das Gleichstromglied eines dreipoligen Kurzschlusses mit simultanem Beginn im Nulldurchgang der Leiter-Erdspannung werden. Dadurch entstehen ausbleibende Stromnulldurchgänge in der Phase L1 (siehe Abbildung 7). [3]

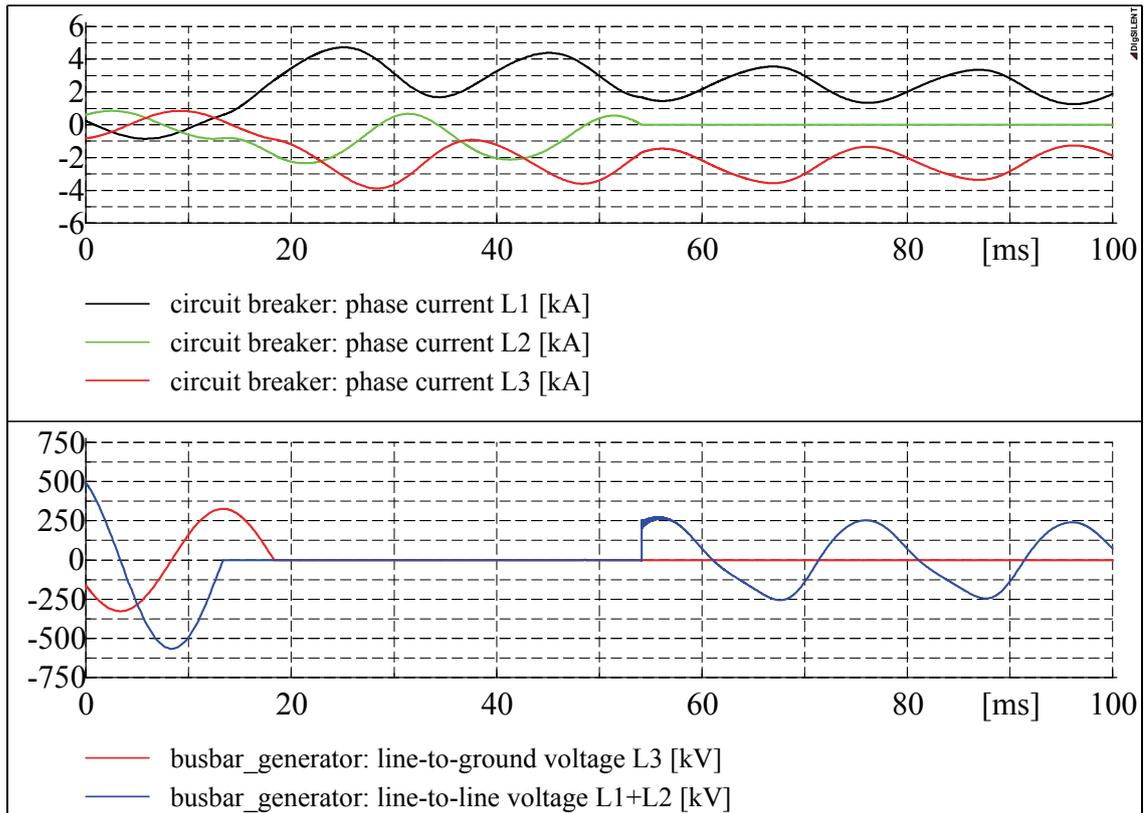


Abbildung 7: Nicht simultaner Kurzschluss ohne Erdberührung

Ein weiteres Szenario ist ein zweiphasiger Kurzschluss mit Erdberührung auf der Hochspannungsseite im Nulldurchgang der Phasenspannungen L1 und L2, der 90° später in einen dreiphasigen Kurzschluss mit Erdberührung übergeht, d.h. im Nulldurchgang der dritten Phase. Die Abbildung 8 zeigt das Kurzschlusszenario.

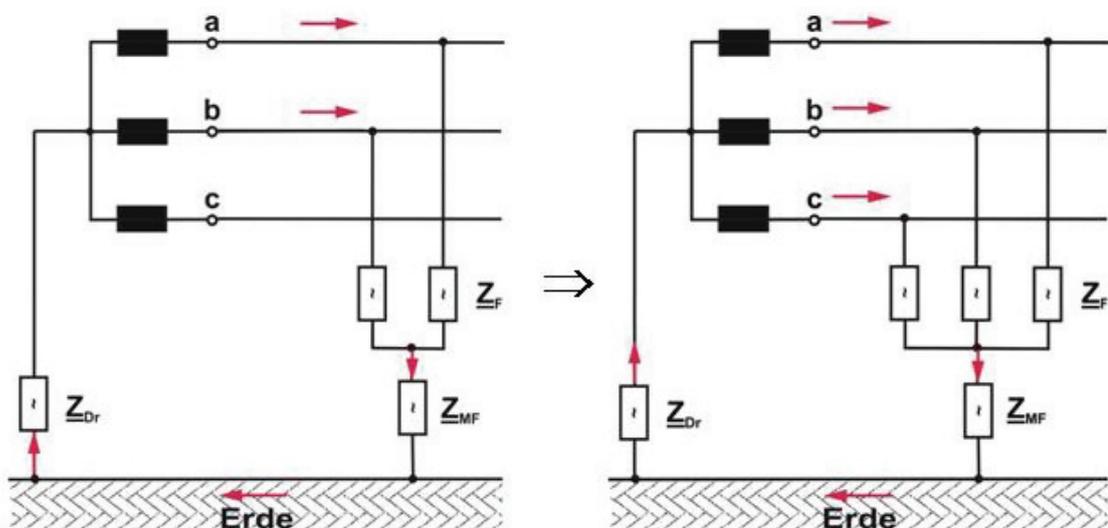


Abbildung 8: Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung wird ein dreipoliger Kurzschluss mit Erdberührung

Das kann auftreten, wenn ein Leistungsschalter auf einen geerdeten Abgang geschaltet wird, und der dritte Kontakt aufgrund der mechanischen Streuung zwischen den Schalterpolen erst später zuschaltet. In der Praxis ist die mechanische Streuung der Schalterpole beim Einschalten untereinander jedoch  $\leq 3$  ms. Der dazugehörige Strom- und Spannungsverlauf ist in Abbildung 9 dargestellt.

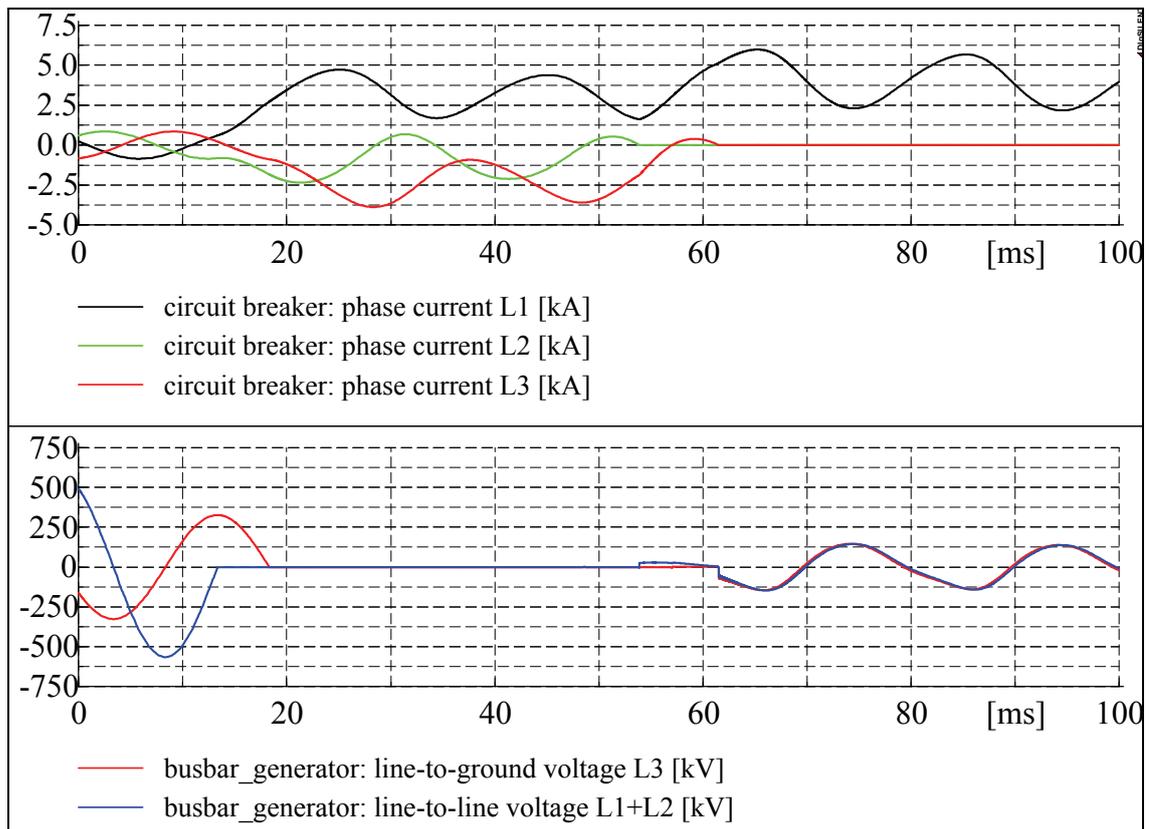


Abbildung 9: Nicht simultaner Kurzschluss mit Erdberührung

Im oberen Teil der Abbildung sind ausbleibende Stromnulldurchgänge in den Phasen L2 und L3 dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung ist der Spannungsverlauf sichtbar. Der zweipolige Kurzschluss mit Erdberührung erfolgt im Spannungsnulldurchgang der verketteten Spannung.

### 2.3 Betriebszustand des Generators

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Höhe des Gleichstromgliedes ist der Betriebszustand des Generators unmittelbar vor Fehlereintritt. Der höchste Wert des Gleichstromgliedes tritt auf, wenn sich der Generator vor Fehlereintritt im untererregten Betriebszustand

(Blindleistungsaufnahme vor dem Kurzschluss) befindet. Dann kann das Gleichstromglied größer als das Wechselstromglied werden und zu ausbleibenden Stromnulldurchgängen führen. Mit zunehmender Untererregung werden die Transientenspannung und Polradspannung kleiner. Das verursacht kleinere Transient- und Dauerkurzschlussströme und damit eine Unterdrückung der Nulldurchgänge. [4], [5]

Die Generatordaten beeinflussen den Verlauf des Wechselstromgliedes. Kleine Subtransient- und Transientzeitkonstanten sowie große Synchronreaktanzen führen zu einer schnellen und starken Einschnürung des Wechselstromanteils im Kurzschlussstrom. [6]

Der erhöhende Einfluss der Spannungsschnellregelung des Generators auf den Wechselstromanteil begünstigt ein schnelleres Entstehen von Stromnulldurchgängen. Die Wirkung der Spannungsregelung hängt vom Betriebszustand des Generators unmittelbar vor Kurzschlusseintritt ab. Durch die dominierende Verzögerung der Erregerwicklung wird der Einfluss der Spannungsregelung erst nach einigen Perioden wirksam. Erläuterungen zur Spannungsregelung von Synchronmaschinen werden in Kapitel 2.6 gegeben.

## 2.4 Spannungsregelung des Generators

Außer dem Generatorbetriebszustand, dem Fehlerort und der Verzugszeit beeinflusst die Spannungsregelung des Generators das Abklingverhalten des Kurzschlussstromes. Ein Spannungsregler ist erforderlich, da im Netzbetrieb eine konstante Klemmenspannung des Generators benötigt wird. Der Spannungsregler regelt über den Erregerstrom die Polradspannung des Generators und beeinflusst dadurch dessen Klemmenspannung. Durch Ändern des Erregerstroms lässt sich der Betriebszustand des Generators einstellen. Das heißt, der Generator kann Blindleistung abgeben (übererregt) oder aufnehmen (untererregt), und die Höhe der Blindleistung kann eingestellt werden. [15]

Wird der Erregerstrom  $I_E$  so gewählt, dass die Polradspannung  $U_p$  größer als die Klemmenspannung  $U_{bN}$  des Generators ist, wird induktive Blindleistung erzeugt und in das Netz abgegeben. Wegen erhöhter Polradspannung heißt der Betriebszustand übererregt.

Der Generator kann auch untererregt betrieben werden. In dem Fall wird der Erregerstrom so gewählt, dass die Polradspannung kleiner als die Klemmenspannung des Generators ist und die Synchronmaschine kapazitive Blindleistung erzeugt. [7]

Bei Kurzschlusseintritt registriert die Spannungsregelung, dass die Klemmenspannung abgesunken ist. Zur Stützung der Klemmenspannung wird übererregt und weiter auf den Kurzschluss gearbeitet. Nach Eintritt des Kurzschlusses wird zunächst nur die Turbinenregelung heruntergefahren. Da die Turbinenregelung sehr langsam ist, ist der Einfluss kaum messbar.

Entscheidend für den Einfluss der Spannungsregelung auf die Dauer ausbleibender Stromnulldurchgänge ist die Art der Generatorerregung. Bei Generatoren mit langsamen Spannungsregelungen, wie der bürstenlosen Erregung, erhöht sich erst ab 0,25 s merklich die Spannung. Da die Fehler im Hochspannungsbereich meist innerhalb dieses Zeitraumes ausgeschaltet sind, können die Auswirkungen der Spannungsregelung unberücksichtigt bleiben. [7]

Das gilt nicht für Generatoren mit besonders schneller Regelung, wie z.B. die Stromrichtererregung, falls die Deckenspannung, d.h. der Maximalwert der Erregerspannung über dem 1,6-fachen der Nennerregerspannung liegt. Dann erhöht sich die Spannung bereits während der Verzugszeit und schwächt das Abklingen des Kurzschlussstromes.

Um diesen Fall zu vermeiden, d.h. einen zu kleinen Ausschaltwechselstrom  $I_{aG}$  zu ermitteln, wird in der DIN VDE 0102 gefordert, bei solchen Regelungen stets  $\mu = 1$  einzusetzen. Der Abklingfaktor  $\mu$  bezeichnet das Verhältnis des Ausschaltwechselstromes  $I_{aG}$  zum Anfangskurzschlusswechselstrom  $I_k''$ . [16]

$$\mu = \frac{I_{aG}}{I_k''} \quad (2.2)$$

Abweichungen sind nur bei genauer Kenntnis des Maschinenverhaltens zulässig. [6]

## 2.5 Schnellentregung des Generators

Die Schnellentregung wird eingesetzt, wenn der Generator vom Netz genommen werden muss, ist also mit einer Schnellabschaltung verbunden. Ausgelöst wird die Abschaltung meistens durch den Rückwattschutz (verhindert, dass der Generator als Motor wirkt), d.h. wenn der Generator keine Leistung mehr ins Netz abgibt.

Da der Generator laut Norm IEC 60034-3 kurzschlussfest gebaut werden muss, wird der Generator in der Praxis nicht abgeschaltet, sondern arbeitet weiter auf den Kurzschluss.

Mit Kurzschlussbeginn wird der Netzschutz aktiv und sucht die Leitung mit dem Kurzschluss. Hat er sie gefunden, wird die Leitung frei geschaltet, an den Generatorklemmen erscheint wieder die Netzspannung und der Generator erleidet eine Fehlsynchronisation.

Die Ursache ist, dass während der Arbeit auf den Kurzschluss keine Energie ins Netz gespeist wurde und die Energie daher in die rotierenden Massen von Generator und Teilturbinen gesteckt wurde. Dadurch läuft der Turbosatz übersynchron und erleidet bei Wiederkehr der Spannung die Fehlsynchronisation, deren enorme Beanspruchungen der Generator im Anschluss an die Kurzschlussbeanspruchungen beherrschen muss.

Die Suche des Netzschutzes nach der fehlerhaften Leitung wird abgebrochen, wenn die meistens vom Generatorhersteller vorgegebene kritische Fehlerklärungszeit FKZ überschritten wird. Die FKZ sorgt dafür, dass der Turbosatz seine Stabilität trotz massiver Pendelungen nach der Abschaltung des Fehlers nicht verliert. Sie gibt die maximale Zeit an, die der Generator aus der Bemessungsleistung heraus auf den Kurzschluss arbeiten darf. Nach Überschreiten der FKZ synchronisiert sich der Generator nicht mehr selbständig. Er würde in den Asynchronbetrieb übergehen. Die Schnellentregung hat keinen Einfluss auf das Gleichstromglied.

## 2.6 Transformatorstufung

Die Transformatorstufung hat Einfluss auf das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen. Durch die Transformatorstufung verändert sich die bezogene Bemessungskurzschlussspannung  $u_{kr}$  des Transformators. In der Abbildung 10 ist das dazu gehörige einphasige Transformatorersatzschaltbild dargestellt.

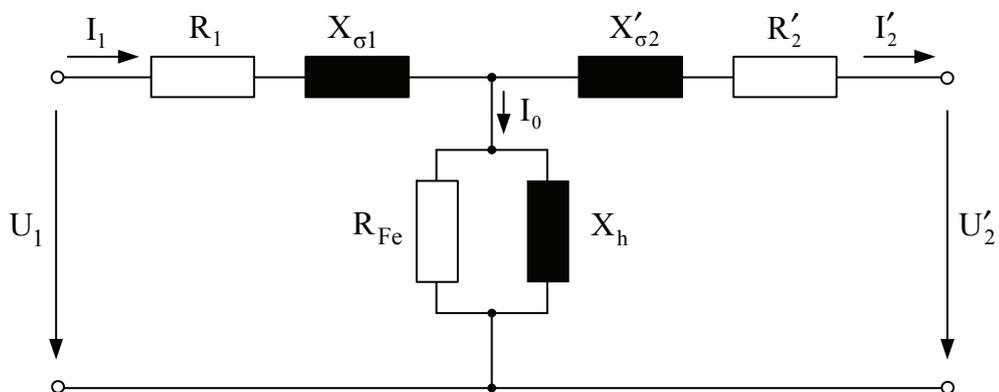


Abbildung 10: Transformatorersatzschaltbild

Für einen Drehstromtransformator kann die Hauptreaktanz  $X_h$  vernachlässigt werden, wenn der Magnetisierungsstrom klein gegenüber den Betriebsströmen ist. Die Streureaktanzen  $X_{\sigma 1}$  und  $X'_{\sigma 2}$  werden zu einer Kurzschlussreaktanz  $X_k$  zusammengefasst.

Sie wird aus der relativen Kurzschlussspannung

$$u_k = \frac{U_{kT}}{U_{rT}} = \frac{U_{kT} / \sqrt{3}}{U_{rT} / \sqrt{3}} = \frac{X_k \cdot I_{rT}}{U_{rT} / \sqrt{3}} \quad (2.3)$$

und der Bemessungsleistung des Drehstromtransformators

$$S_{rT} = \sqrt{3} \cdot U_{rT} \cdot I_{rT} \quad (2.4)$$

ermittelt. Daraus ergibt sich

$$X_k = \frac{u_k \cdot U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (2.5)$$

Durch eine Erhöhung der Bemessungsspannung  $U_{rIT}$  an der Oberspannungsseite des Transformators steigt auch die Streu- bzw. Kurzschlussreaktanz. Wie in Gleichung 2.7 dargestellt, besteht eine direkte Proportionalität zwischen der Induktivität und der Gleichstromzeitkonstanten  $\tau$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.6)$$

Durch eine Erhöhung der Streu- bzw. Kurzschlussreaktanz erhöht sich die Gleichstromzeitkonstante  $\tau$ , das Gleichstromglied klingt langsamer ab und dadurch erhöht sich die Dauer ausbleibender Stromnulldurchgänge. Wird die Streu- bzw. Kurzschlussreaktanz durch die Transformatorstufung verringert, so verringert sich die Gleichstromzeitkonstante, das Gleichstromglied klingt schneller ab und die Dauer ausbleibender Stromnulldurchgänge verringert sich (siehe Kapitel 3.3). [7]

## 3 Der Leistungsschalter

In Hochspannungsnetzen sind Leistungsschalter das letztendliche Sicherheitselement, da Sicherungen nur bis zu Nennspannungen von 24 kV verfügbar sind. Hochspannungs-Leistungsschalter, in dieser Arbeit kurz als Schalter bezeichnet, müssen daher in der Lage sein, alle denkbaren Fehler- und Betriebsströme bis zur Höhe ihres Bemessungs-Kurzschlussstromes zu unterbrechen und auch auf diese Ströme einzuschalten.

Da der Spannungsabfall über die geschlossenen Kontakte nur einige mV beträgt, stellen Leistungsschalter im eingeschalteten Zustand einen guten Leiter dar. Die geringen Einflüsse der Eigenkapazitäten und Eigeninduktivitäten des Schalters werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

Beim Einschalten soll der Leistungsschalter in der Lage sein, direkt auf einen bestehenden Kurzschluss zu schalten. Das bedeutet, dass er auf den Stoß- und subtransienten Kurzschlussstrom schalten muss, ohne dass z.B. die sich schließenden Schaltkontakte verschweißen.

Hochspannungs-Leistungsschalter können grundsätzlich den Strom nur in seinem Null-durchgang unterbrechen. Unter bestimmten Voraussetzungen, wie beispielsweise bei generatornahen Kurzschlüssen, können Ströme auftreten, deren Gleichstromglied größer ist als das Wechselstromglied, sodass Stromnulldurchgänge ausbleiben. Es ist der jeweilige Fall daraufhin zu untersuchen, ob durch die Wirkung der Lichtbogenspannung es dennoch zu Stromnulldurchgängen kommt, oder ob durch externe Maßnahmen, wie eine Erhöhung der Sternpunktimpedanz auf der Oberspannungsseite des Transformators, dem Schalter die Möglichkeit zur Stromunterbrechung gegeben werden muss.

### 3.1 Lichtbogen

Nach Eintritt eines Fehlers im Netz wird der Fehler durch den Schutz erfasst, der über einen Impuls das Ausschalten des Schalters einleitet. Dementsprechend erfolgt im Schalter die Kontakttrennung nach Ablauf der Relaiszeit des Schutzes und der mechani-

schen Ausschaltzeit des Schalters. Letztere liegt bei Schaltern heutiger Bauweise in der Größenordnung von 20 ms.

Beim Öffnen der Schaltkontakte kommt es zu einem Lichtbogen. Die letzte Berührungsstelle der sich trennenden Schaltkontakte wird durch die hohe lokale Stromdichte stark erhitzt, sodass Kontaktmaterial verdampft und dort ein Lichtbogen gezündet wird. In dem zunächst extrem kurzen Abstand nach der Kontakttrennung wird das zwischen den Kontakten befindliche Gas durch den Lichtbogen soweit aufgeheizt, dass sich Gas-moleküle durch thermische Ionisation in Elektronen und Ionen spalten und der Lichtbogen schließlich den gesamten Raum zwischen den Kontakten einnimmt. Dieses thermisch ionisierte Gasvolumen wird als Lichtbogenplasma bezeichnet und erreicht Temperaturen bis zu 30 000 K. Zusätzliche Ladungsträger entstehen dadurch, dass durch das Aufheizen und das elektrische Feld zwischen den sich trennenden Schaltkontakten Elektronen beschleunigt werden, die beim Zusammenstoß mit Atomen und Ionen weitere Elektronen freisetzen. Diese weitere Ionisation führt dazu, dass die elektrische Leitfähigkeit des Plasmas stark zunimmt, was zur Folge hat, dass bei steigender Stromstärke die Brennspannung des Lichtbogens abnimmt. [8]

Die Abhängigkeit der Lichtbogenspannung vom Momentanwert des Stromes wird durch die Lichtbogenkennlinie  $u(t, i)$  beschrieben, die in Abbildung 11 für eine Unterbrechereinheit eines Hochspannungs-Leistungsschalters dargestellt ist.

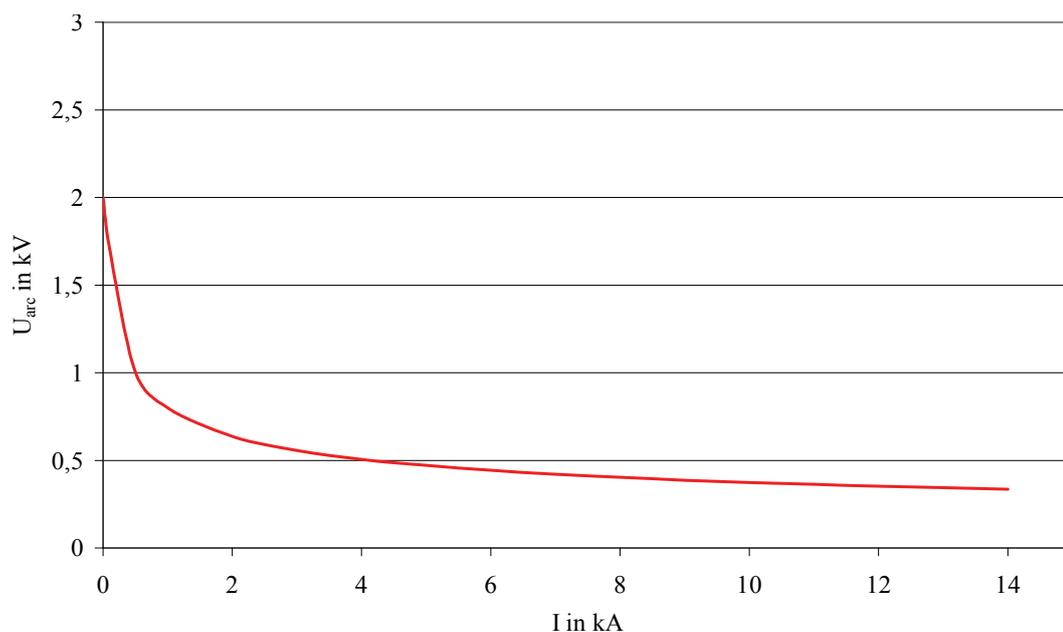


Abbildung 11: Lichtbogenkennlinie  $u_{LB}(i)$  einer Unterbrechereinheit

Sie hat eine fallende Charakteristik. Das heißt, mit zunehmendem Strom verringert sich der Lichtbogenwiderstand, und die Lichtbogenspannung nimmt ab.

Der Momentanwert der Lichtbogenspannung ist außer vom Momentanwert des Stromes vom lokalen Gasdruck und der Gestaltung der Unterbrechereinheit, der Brenndauer des Lichtbogens und der variablen Länge des Lichtbogens sowie der Intensität der Löschgassströmung während seiner Brenndauer abhängig.

Der Lichtbogen in einer Unterbrechereinheit eines Schalters lässt sich durch einen nichtlinearen ohmschen Widerstand darstellen, der als zusätzlicher Widerstand in dem geschalteten Kreis wirkt und damit die Gleichstromzeitkonstante  $\tau = L/R$  des Kurzschlussstromes verringert, während die Wechselstromkomponente kaum beeinflusst wird. [9]

Im Bereich der Stromamplitude besitzt der Lichtbogen eine hohe Zeitkonstante, aber in der Nähe des Stromnulldurchganges verhält er sich so, als ob die Lichtbogenzeitkonstante einen niedrigen Wert hat. Für die Stromunterbrechung im Bereich des Bemessungs-Kurzschlussstromes kann daher das Verhalten des Schaltlichtbogens durch zwei Gleichungen dargestellt werden, von denen die erste Gleichung das Lichtbogenverhalten in weiter zeitlicher Entfernung vom Stromnulldurchgang wiedergibt, während die zweite Gleichung den Bereich des Stromnulldurchgangs beschreibt.

Für hohe Momentanwerte der Ströme wird die Cassie-Gleichung verwendet, und für den Bereich des Stromnulldurchgangs gilt die Mayr-Gleichung. Durch das Aufteilen des Lichtbogens in beide Bereiche lässt sich die Lichtbogenleitfähigkeit des gesamten Lichtbogens  $g$  anhand der folgenden Gleichung darstellen.

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_C} + \frac{1}{g_M} \quad (3.1)$$

Die Leitfähigkeit des Lichtbogens  $g_C$  gilt für den Bereich, der durch die Cassie-Gleichung beschrieben wird, während  $g_M$  den Bereich der Mayr-Gleichung beschreibt. Die Cassie-Gleichung lautet

$$\frac{dg_C}{dt} = \left( \frac{1}{\Theta_C} \right) \cdot \left[ \frac{i_s^2}{(u_C^2 g_C)} - g_C \right] \quad (3.2)$$

und die Mayr-Gleichung

$$\frac{dg_M}{dt} = \left( \frac{1}{\Theta_M} \right) \cdot \left[ \frac{i_s^2}{P_0} - g_M \right] \quad (3.3)$$

Demnach wird das Verhalten des Lichtbogens durch die vier Parameter Zeitkonstante der Cassie-Gleichung  $\Theta_C$ , Zeitkonstante der Mayr-Gleichung  $\Theta_M$ , konstante Lichtbogenspannung  $u_C$  und stationärer Energieverlust des Lichtbogens  $P_0$  beschrieben. [10]

Die Gleichungen 6.4 und 6.5 zeigen, dass die Änderung der Plasma-Leitfähigkeit durch den Strom  $i_s$  beeinflusst wird, der durch den Leistungsschalter fließt. Entscheidend für die Frage nach dem Abschaltvermögen des Leistungsschalters ist der Vergleich der durch den Nachstrom umgesetzten elektrischen Energie mit der Energie, die bei voller Gasströmung abgeführt wird.

Damit der Schalter sein volles Lichtbogen-Löschvermögen erreicht und in der Lage ist, die nach der Stromunterbrechung auftretende Spannung zu beherrschen, müssen die Kontakte auf einen bestimmten Mindestabstand kommen. Tritt ein Stromnulldurchgang bei einem kleineren als diesen Mindestabstand auf, besteht nur ein geringeres Ausschaltvermögen. Ebenso verringert sich das Ausschaltvermögen, wenn nach einer gewissen Zeit die Löschgasströmung nachlässt. Nur in der Zwischenzeit hat der Schalter sein volles Schaltvermögen.

Der Verlauf des Schaltvermögens wird durch eine Gewichtungsfunktion  $c(t)$  für eine Unterbrechereinheit beschrieben, die in Abbildung 12 dargestellt ist. Die  $u_{LB}(i)$ -Kennlinie gilt nur für stationäre Lichtbögen. Die sich während des Ausschaltvorgangs ändernde Lichtbogenlänge sowie die Gasströmung, Kontaktabstand und andere nicht stationäre Einflussfaktoren werden durch die Gewichtungsfunktion  $c(t)$  gekennzeichnet.

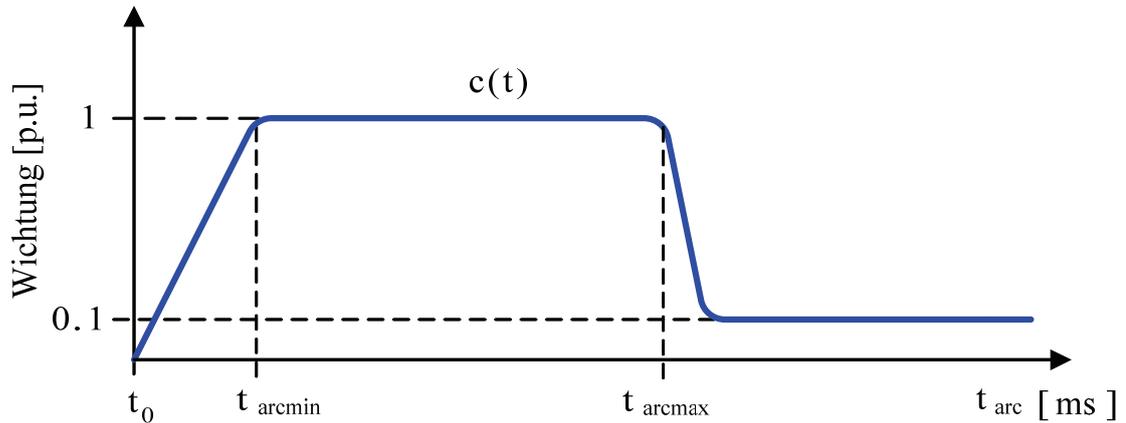


Abbildung 12: Gewichtungsfunktion  $c(t)$  einer Unterbrechereinheit

Ist der Wichtungsfaktor 1, hat der Leistungsschalter sein Nennschaltvermögen bei Bemessungs-Kurzschlussstrom. Die Zeitpunkte  $t_{arcmin}$  und  $t_{arcmax}$  beziehen sich auf den Bemessungs-Kurzschlussausschaltstrom.

Bei generatornahen Kurzschlüssen treten bezogen auf 420 kV Kurzschlussströme in der Größenordnung von 2 bis 6 kA auf. Um derartige Ströme zu beherrschen, genügt bis zu einer dem jeweiligen Schalter eigenen Lichtbogenzeit ein geringeres Schaltvermögen.

Der für das Beeinflussen der Gleichstromzeitkonstante wirksame Momentanwert der Lichtbogenspannung einer Unterbrechereinheit wird durch die Multiplikation beider Kennlinien bestimmt, d.h. es gilt [9]:

$$u_{LB}(t,i) = u_{LB}(i) c(t) \quad (3.4)$$

### 3.2 Vorüberschlag

Schaltet der Leistungsschalter auf einen bestehenden Kurzschluss, kommt es zum Vorüberschlag zwischen den sich nähernden Kontakten, wenn die Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke den Momentanwert der anstehenden Spannung unterschreitet. Der Stromkreis wird vor der galvanischen Kontaktberührung über den Vorüberschlags-Lichtbogen geschlossen.

Die Vorüberschlagskennlinie beschreibt die Abnahme der dielektrischen Festigkeit zwischen den Kontakten im Verlauf der letzten Millisekunden vor der galvanischen Berührung der Kontakte. Bei Leistungsschaltern ist diese Kennlinie in guter Näherung eine Gerade mit dem negativen Anstieg  $m$  [kV/ms] (siehe Abbildung 13).

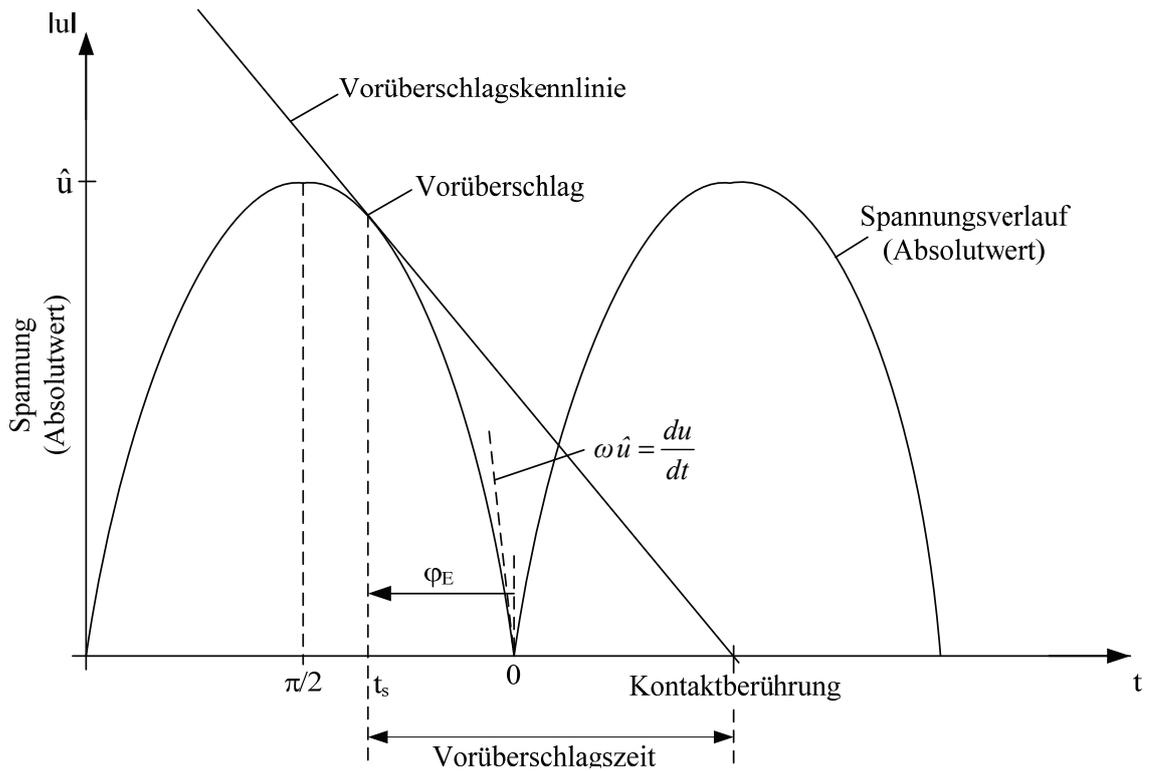


Abbildung 13: Überlagerung von Vorüberschlagskennlinie und Spannungsverlauf [2]

Die Steilheit der Vorüberschlagskennlinie hängt vom Lösch- und Isoliermedium, von der Einschaltgeschwindigkeit und vom konstruktiven Aufbau des Kontaktsystems ab. Zudem sind Vorüberschlag und das Auftreten eines Gleichstromgliedes abhängig von der Charakteristik des Schaltens. Leistungsschalter mit hoher Spannungsfestigkeit haben eine steile Vorüberschlagskennlinie. Sie schalten fast im Spannungs-Nulldurchgang.

Um den Einfluss der Vorüberschlagskennlinie auf das Einschaltverhalten eines Schalters zu ermitteln, muss der Anstieg  $m$  der Vorüberschlagskennlinie mit der Steilheit der anliegenden Spannung unmittelbar vor dem Spannungs-Nulldurchgang  $du/dt = \omega \hat{u}$  in Beziehung gesetzt werden ( $\hat{u}$  ist der Scheitelwert der am jeweiligen Schalterpol anstehenden Leiter-Erd-Spannung). Man erhält die bezogene Steilheit der Vorüberschlagskennlinie

$$s = \frac{m}{\omega \hat{u}}, \quad (3.5)$$

deren Wert durch die Nennspannung je Unterbrechereinheit und einer eventuellen Erhöhung der betriebsfrequenten Spannung, abhängig vom erstlöschenden Pol-Faktor, während der einzelnen Phasen des Einschaltvorganges gegeben ist.

Eine Kontaktberührung im Spannungsulldurchgang kann nur auftreten, wenn die bezogene Steilheit  $s \geq 1$  ist. Die Vorüberschlagskennlinie ist in diesem Fall steiler als die Steilheit  $\omega \hat{u}$  der Spannung im Nullldurchgang. Bezeichnet  $t_s$  den Zeitpunkt nach dem Scheitelwert der Spannung, zu dem die Vorüberschlagskennlinie die Spannungshalbwelle tangiert, d.h. dem letztmöglichen Zeitpunkt nach dem Scheitelwert, zu dem der Vorüberschlag in der betreffenden Spannungshalbwelle eintreten kann, so gilt

$$t_s = \frac{1}{\omega} \cos^{-1}(s) \quad (3.6)$$

Die Vorüberschlagszeit ist die Zeit vor der galvanischen Berührung der Kontakte, bei der ein Vorüberschlags-Lichtbogen gezündet wird.  $\varphi_E$  ist der Zeitpunkt des Vorüberschlags bezogen auf den Spannungsulldurchgang.

Der Vorüberschlag senkt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens fehlender Stromnullldurchgänge, weil durch den Vorüberschlag kein Einschalten im Spannungsulldurchgang erfolgt. Durch den Vorüberschlag erfolgt der Beginn des Stromflusses bei endlichem Spannungswert. Somit wird das maximal auftretende Gleichstromglied geringer als das theoretisch mögliche. Die Dauer des Ausbleibens von Stromnullldurchgängen ist geringer als beim theoretisch möglichen Einschalten im Spannungsulldurchgang.

Bei langsam einschaltenden Geräten, wie Erdungsschaltern, verläuft die Vorüberschlagskennlinie relativ flach ( $m \ll \omega \hat{u}$ ). Daher kommt es im Bereich des Spannungsscheitelwertes oder auf der ansteigenden Flanke der Spannungshalbwelle immer zum Vorüberschlag. [2]

### 3.3 Transienter Einschaltstrom

Alle Betriebsmittel, die sich in der Nähe des betrachteten Schalters befinden, haben eine Eigenkapazität gegen Erde. Die Leitungen und Sammelschienen haben außerdem eine Induktivität (Größenordnung  $1 \mu\text{H/m}$ ). Diese Betriebsmittel bilden hochfrequente Schwingkreise, die sich über Erde und über benachbarte Leiter schließen.

Vor dem Zuschalten des Leistungsschalters sind die speiseseitigen Eigenkapazitäten auf den Momentanwert der anliegenden Spannung aufgeladen. Die Eigenkapazitäten der zugeschalteten Seite sind ungeladen. Zum Zeitpunkt des Vorüberschlages werden die zugeschalteten Eigenkapazitäten durch einen Spannungssprung mit hohem  $du/dt$  aufgeladen. Damit fließt ein Schwingstrom, dessen Eigenfrequenz durch Kapazitäten und Induktivitäten in unmittelbarer Umgebung des Leistungsschalters bestimmt wird (siehe Abbildung 14).

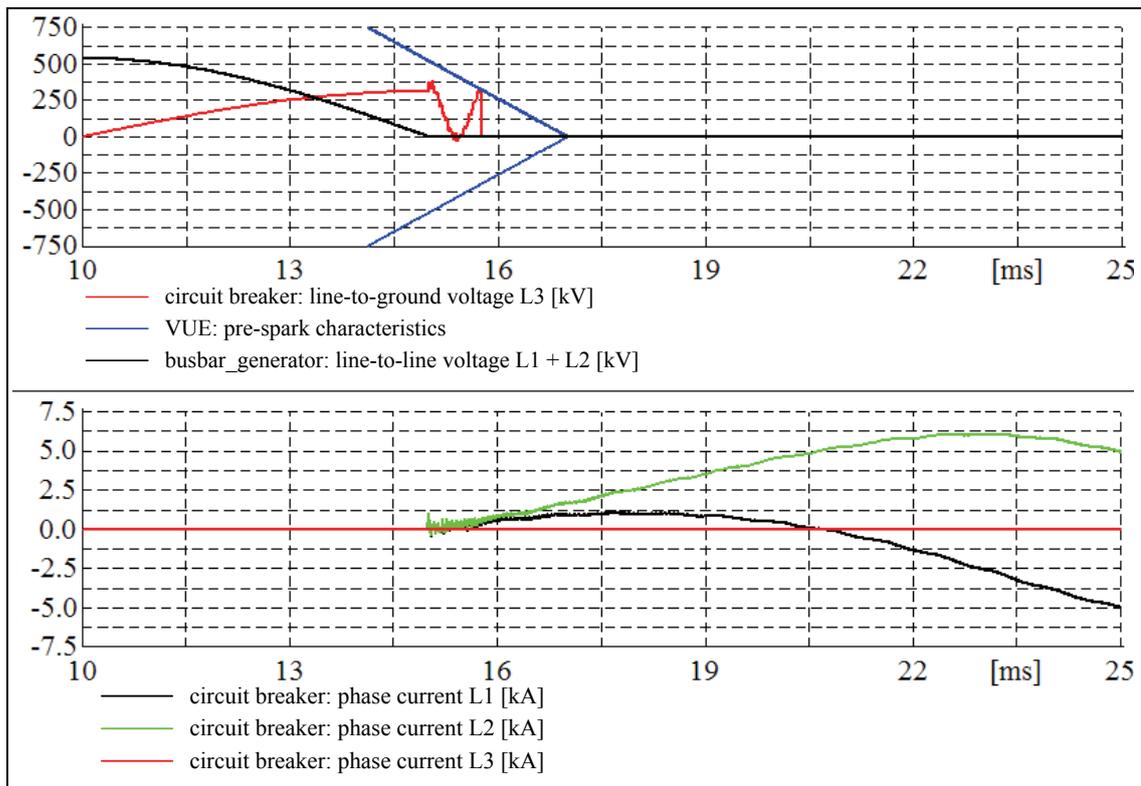


Abbildung 14: Transienter Einschaltstrom

Das dazu gehörige Ersatzschaltbild wird in Abbildung 15 vorgestellt. Es zeigt die Kapazitäten und Induktivitäten, die den transienten Einschaltstrom beeinflussen.

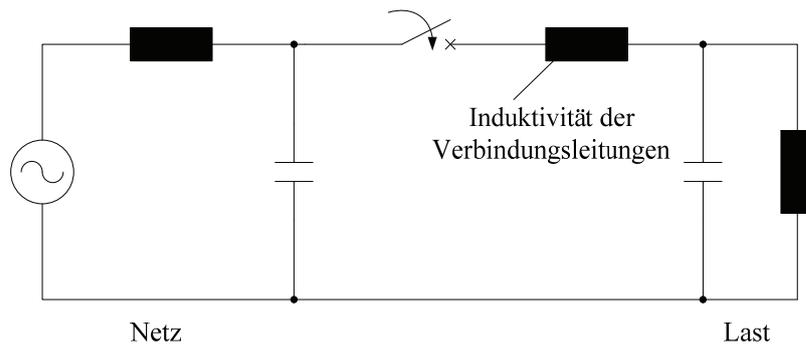


Abbildung 15: Ersatzschaltbild des Einschaltvorgangs

Der transiente Einschaltstrom hat, da er schnell abklingt, keinen Einfluss auf den Verlauf des stationären Kurzschlussstromes und das Gleichstromglied. Er kann deshalb im weiteren Verlauf der Arbeit vernachlässigt werden.

## 4 Vorstellen von DIgSILENT PowerFactory

Das Berechnungsprogramm PowerFactory der Firma DIgSILENT GmbH eignet sich zur Planung, Entwicklung und Analyse von Energieversorgungssystemen. PowerFactory verfügt über eine integrierte grafische Benutzeroberfläche zur Analyse von Energieversorgungssystemen. Diese Benutzeroberfläche umfasst Zeichnungs- und Bearbeitungs- sowie alle wichtigen statischen und dynamischen Berechnungsfunktionen.

PowerFactory ist ein Softwarepaket, das nicht aus verschiedenen Software-Modulen zusammensetzt ist. Durch die Verwendung einer einzigen Datenbank, welche die notwendigen Daten für alle Komponenten eines Energieversorgungssystems, wie z.B. Leitungsdaten, Generatordaten, Reglerdaten und Schutzdaten enthält, können mit PowerFactory alle verfügbaren Funktionen innerhalb derselben Programmumgebung problemlos und schnell ausgeführt werden.

Diese Funktionen umfassen unter anderem Lastflussberechnungen, Kurzschlussberechnungen, Stabilitätsberechnungen, die Analyse von Oberschwingungen sowie die dreiphasige Simulation von Elektromagnetischen Transienten (EMT). Dabei werden Spannungen und Ströme durch ihre Momentanwerte dargestellt, so dass das dynamische Verhalten passiver Netzelemente berücksichtigt wird. Durch die detaillierte Netzdarstellung inklusive aller Phasen dargestellt wird, können sämtliche symmetrische und unsymmetrische Ereignisse simuliert werden. [11]

Zur Analyse asymmetrischer Fehler oder unsymmetrischer Netze bietet PowerFactory die dreiphasige RMS-Simulationsfunktion. Sie beinhaltet eine dreiphasige Darstellung des elektrischen Netzes im stationären Zustand. Es können auch ein- und zweiphasige Netze nachgebildet analysiert werden. Außer symmetrischen RMS-Ereignissen können unsymmetrische Fehlerereignisse simuliert werden. Das umfasst z.B. ein- und zweipolige (Erd-)Kurzschlüsse, Kurzschlüsse zwischen Phasen und ein- und zweiphasige Leistungsunterbrechungen. Diese Ereignisse können simultan oder in einer Fehlerfolge

auftreten. Es kann eine beliebige Kombination symmetrischer und asymmetrischer Fehler simuliert werden. [11]

Die Möglichkeit, mit PowerFactory dreiphasige Simulationen im Zeitbereich durchzuführen, war ein Kriterium bei der Auswahl eines geeigneten Netzberechnungsprogramms für die Simulation des Ein- und Ausschaltverhaltens von Leistungsschaltern. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl von PowerFactory ist die Möglichkeit, ein flexibles Leistungsschaltermodell zu programmieren. PowerFactory ermöglicht es dem Benutzer, Ergebnisse sowohl in Tabellenform als auch grafisch darzustellen.

Ein Vorteil von PowerFactory ist die DIgSILENT-Programmiersprache DPL, die es dem Benutzer erlaubt, nacheinander ablaufende Simulationen zu automatisieren. DPL bietet Entscheidungs- und Ablaufsteuerungsbefehle und ermöglicht die Definition und Verwendung benutzerdefinierter Variablen. DPL besitzt eine flexible Schnittstelle zur Ein-/Ausgabe und zum Zugriff auf Objekte. Zudem bietet DPL ein breites Spektrum mathematischer Ausdrücke. Dadurch ermöglicht DPL dem Netzberechnungsprogramm DIgSILENT PowerFactory neue Berechnungsfunktionen zu erzeugen.

Mit Hilfe von DPL kann der Benutzer neue Berechnungsfunktionen in PowerFactory integrieren und benutzerdefinierte Variablen definieren. Die neuen Berechnungsfunktionen werden als Programmskripte geschrieben. Diese können z.B. PowerFactory-Befehle, wie Kurzschluss- oder Lastflussbefehle sowie Ablaufsteuerungsbefehle, wie if-then-else-Schleifen enthalten.

DPL verfügt über einen Skripteditor, der die Eingabe neuer benutzerdefinierter Berechnungsbefehle ermöglicht. Die Syntax der DPL-Skriptsprache ist der Syntax der Programmiersprache C++ sehr ähnlich. Die Sprache ist logisch aufgebaut. Die DPL-Syntax ist nicht umfangreich, da sie vor allem für Basisoperationen wie einfache Berechnungen, if-then-else-Anweisungen oder do-while-Schleifen dient. Der Vorteil der DPL-Sprache ist die Möglichkeit, Funktionen aufzurufen und Unterrouninen zu erzeugen. Eine Funktion, die von einem DPL aufgerufen werden kann, wird als „Methode“ bezeichnet. [11]

Sämtliche in einem DPL-Skript generierten Befehle können in PowerFactory in ein benutzerdefiniertes Modell integriert werden, welches das Verhalten des Betriebsmittels

simuliert. Dafür wird die DIgSILENT-Simulationssprache (DIgSILENT Simulation Language) DSL verwendet.

DSL ist eine auf einem Steuerungssystem basierende Simulationssprache und gehört zur Kategorie einer Continuous Simulation Language (CSSL). Die Simulationssprache DSL basiert auf allgemeinen Steuerungs- und Logikdiagrammen, denen eine nichtprozedurale Programmiersprache zugrunde liegt. D.h. die Reihenfolge der Elemente kann willkürlich gewählt werden. DSL beinhaltet eine mathematische Beschreibung zeitkontinuierlicher linearer und nichtlinearer Systeme und unterstützt flexible Definitionen von Makros. Dadurch können algebraische Gleichungen, Regler oder sogar Teilsysteme wie Erregersysteme erzeugt werden.

Ein Merkmal von DSL sind formale Prozeduren zu Fehlererkennung und zum Test des Modells. Das umfasst das Erkennen algebraischer Schleifen, Meldung nicht verwendeter und nicht definierter Variablen und fehlende Anfangsbedingungen. [11]

Die DIgSILENT Simulationssprache DSL wird dazu genutzt, neue dynamische Regler zu definieren, die Eingangssignale vom simulierten Energiesystem empfangen und die Ausgangssignale des Reglers z.B. mit Hilfe der im Regler definierten algebraischen Gleichungen zu ändern. DSL kann als ein Zusatz zur Transientenanalyse von PowerFactory betrachtet werden. Während der Simulation werden die Modellgleichungen der DSL-Modelle mit denen kombiniert, die das dynamische Verhalten der Betriebsmittel nachbilden. Diese Gleichungen werden zusammen berechnet und simulieren das transiente Verhalten der Betriebsmittel mit dem benutzerdefinierten Modell. [12]

In DIgSILENT PowerFactory wird ein neues Energieversorgungssystem entweder text- oder grafikbasiert erzeugt. Eine Besonderheit von PowerFactory ist, dass Aufgaben, wie ein neues Energieversorgungssystem text- oder grafikbasiert erzeugen, die Datenbank verwalten, Modelle auswählen, Berechnungen durchführen und Ergebnisse anzeigen sowie drucken direkt im Fenster des Hauptprogramms verfügbar sind. D.h. der Benutzer kann mit einer Benutzeroberfläche alle Funktionen über das Fenster des Hauptprogramms steuern. [11]

Um die Funktionsweise des Programms näher zu erläutern, wird zuerst die Handhabung erklärt. Die Dateneingabe erfolgt grafisch. Das heißt, das zu untersuchende Netz wird eingezeichnet und den Objekten in der Grafik werden Daten zugeordnet. Wenn der Be-

nutzer ein Projekt aktiviert, erscheint das PowerFactory-Hauptfenster (siehe Abbildung 16). [11]

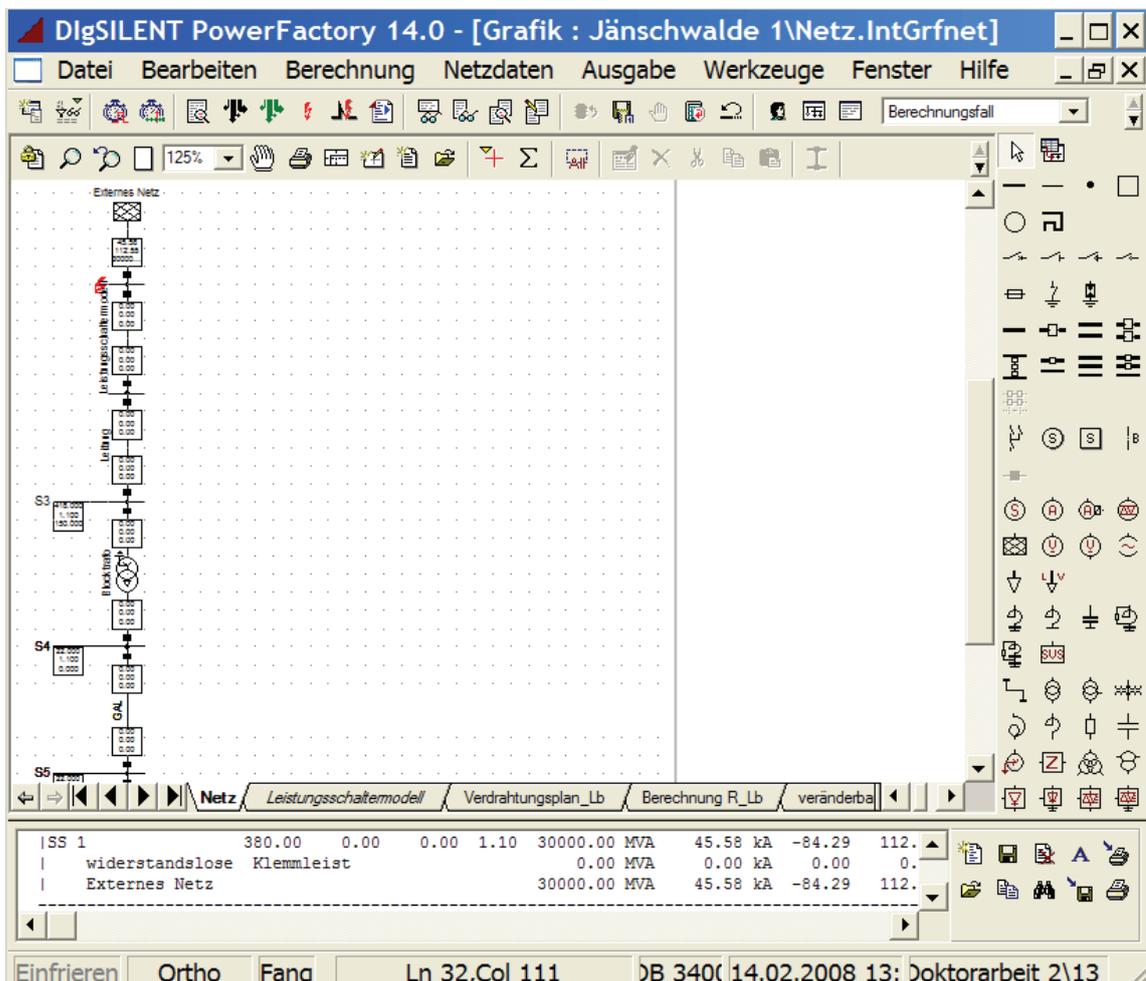


Abbildung 16: PowerFactory-Hauptfenster

Das PowerFactory-Hauptfenster beinhaltet eine Hauptmenüleiste in der ersten Zeile. Darunter ist die Hauptsymbolleiste, die alle Berechnungsfälle anzeigt. In der dritten Zeile ist die Grafiksymbolleiste. Damit kann das Grafikfenster mit der Netzgrafik bearbeitet werden. Rechts neben dem Grafikfenster ist die Zeichnungssymbolleiste angeordnet. Unter dem Grafikfenster ist das Ausgabefenster, in das Ergebnisse, Warnungen und Fehlermeldungen geschrieben werden.

In PowerFactory können die Daten sowohl im Grafikfenster als auch in einem Datenmanager bearbeitet werden. Die Daten eines im Grafikfenster gezeichneten Objektes können durch Doppelklick aufgerufen und bearbeitet werden. Der Datenmanager stellt alle Funktionen bereit, die zur Verwaltung aller Projekte sowie der Daten aller Varian-

ten erforderlich sind. Der Datenmanager zeigt die komplette Datenbank und beinhaltet die Parameter der einzelnen Netzelemente des Energieversorgungssystems und externer Objekte. [11]

Im Datenmanager können neue Berechnungsfälle angelegt, neue Elemente hinzugefügt, Parameter geändert und Varianten erstellt, aktiviert oder gelöscht werden. Der Datenmanager verwendet eine Baumdarstellung der gesamten Datenbank mit einem vielseitigen Datenbrowser (siehe Abbildung 17).

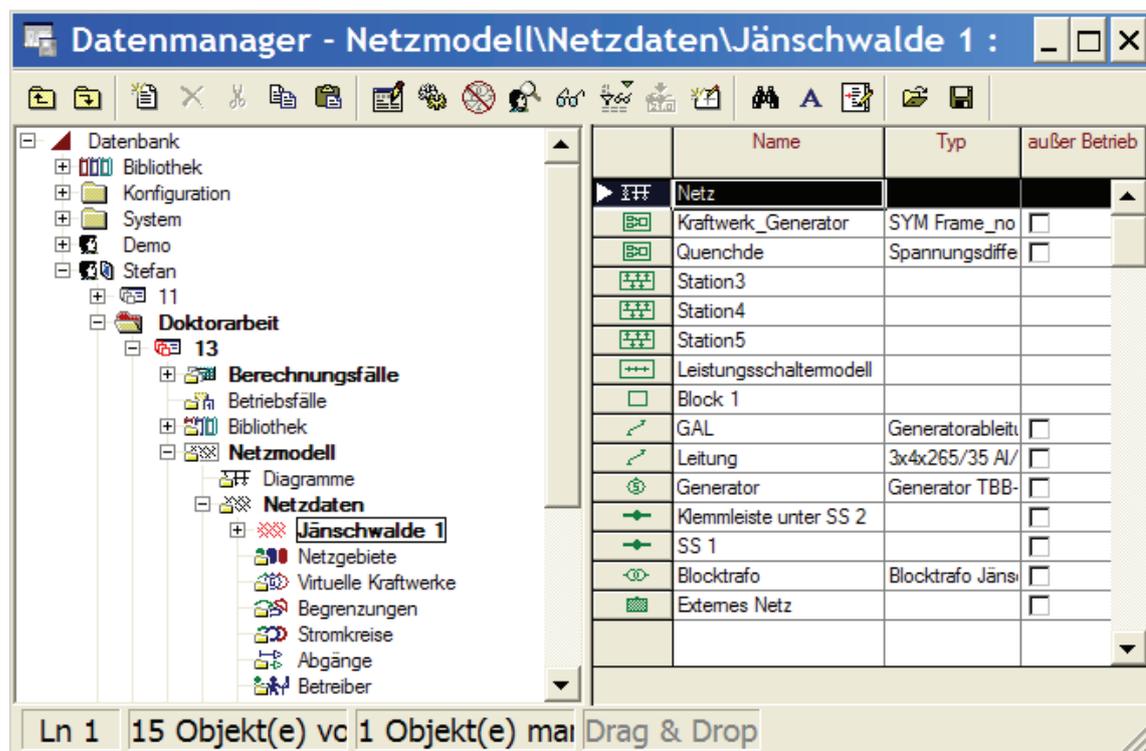


Abbildung 17: PowerFactory-Datenmanager

In dem linken Fenster des Datenmanagers ist der Verzeichnisbaum mit seinen Ordnern dargestellt. Dabei werden die Ordner in Berechnungsfall-Ordner, Bibliotheks-Ordner und Netz-Ordner unterschieden. In Berechnungsfall-Ordnern werden Einstellungen für die Berechnungsart, wie z.B. Kurzschluss gespeichert. Bibliotheks-Ordner enthalten die Typdaten der Objekte, während im Netz-Ordner alle Elementdaten stehen. Sämtliche Ordner werden in einem Projektordner zusammengefasst. [11]

## 5 Simulation des Ausschaltvorgangs

Es wird vorausgesetzt, dass die Leistungsschalter immer dreipolig abschalten.

### 5.1 Eingabe des Netzes in PowerFactory

Für die vorliegende Arbeit wurde ein neues dreiphasiges Leistungsschaltermodell programmiert, welches das Ein- und Ausschaltverhalten eines Leistungsschalters simuliert. Dieses Modell entstand mit Hilfe der DIgSILENT Programmiersprache (DPL) sowie der DIgSILENT Simulationssprache (DSL) und ermöglicht es dem Benutzer, neue Leistungsschalterttypen in PowerFactory zu integrieren. Das Leistungsschaltermodell berücksichtigt den von der Anzahl der Unterbrechereinheiten abhängigen ohmschen Widerstand einer geschlossenen Unterbrechereinheit. Er beträgt 30 Mikrohm.

Zudem sind, abhängig von der Spannungsebene des zu untersuchenden Netzes, die in der Registerkarte „Leistungsschaltermodell“ eingegebenen Leiter-Leiterspannungen aller eingezeichneten Netzelemente vom Benutzer gegebenenfalls manuell zu ändern.

Um das Ein- und Ausschaltverhalten eines Leistungsschalterttyps zu untersuchen, wird das Projekt, das das Leistungsschaltermodell enthält, kopiert und umbenannt. In dem umbenannten Projekt werden im vorhandenen Netz alle Betriebsmittel außer dem Leistungsschaltermodell und der mit dem Leistungsschaltermodell verbundenen Sammelschiene und Klemmleiste gelöscht. Danach werden die Namen des Netzes und der sich unter im Netzmodell befindenden Netzdaten geändert.

Das neue Netz wird eingezeichnet und mit dem Leistungsschaltermodell und der Sammelschiene verbunden. Wichtig ist, dass alle Leitungen, die mit der Sammelschiene direkt oder über einen Leistungsschalter verbunden sind, vor Berechnen des Oberskripts durch den Benutzer per Hand ausgeschaltet werden. Das geschieht durch Doppelklick auf das Netzelement und aktivieren der Option „außer Betrieb“. Sämtliche Leitungen zwischen Generator und Leistungsschaltermodell dürfen nicht außer Betrieb genommen werden.

Die eingezeichneten Betriebsmittel, wie Generator, Transformator, Generatorableitung, Sammelschienen und Netz können mit Hilfe eines Datenmanagers bearbeitet werden, um ihnen Daten zuzuordnen. Durch Doppelklick auf ein gezeichnetes Betriebsmittel können dessen Parameter aufgerufen werden. Ein Eingabedialog öffnet sich, und der Benutzer kann die Daten dieses Betriebsmittels bearbeiten. [11]

Vor der Eingabe der Transformator-, Generator- und Leitungsdaten sind die im Datenmanager unter „Bibliothek“ gespeicherten Typdaten der Generatoren, Transformatoren und Leitungen des vorherigen Netzes zu löschen. Sonst wird unter Umständen mit den falschen Typdateien gerechnet. Sämtliche anderen in „Bibliothek“ gespeicherten Typdateien dürfen nicht gelöscht werden.

Um einen neuen Generatortyp anzulegen, öffnet der Benutzer im Eingabedialog die Option „Typ“, erzeugt einen neuen Projekttyp und speichert ihn. Für Transformatortypen und Leitungstypen erfolgt das Vorgehen analog.

Wichtig ist, dass bei der Eingabe der Transformatordaten die Transformatorbemessungsspannung an der Ober- und Unterspannungsseite eingegeben wird, obwohl in der PowerFactory-Eingabemaske Nennspannungen stehen. Sämtliche Berechnungsparameter, wie z.B. die Transformatorimpedanz beziehen sich auf die Transformatorbemessungsspannung.

Zum Simulieren der Ein- und Ausschaltvorgänge des Leistungsschalters wurde im PowerFactory-Datenmanager ein Oberskript erstellt, das ein Einschaltkript und vier Ausschaltkripte beinhaltet. Diese Skripte müssen mit dem neu eingezeichneten Generator verknüpft werden, damit das Leistungsschaltermo­dell funktionieren kann.

Dafür wird im Datenmanager die Datei „Berechnungsfälle“ geöffnet. Hier wird „Berechnungsfall“ ausgewählt und das darin enthaltene Oberskript durch Rechtsklick und Auswahl der Option „Bearbeiten“ gewählt. Es öffnet sich das Eingabefenster „DPL-Kommando“ und zeigt in der Mappe „Grundoptionen“ unten die Externen Objekte. In der ersten Zeile ist das rot erscheinende Objekt neu auszuwählen. Durch Doppelklick auf diese Zelle kann der Name des neu gezeichneten Generators gewählt und mit dem Leistungsschaltermo­dell verbunden werden.

Daher werden im neu angelegten Projekt die Dateien Netzmodell und Netzdaten geöffnet und die darin enthaltene Datei mit dem Namen des neuen Netzes geöffnet. In diesem

Netz befinden sich die Symbole der eingezeichneten Betriebsmittel. Aus diesen wird die Zeile mit dem Symbol der Synchronmaschine durch Doppelklick ausgewählt und die Eingabe im sich öffnenden Fenster „DPL-Kommando“ durch „Speichern“ bestätigt.

Nach dem Anlegen des Netzes wird auf der PowerFactory-Hauptseite die Option „Lastfluss berechnen“ gewählt. Das Ergebnis der Lastflussberechnung steht im Ausgabefenster. Dort erscheint z.B. die Fehlermeldung, dass Sammelschienen und Klemmleisten unterschiedliche Nennspannungen haben. Durch einen Rechtsklick auf den Namen eines Objektes mit falscher Nennspannung und Auswahl der Option „Objekt im Datenmanager bearbeiten“, öffnet sich eine Tabelle, in der alle darin enthaltenen Objekte dieselbe Nennspannung erhalten müssen.

Wenn nach der Lastflussberechnung die Fehlermeldung „Nennspannungen der Klemmleisten sind nicht konsistent in Schaltanlage (grünes Symbol) Single Busbar:“ erscheint, dann sollte durch einen Rechtsklick die Option „In Grafik markieren“ ausgewählt werden. Es öffnet sich automatisch ein Fenster „Bitte Grafik auswählen“. Der Benutzer wählt „Single Busbar“. Dadurch erscheinen die Betriebsmittel mit der falschen Nennspannung im Grafikfenster und der Benutzer kann z.B. die Nennspannung jeder einzelnen Klemmleiste ändern und eine weitere Lastflussberechnung durchführen.

Nach dem Ausführen des Oberskripts im PowerFactory-Datenmanager kann eine weitere Fehlermeldung kann im Ausgabefenster erscheinen: „DPL SP\_Trafo, Skript Zeile 5: Objektvariable DPL „SP-Trafo“ Transformator: re0tr\_h ist unzugänglich“. Das lässt sich vermeiden, indem im Oberskript nacheinander jedes der vier Ausschaltskripte durch Rechtsklick und „Bearbeiten“ geöffnet wird. In jedem der vier Ausschaltskripte ist ein Skript „SP\_Trafo“. Nach dem Öffnen dieses Skripts ist in dessen Mappe „Grundoptionen“ als Objekt der passende Transformator auszuwählen. Das erfolgt durch Anklicken der leeren Zelle. Der Name des zu integrierenden Objekts wird im neu erzeugten Projekt in der Datei „Netzmodell“ unter „Netzdaten“ angezeigt. Dabei wird die Datei mit dem Namen des neuen Netzes gewählt, in der sich rechts öffnenden Tabelle der Transformator ausgewählt und im Fenster „DPL-Kommando“ gespeichert.

Wenn die Fehlermeldung „Ausschalten\_metallischer\_KS\_ohne\_Erde\_1’, Skript Zeile 68: Objektvariable MyGen:Pnom ist unzugänglich“ im PowerFactory-Ausgabefenster erscheint, dann ist das oben genannte Skript im PowerFactory-Datenmanager durch

Rechtsklick und Auswahl der Option „Bearbeiten“ zu öffnen. Es erscheint das in Abbildung 18 dargestellte Fenster.

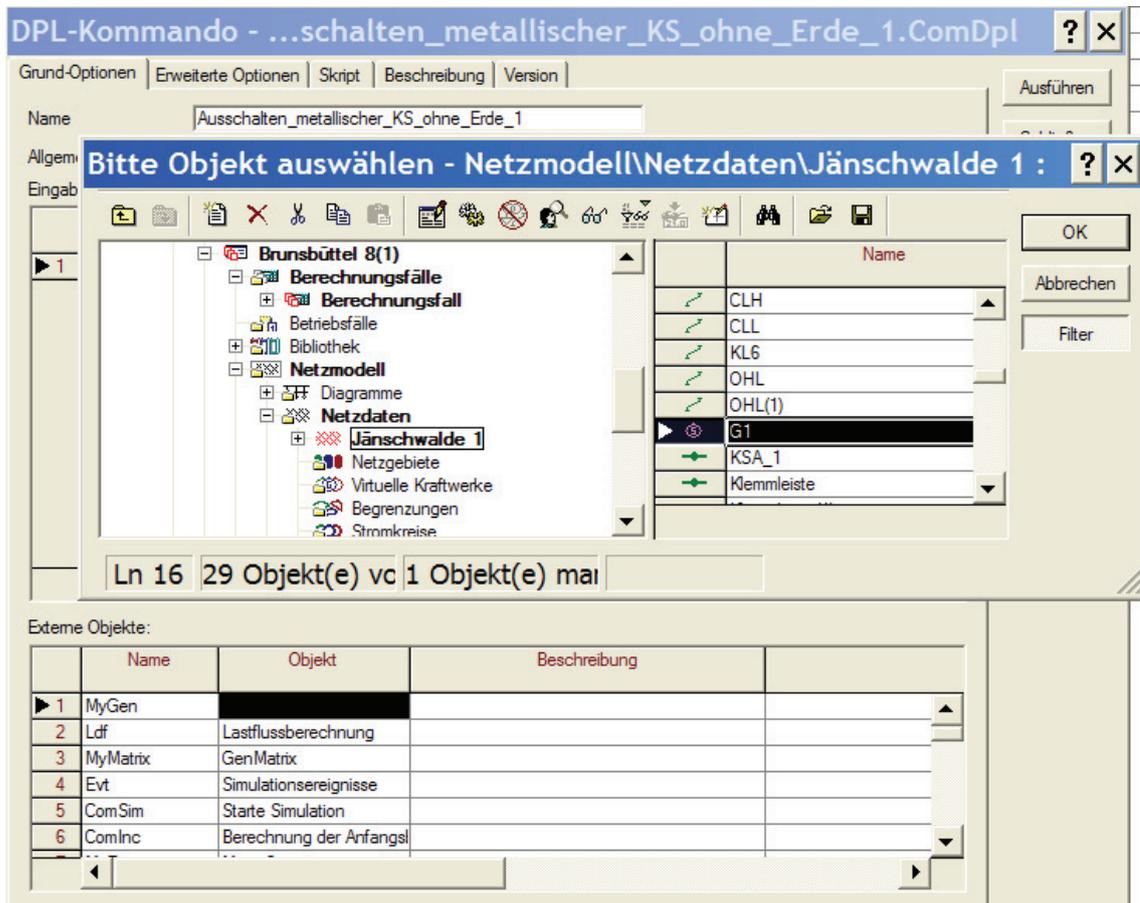


Abbildung 18: Zuordnung der Generatorparameter

In dem geöffneten Fenster ist in der Mappe Grund-Option unter „Externe Objekte“ in der ersten Zeile die leere Zelle in der Spalte Objekt durch Doppelklick auszuwählen. Es öffnet sich das in Abbildung 18 dargestellte Fenster „Bitte Objekt auswählen“. In diesem Fenster ist der Pfad dargestellt, der zu dem gesuchten Objekt führt. Der Benutzer öffnet im neu erzeugten Projekt in den Netzdaten, z.B. „Jänschwalde 1“ und wählt das Synchronmaschinensymbol durch Doppelklick aus. Das gleiche Vorgehen erfolgt für das Skript „Einschaltvorgaenge“ und die Ausschaltskripte „Ausschalten\_metallischer\_KS\_mit\_Erde\_2“, „Ausschalten\_Fehlerlichtbogen\_ohne\_Erde\_3“ und „Ausschalten\_Fehlerlichtbogen\_mit\_Erde\_4“.

Bevor das Ein- und Ausschaltverhalten eines Leistungsschalters simuliert werden kann, erzeugt der Benutzer auf dem Laufwerk C die Verzeichnisse:

- C:\Temp\Einschaltvorgang
- C:\Temp\Szenario 1 – Ausschalten metallischer KS ohne Erde
- C:\Temp\Szenario 2 – Ausschalten metallischer KS mit Erde
- C:\Temp\Szenario 3 – Ausschalten Fehlerlichtbogen ohne Erde
- C:\Temp\Szenario 4 – Ausschalten Fehlerlichtbogen mit Erde

Darin werden die Ergebnisse der Ein- und Ausschaltvorgänge des untersuchten Leistungsschaltertyps als Grafiken und die Daten der Generatorleistungsdiagramme, wie Ausschaltzeit des Leistungsschalters bei der jeweiligen Wirk- und Blindleistung des Generatorarbeitspunktes automatisch gespeichert.

Im Anschluss werden dem neu hinzugefügten Leistungsschaltermmodell Simulationsergebnisse zugeordnet. Dafür wird im PowerFactory-Hauptfenster in der Taskleiste die Option „Bearbeiten von Simulations-Ereignissen“ durch Anklicken geöffnet. Im geöffneten Fenster stehen links die chronologisch angeordneten Simulationsereignisse. Jedem dieser Simulationsereignisse wird ein Objekt zugewiesen (siehe Abbildung 19).



	Name	Zeit	Objekt StaBar*, ElmTerm*, ...	außer Betrieb	OI
▶	Netz_ausschalten	-0.009	Feld_1	<input checked="" type="checkbox"/>	
▶	LS_dreiphasig_oeffnen	0.	Leistungsschalter	<input checked="" type="checkbox"/>	
▶	Netz_einschalten	0.	Feld_1	<input checked="" type="checkbox"/>	
▶	zweipoliger_KS_mit_Erde	0.01334	SS 1	<input checked="" type="checkbox"/>	
▶	zweipoliger_KS_ohne_Erde	0.01334	SS 1	<input type="checkbox"/>	
▶	LS_schliesst_L1+L2	0.015	Leistungsschalter	<input checked="" type="checkbox"/>	
▶	Erdungsschalter	0.01551	Erdungsschalter	<input checked="" type="checkbox"/>	
▶	dreipoliger_KS	0.01551	SS 1	<input type="checkbox"/>	
▶	zweipoliger_KS	0.022	SS 1	<input checked="" type="checkbox"/>	
▶	Kontakttrennung_L1	0.0523	Leistungsschalter	<input type="checkbox"/>	
▶	Kontakttrennung_L2	0.0523	Leistungsschalter	<input type="checkbox"/>	
▶	Widerstand_DSL_L2	0.05431005	Widerstand_DSL_L2	<input type="checkbox"/>	
▶	Widerstand_DSL_L1	0.05519641	Widerstand_DSL_L1	<input type="checkbox"/>	
▶	Kontakttrennung_L3	0.0553	Leistungsschalter	<input type="checkbox"/>	
▶	Widerstand_DSL_L3	0.06072638	Widerstand_DSL_L3	<input type="checkbox"/>	

Abbildung 19: Zuordnung der Objekte zu den Simulationsereignissen

Um den Simulationsereignissen „Netz\_ausschalten“ und „Netz\_einschalten“ das passende Objekt zuzuordnen, sind in der Spalte Objekt die erste und dritte Zeile anzuklicken und unter Netzmodell zuerst Netzdaten und das aktivierte Netz auszuwählen. Hier wird „Single Busbar“ geöffnet und die Sammelschiene ausgewählt, an die das Netz angeschlossen ist. In der rechten Fensterhälfte erscheinen die Felder der Sammelschiene, aus denen der Benutzer das Feld auswählt, an welches das Netz angeschlossen ist.

Dem Simulationsereignis „LS\_dreiphasig\_oeffnen“ wird das passende Objekt zugeordnet, indem der Benutzer in der Spalte Objekt die Zelle neben dem Simulationsereignis per Doppelklick öffnet. Es erscheint ein Fenster mit dem Netzmodell. In der linken Fensterhälfte wird die Sammelschiene ausgewählt, an die das Leistungsschaltermodell angeschlossen ist. Mit der linken Maustaste wird „Leistungsschaltermodell“ angeklickt. In der rechten Hälfte des Fensters erscheint in der fünften Zeile „Leistungsschalter“ und wird durch Doppelklick dem Simulationsereignis „LS\_dreiphasig\_oeffnen“ als Objekt zugewiesen. Nach jeder Objektzuweisung ist die Änderung zu speichern.

Den Simulationsereignissen „LS\_schliesst\_L1+L2“, „Kontakttrennung\_L1“ und „Kontakttrennung\_L2“, „Kontakttrennung\_L3“ ist jeweils dasselbe Objekt „Leistungsschalter“ zuzuweisen. Dem Simulationsereignis „Erdungsschalter“ wird das Objekt Erdungsschalter\_1 zugewiesen. Dafür ist im Leistungsschaltermodell der Erdungsschalter\_1 auszuwählen.

Dem Simulationsereignis „zweipoliger\_KS\_mit\_Erde“ wird in der Spalte Objekt der Kurzschlussort zugewiesen. Durch Doppelklick auf die Zelle in der Spalte Objekt wird die Ansicht des Netzmodells geöffnet und in der linken Fensterhälfte die Datei mit dem Kurzschlussort angeklickt und hinzugefügt. Für die Simulationsereignisse „zweipoliger\_KS\_ohne\_Erde“, „dreipoliger\_KS“ und „zweipoliger\_KS“ ist als Objekt derselbe Kurzschlussort einzutragen.

Für das DSL-Simulationsereignis „Widerstand\_DSL\_1“ ist das Leistungsschaltermodell durch Doppelklick zu öffnen. Wichtig ist, dass der Benutzer in der linken Fensterhälfte das „Modell\_Lichtbogen\_Phase\_1“ anklickt, wodurch in der rechten Fensterhälfte das Objekt „Widerstand\_DSL\_L1“ erscheint und durch Doppelklick ausgewählt wird. Für die DSL-Simulationsereignisse erfolgt das Vorgehen analog. Das heißt, für das DSL-Simulationsereignis „Widerstand\_DSL\_L2“ wird das Objekt „Wider-

stand\_DSL\_L2“ ausgewählt und für das DSL-Simulationsereignis „Widerstand\_DSL\_L3“ das Objekt „Widerstand\_DSL\_L3“.

Nach dem Anlegen des neuen Netzes sind die Variablen der einzelnen Objekte auszuwählen, die als Ergebnisse tabellarisch oder grafisch darstellen werden sollen.

Um die Variablen eines Objektes anzeigen zu können, ist zuerst eine Lastflussberechnung durchzuführen. Im nächsten Schritt erfolgt entweder im Netzdiagramm oder im Datenmanager ein Rechtsklick auf das Objekt. Durch die Auswahl der Option „Definiere...“ öffnen sich weitere Optionen, aus denen „Variablenauswahl (Sim)“ ausgewählt wird. Es öffnet sich das Fenster „Ergebnisse-Berechnungsfälle“. Durch Doppelklick auf die erste Spalte der schwarz markierten Zeile erscheint das Fenster „Variablenauswahl“ (siehe Abbildung 20).

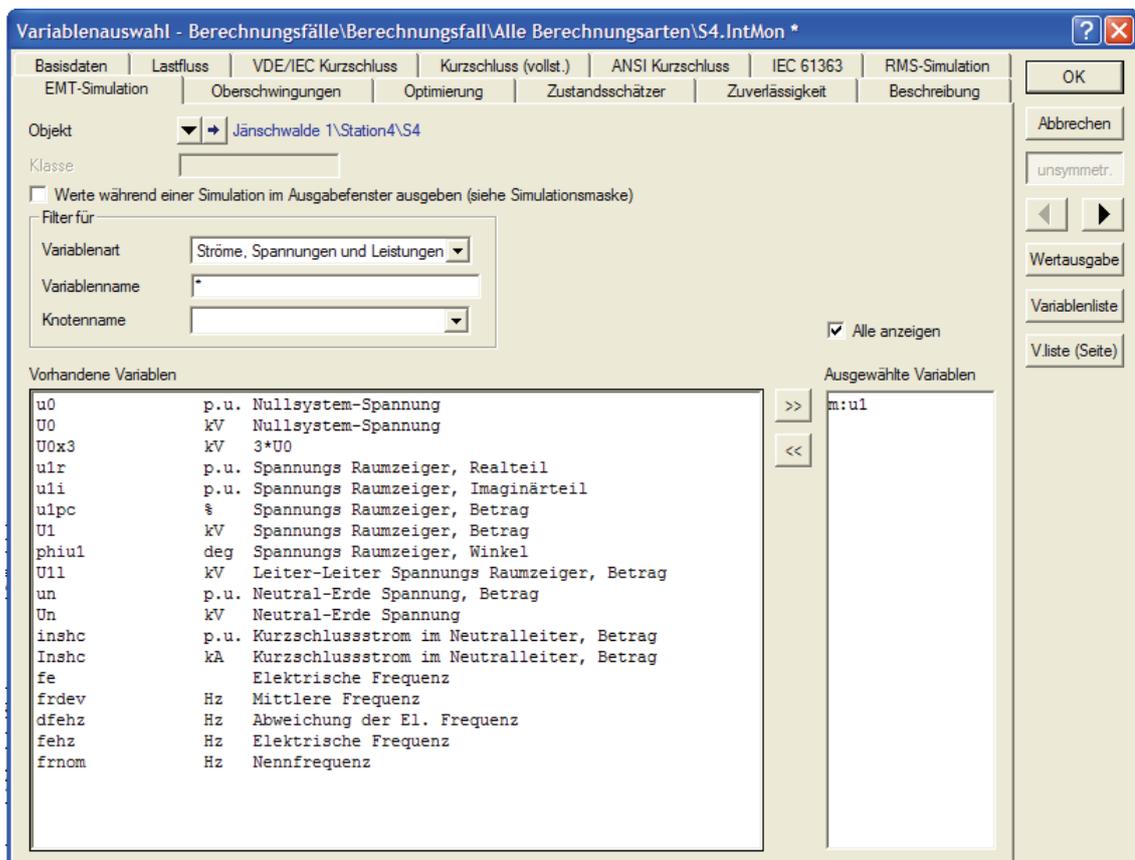


Abbildung 20: Variablenauswahl-Fenster

Das Variablenauswahl-Fenster enthält die Variablen, die in PowerFactory dargestellt werden können. Wenn der Benutzer eine Variable für ein Objekt auswählen möchte,

wählt er die passende Registerkarte aus. In Abbildung 20 ist das z.B. „EMT-Simulation“. Wichtig ist der „Filter für Variablenart“. Mit diesem Filter werden die Variablen für „Ströme, Spannungen und Leistungen“, „Knotenergebnisse“, „Signale“ oder „Berechnungsparameter“ ausgewählt und erscheinen in der linken Spalte. Durch Anklicken der Schaltflächen „Pfeil nach rechts“ oder „Pfeil nach links“ können Ergebnisvariablen zu den ausgewählten Variablen in die rechte Spalte hinzugefügt oder entfernt werden. Über der rechten Spalte ist die Option „Alle anzeigen“ zu aktivieren. [12]

Im PowerFactory-Hauptfenster befinden sich zwischen dem Grafikfenster und dem Ausgabefenster mehrere Registerkarten. In der ersten Registerkarte „Netz“ ist das zu untersuchende Netz einzuzeichnen. Weitere Registerkarten enthalten alle Daten des programmierten Leistungsschaltermodells. Diese Registerkarten dürfen nicht gelöscht werden.

Neben der Registerkarte „Netz“ befinden sich die Registerkarten mit den Grafiken, in denen die Ergebnisse der Variablen darzustellen sind. Beim Anlegen eines neuen Netzes können Variablen in den Grafiken gelöscht werden und sind daher manuell wieder einzugeben. Die Eingabe der Variablen und Elemente wird an dieser Stelle für jede Registerkarte, in die Simulationsergebnisse dargestellt werden in Anlage A2 aufgelistet.

Um die Variablen in einer Grafik anzuzeigen, wird die Grafik durch Doppelklick geöffnet. Es erscheint das Fenster „Diagramm“. Ist in diesem Fenster die Spalte „Element“ leer, so wird die entsprechende leere Zelle durch Doppelklick geöffnet und das Objekt ausgewählt. Elementname und dazugehörige Variable stehen in Anlage A2. Dazu sucht der Benutzer in der Anlage die Registerkarte, das dazu passende Diagramm und trägt die dort enthaltenen Parameter ein.

## 5.2 Notwendige PowerFactory-Einstellungen

Vor dem Berechnen der Ausschaltvorgänge ist die Eingabemaske der Generatorparameter durch Doppelklick auf das Generatorsymbol zu öffnen. In dem geöffnetem Fenster ist in der Mappe „Lastfluss“ für die „Art des lokalen Spannungsreglers“ die Option „Leistungsfaktor“ auszuwählen. Das ist erforderlich, damit das Ausschaltvermögen des Leistungsschalters im Generatorleitungsdiagramm richtig dargestellt werden kann. In

der Mappe „Lastfluss“ ist zudem die Option „Rotiert bei geöffnetem Leistungsschalter“ zu aktivieren.

Um die Simulationen in PowerFactory zu beschleunigen, wird nach dem Anmelden des Benutzers in der Taskleiste „Erweitert“ ausgewählt und die Schaltfläche mit Pfeil nach rechts angeklickt. Dann wird die Option „Aktiviere Multi-Threading“ ausgewählt (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21: Aktivieren der Option Multi-Threading

„Multi-Threading“ ist das gleichzeitige Abarbeiten mehrerer Ausführungsstränge (Threads) in einem einzelnen Prozess. Einzelne Ausführungsstränge reagieren sehr schnell auf zeitkritische Ereignisse, während andere Ausführungsstränge lang andauernde Berechnungen durchführen.

Das Leistungsschaltermodell funktioniert nur, wenn der Benutzer im PowerFactory-Hauptfenster die Schaltfläche „Benutzereinstellungen“ auswählt und im Fenster „Allgemein“ das Dezimalsymbol „.“ einstellt.

Eine Besonderheit von PowerFactory ist, dass das Programm nur dreipolige Kurzschlussereignisse mit Erdberührung zu einem beliebigen Zeitpunkt simulieren kann, wenn der Benutzer einen zusätzlichen Erdungsschalter in die gewünschte Kurzschlussstelle des zu untersuchenden Netzes integriert. Der Erdungsschalter wurde in das Leistungsschaltermodell integriert und ist nicht zusätzlich durch den Benutzer anzulegen. Der Benutzer kann einen dreipoligen Kurzschluss zu einem frei wählbaren Zeitpunkt an jedem beliebigen Kurzschlussort einstellen.

Zweipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung können ohne Zuhilfenahme des Erdungsschalters erzeugt werden. Für die im Oberskript gespeicherten Ausschalt Szenarien wurden die Kurzschlussereignisse automatisch erzeugt.

Bevor die Ausschaltvorgänge berechnet werden können, ist die passende Simulationsmethode zu wählen. Das geschieht auf der PowerFactory-Hauptfenster, durch anklicken der Option „Symbolleiste auswählen“ in der oberen Taskleiste. Der Benutzer wählt „Stabilität“ und es erscheint das Symbol „Berechne Anfangsbedingungen“. Durch anklicken öffnet sich die Eingabemaske, in der die Option „Momentanwerte“ auszuwählen ist.

Wenn das zu untersuchende Netz angelegt wurde, ist in der Taskleiste des PowerFactory-Hauptfensters „Bearbeiten von Simulationsereignissen“ auszuwählen. Es erscheinen die gespeicherten Simulationsereignisse. Wichtig ist, dass die Simulationsereignisse „Widerstand\_DSL\_L1“, „Widerstand\_DSL\_L2“ und „Widerstand\_DSL\_L3“ nicht exportiert werden, da sonst in der Kurzschlussberechnung keine Konvergenz erreicht wird.

Um die Simulation des Ausschaltvorganges wesentlich zu beschleunigen, wurden die „Automatische Schrittweitenanpassung“ und die „maximale Schrittweite“ mit Hilfe des Leistungsschaltermodells per Skript automatisch vorgegeben.

Durch die automatische Schrittweitenanpassung wählt PowerFactory die Schrittweite entsprechend dem tatsächlichen Verlauf jeder Zustandsvariablen. PowerFactory berechnet eine optimale Schrittweite, wodurch die numerischen Fehler in den festgelegten Grenzen gehalten werden. Ein Schrittweitenregler passt die Integrations-Schrittweite an. Nach dem Abklingen schneller transienter Vorgänge erhöht PowerFactory automatisch die Schrittweite und beschleunigt dadurch die Simulation. Während Ereignissen, wie z.B. einem Kurzschluss, wird die Schrittweite immer auf die „minimale Schrittweite“ zurückgesetzt. Dadurch können transiente Ereignisse genau dargestellt werden. [11]

Wenn nach Eingabe der Werte beim Berechnen ein Fehler angezeigt wird, ist es u.U. notwendig, entweder die automatische Schrittweitenanpassung zu deaktivieren oder die gewählte Schrittweite zu verkleinern.

Die PowerFactory-Datenbank ist eine stabile Datenbank. Trotzdem kann es aufgrund externer Ursachen, wie Stromausfällen, einem Schaden der Festplatte oder unbeabsich-

tigtem Löschen der Dateien zu Datenverlust kommen. Daher ist es erforderlich, das Datenbankverzeichnis der DIgSILENT PowerFactory-Installationen möglichst täglich zu sichern. Das PowerFactory-Datenbankverzeichnis hat den Namen „DB“.

Um Datenverlust zu vermeiden, sollten alle Projekte regelmäßig gespeichert werden. Das geschieht, indem mit der rechten Maustaste auf den Projektordner im Datenbank-Verzeichnisbaum geklickt und die Option „Daten exportieren“ ausgewählt wird. Dabei wird der Benutzer aufgefordert, einen Dateinamen einzugeben. Zu beachten ist, dass beim Export eines Projektes nur die in diesem Projekt und allen seinen Unterordnern enthaltenen Daten gespeichert werden. Wenn die exportierten Objekte Daten, wie zum Beispiel Leitungsparameter verwenden, die an einem anderen Ort gespeichert sind, werden diese Daten nicht exportiert. Es ist sicherzustellen, dass die Typen aller verwendeten Betriebsmittel ebenfalls exportiert werden. Daher wird empfohlen, innerhalb des Projekts eine Bibliothek anzulegen, in der alle für das Projekt erforderlichen Typdaten der Betriebsmittel gespeichert werden. Durch Anklicken des Symbols „Importieren“ in der Symbolleiste können exportierte Projekte (\*.pfd oder \*.dz) in den Verzeichnisbaum der Datenbank importiert werden. Dafür ist das Projekt vorher zu deaktivieren. [11]

### **5.3 Einschaltverhalten**

Um das Einschaltverhalten von Leistungsschaltern simulieren zu können, wurden in PowerFactory mit Hilfe der DIgSILENT Simuliersprache (DSL) Gleichungen für die Berechnung des beim Einschaltvorgang auftretenden Vorüberschlags gespeichert.

Der Benutzer muss zur Ermittlung des prospektiven Kurzschlussstroms einen Kurzschluss mit geschlossenem Leistungsschalter simulieren. Anhand der Höhe des prospektiven Kurzschlussstromes kann die passende Lichtbogenkennlinie des zu untersuchenden Leistungsschaltertyps bestimmt werden. Für jeden Leistungsschaltertyp wurden vier Lichtbogenkennlinien gespeichert, da die Lichtbogenkennlinie abhängig vom durchflossenen Strom ist. Ist der Leistungsschaltertyp noch nicht im Leistungsschaltermodell gespeichert, so erfolgt das Vorgehen, wie in Kapitel 5.7 beschrieben.

Hat der Benutzer aus Anlage 1 die Nummer des zu untersuchenden Leistungsschaltertyps ausgewählt, dann wird das zu untersuchende Netz im PowerFactory-Datenmanager geöffnet und das unter Berechnungsfall gespeicherte Oberskript ausgeführt. Es öffnet

sich automatisch die Eingabemaske „Geben Sie den Leistungsschalterttyp ein!“ (siehe Abbildung 22).

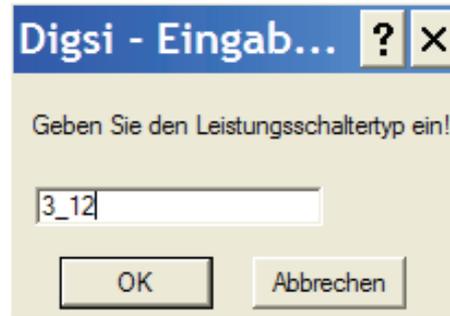


Abbildung 22: Eingabemaske Nummer des Leistungsschalterttyps

In diese Eingabemaske wird die Nummer des Leistungsschalterttyps eingetragen.

Die für die Simulation des Einschaltvorganges erforderlichen Parameter, wie Netzfrequenz, mechanische Polstreuung der Phase L3 und das Ende der Simulationszeit werden von PowerFactory im folgenden Eingabefenster abgefragt (siehe Abbildung 23).

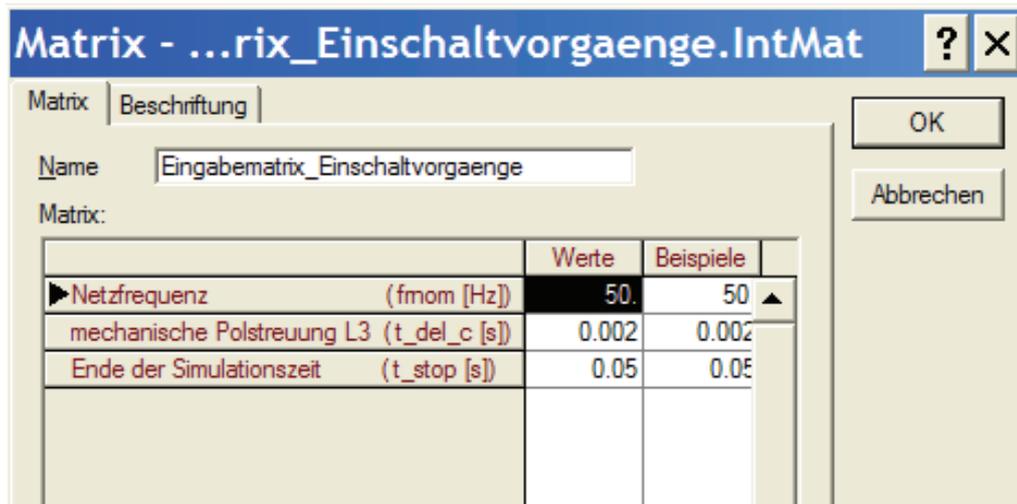


Abbildung 23: Eingabematrix Einschaltvorgänge

Die mechanische Streuung zwischen den Schalterpolen beim Einschalten kann theoretisch bis zu 5 ms betragen. In der Praxis liegt sie bei 2 ms. Nachdem der Benutzer die Parameter eingegeben hat, berechnet PowerFactory den Einschaltvorgang und speichert die Grafik in C:\Temp\Einschaltvorgang (siehe Abbildung 24).

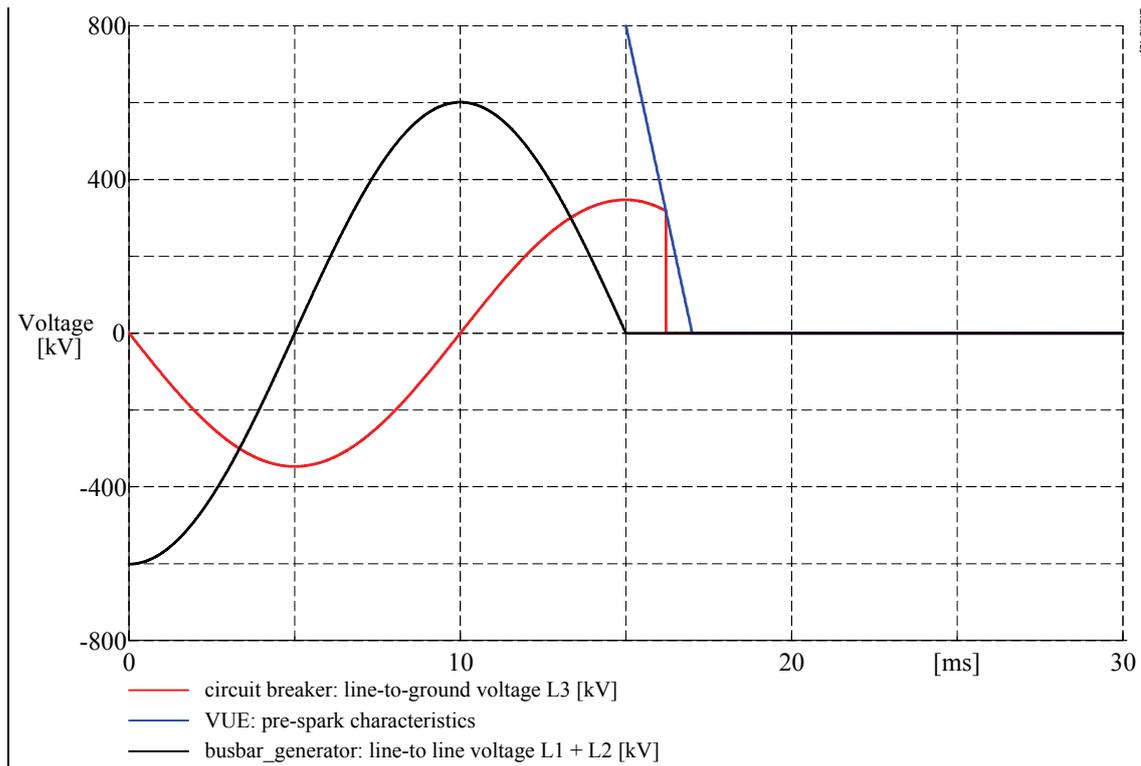


Abbildung 24: Vorüberschlagskennlinie eines Leistungsschaltertyps

Abbildung 25 zeigt als Beispiel folgenden Einschaltvorgang:

Im Nulldurchgang der verketteten Leiter-Leiterspannung zwischen L1 und L2 (schwarz dargestellt) tritt ein zweipoliger metallischer Kurzschluss zwischen den beiden Phasen auf. Zu diesem Zeitpunkt gibt es die Kontaktberührung der Phasen L1 und L2. Durch die mechanische Polstreuung erfolgt die Kontaktberührung in der dritten Phase in diesem Fall 2 ms später. PowerFactory vergleicht beim Einschaltvorgang des Leistungsschalters den Momentanwert der Spannung mit dem Momentanwert der Vorüberschlagskennlinie.

Ist die Spannung in einer Phase zu einem Zeitpunkt größer als der Wert der Vorüberschlagskennlinie, so gibt es zu diesem Zeitpunkt einen Vorüberschlag. Das heißt, die dielektrische Festigkeit  $w$  der Schaltstrecke ist kleiner als die zwischen den Kontakten anstehende Spannung. Im Kapitel 3.2 wird die Vorüberschlagskennlinie näher erläutert.

Ziel der Berechnung des Einschaltvorgangs ist die automatische Ermittlung der elektrischen Verzugsdauer  $t_{d_{el}}$  aus der mechanischen Verzugsdauer (mechanische Pol-

streuung), die der Benutzer in der „Eingabematrix Einschaltvorgänge“ angibt (siehe Abbildung 24).

Mit Hilfe des Einschaltskripts ermittelt PowerFactory den Nulldurchgang der verketteten Leiter-Leiter-Spannung zwischen L1 und L2 sowie den Schnittpunkt der Vorüberschlagskennlinie mit der Phasenspannung L3 automatisch. Die elektrische Verzugszeit ist die Zeitdauer zwischen beiden Ereignissen.

Die elektrische Verzugsdauer wird durch PowerFactory automatisch in beide Skripte mit nichtsimultane metallischem dreipoligem Kurzschluss exportiert. Für diese Szenarien gibt die elektrische Verzugsdauer an, wie viele Millisekunden nach dem zweipoligen Kurzschluss der dreipolige Kurzschluss eintritt.

#### 5.4 Eingabe der Parameter für den Ausschaltvorgang

Im nächsten Schritt wird das Ausschaltverhalten eines Leistungsschaltertyps simuliert. Nach dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Vorgehen (Auswahl des Leistungsschaltertyps und Eingabe der Parameter für den Einschaltvorgang) erfolgt nun die Simulation der Ausschaltvorgänge. Die „Eingabematrix Ausschaltvorgänge“ des gewählten Leistungsschaltertyps öffnet sich automatisch (siehe Abbildung 25).



Abbildung 25: Eingabematrix Ausschaltvorgänge

Diese Matrix enthält die für die Simulation des Ausschaltvorganges erforderlichen Parameter. Sie werden mit Hilfe von DSL ausgelesen und ersetzen die im dreiphasigen Leistungsschaltermodell gespeicherten Variablen in den algebraischen Gleichungen.

In der ersten Zeile der „Eingabematrix Ausschaltvorgaenge“ ist ein Wert für die „bewusste Verzögerung“ einzugeben. Die beiden folgenden Zeilen „Feldstärke Fehlerlichtbogen“ und „Länge Fehlerlichtbogen“ beinhalten die Eingabeparameter für das Fehlerlichtbogenmodell, das für die im Oberskript gespeicherten Szenarien „Ausschalten\_Fehlerlichtbogen\_ohne\_Erde“ und „Ausschalten\_Fehlerlichtbogen\_mit\_Erde“ benötigt wird. Das Fehlerlichtbogenmodell hat eine variable Impedanz. In der vierten Zeile wird die Sternpunktimpedanz auf der Oberspannungsseite des Transformators eingegeben. In der fünften Zeile wird das Ende der Simulationszeit angegeben.

Der zeitliche Ablauf eines Ausschaltvorganges wird in der Abbildung 26 erläutert.

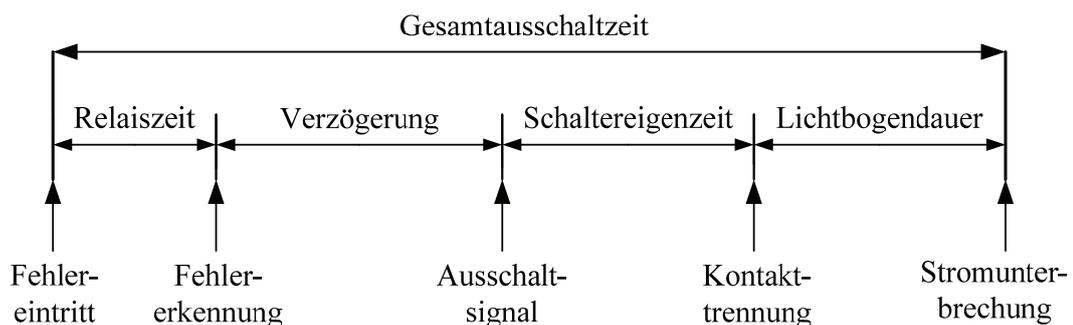


Abbildung 26: Zeitlicher Ablauf des Ausschaltvorgangs

Die Relaiszeit ist die Zeit, die der Schutz für die Fehlererkennung benötigt. Mit der Verzögerung (eingestellte Verzögerungszeit) kann sichergestellt werden, dass das Ausschaltvermögen des Schalters für jeden möglichen Betriebszustand des Generators ausreicht. Die Verzögerung wird durch die mechanische Stabilitätsgrenze begrenzt. Nach der Verzögerung wird das Ausschalt-signal gegeben.

Die folgende Schalt-eigenzeit ist die Zeit, bis sich die Kontakte im letzttrennenden Schalterpol auseinander bewegen. Durch diese Kontakt-trennung entsteht ein Lichtbogen zwischen den Kontakten. Die Lichtbogen-dauer beginnt mit der Kontaktöffnung im erst-trennenden Schalterpol und endet beim Unterbrechen des Stromes im letztlöschenden Schalterpol. [13]

Abhängig vom Lichtbogen-Löschvermögen des Schalters, das in Kapitel 3.1 näher erläutert wird, erfolgt die Unterbrechung des Lichtbogens im Stromnulldurchgang, und damit das Ausschalten des Fehlers. Das Ende der Simulationszeit wurde per Skript für die vier gespeicherten Ausschaltvorgänge automatisch eingestellt und beträgt 100 ms nach der Kontaktöffnung.

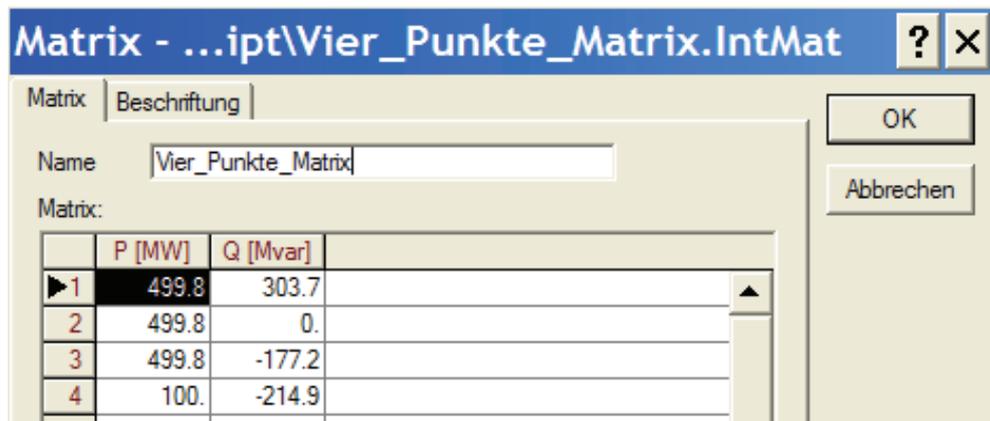
## 5.5 Eingabe der Generatorarbeitspunkte

Wenn der Benutzer die Parameter des Ausschaltvorgangs eingegeben hat, öffnet sich ein weiteres Eingabefenster, das die Werte der Generatorkennlinie in Form einer Matrix enthält (siehe Abbildung 27).

	P [MW]	Q [Mvar]
1	0.	-224.
2	565.	-171.
3	577.	-118.
4	582.	-59.
5	588.	0.
6	582.	59.
7	577.	118.
8	559.	176.
9	529.	253.
10	482.	335.
11	412.	371.
12	330.	412.
13	194.	447.

Abbildung 27: Eingabematrix der Generatorkennlinie

Die Parameter der Generatorkennlinie werden anhand einer als Grafik vorliegenden Generatorkennlinie abgelesen und in die Matrix eingetragen. Anschließend erscheint ein weiteres Eingabefenster, in der die vier wichtigsten Generatorarbeitspunkte abgefragt werden (siehe Abbildung 28).



	P [MW]	Q [Mvar]
1	499.8	303.7
2	499.8	0.
3	499.8	-177.2
4	100.	-214.9

Abbildung 28: Eingabematrix für vier Generatorarbeitspunkte

Bestätigt der Benutzer diese Eingabemaske, wird der Ausschaltvorgang für den gewählten Leistungsschalterttyp automatisch dreiphasig berechnet. Zuerst wird der Ausschaltvorgang für die vier Generatorarbeitspunkte simuliert. Danach werden alle Generatorarbeitspunkte auf der Generatorkennlinie simuliert, deren Wirkleistung nicht größer als die Stabilitätsgrenze des Generators ist. Anschließend werden die Generatorarbeitspunkte für sämtliche Generatorbetriebszustände innerhalb und auf der Generatorkennlinie automatisch berechnet. Dabei ist der Abstand zwischen zwei Generatorarbeitspunkten in den vier Ausschaltskripten definiert. Für das Skript „Ausschalten\_metallischer\_KS\_ohne\_Erde\_1“ beträgt der Abstand zwischen zwei Generatorarbeitspunkten 65 MW für die Wirkleistung (Zeile 577) und 62,5 Mvar für die Blindleistung (Zeile 586). Durch das Ändern dieser Werte kann der Abstand variiert werden. Das gleiche Vorgehen ist für die anderen drei Ausschaltskripte erforderlich.

## 5.6 Ausschaltszenarien

Wenn der Benutzer die vier Generatorarbeitspunkte eingegeben hat, erfolgt die automatische Berechnung des Einschaltszenarios, um die elektrische Verzögerung zu ermitteln. Danach erfolgt automatisch die Ermittlung des Spannungsnulldurchgangs der verketteten Leiter-Leiter-Spannung zwischen L1 und L2 ( $U_{L1L2}$ ) für den Ausschaltvorgang. Die Berechnung läuft über eine vollständige Periode. Im Anschluss werden die folgenden vier Ausschaltszenarien simuliert und deren Ergebnisse im Verzeichnis C:\Temp gespeichert (siehe Kapitel 5.1).

Im Szenario 1 (Ausschalten metallischer KS ohne Erde) tritt zum Zeitpunkt des Spannungsnulldurchgangs der verketteten Leiter-Leiter-Spannung  $U_{L1L2}$  ein metallischer zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung zwischen L1 und L2 auf. Nach der mit Hilfe des Skripts Einschaltvorgang automatisch berechneten elektrischen Verzögerung erfolgt der metallische dreipolige Kurzschluss ohne Erdberührung. In Abbildung 29 sind die Spannungsdifferenzen über den Leistungsschalter, die Schalterlichtbogen-spannung und die Phasenströme in L1, L2 und L3 grafisch dargestellt. In der Legende sind der Arbeitspunkt des Generators vor Fehlereintritt sowie das Fehlerszenario für diese Ergebnisse aufgeführt.

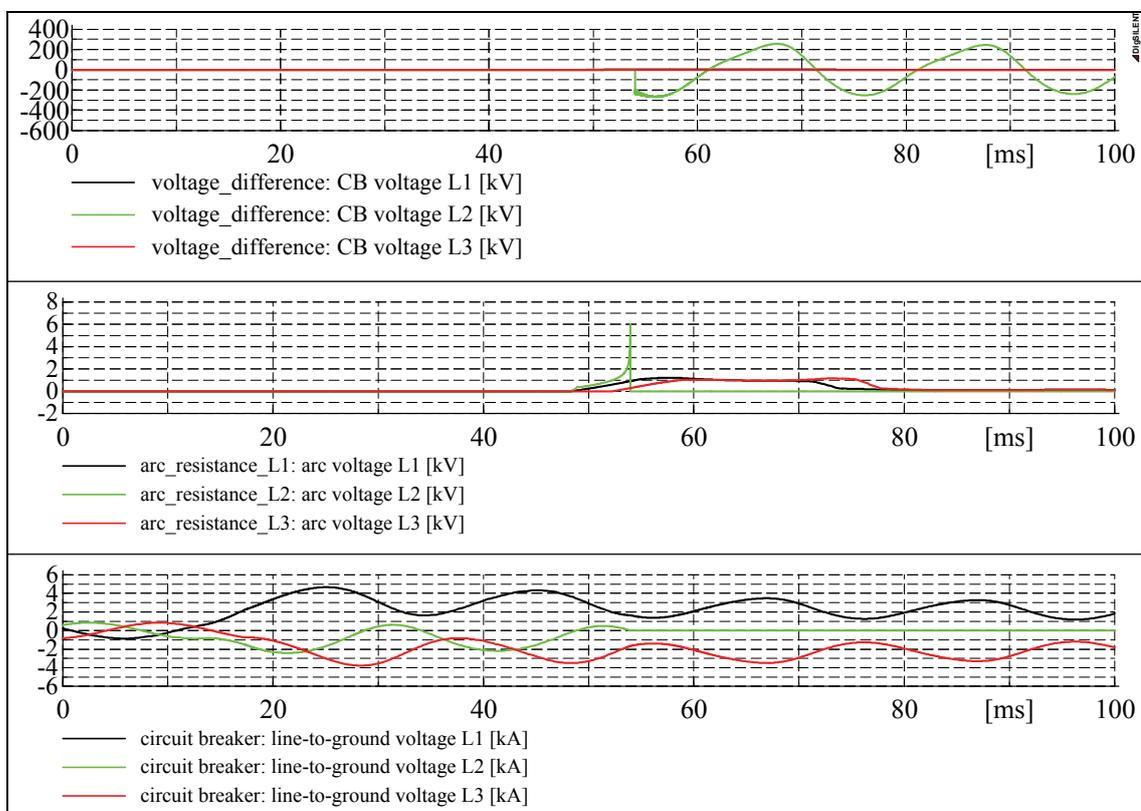


Abbildung 29: Szenario 1 - Spannungen und Phasenströme für einen Generator-arbeitspunkt

Mit Hilfe des Leistungsschaltermodells wird für vier Ausschalt-szenarien und jeweils vier vom Benutzer per Eingabemaske ausgewählte Generatorarbeitspunkte der Verlauf dieser Parameter automatisch berechnet und gespeichert.

Im Szenario 2 (Ausschalten metallischer KS mit Erde) tritt im Spannungsnulldurchgang der verketteten Leiter-Leiter-Spannung  $U_{L1L2}$  ein metallischer zweipoliger Kurzschluss

mit Erdberührung zwischen den Phasen L1 und L2 auf. Nach der elektrischen Verzögerung entsteht durch den Beginn des Stromflusses über den dritten Schalterpol ein metallischer dreipoliger Kurzschluss mit Erdberührung.

Im Szenario 3 (Ausschalten Fehlerlichtbogen ohne Erde) kommt es im Spannungsnulldurchgang der verketteten Leiter-Leiter-Spannung  $U_{L1L2}$  zum zweipoligen Kurzschluss mit Fehlerlichtbogen zwischen L1 und L2, der 5 ms später ein dreipoliger Kurzschluss mit Fehlerlichtbogen wird. In diesem Szenario haben beide Kurzschlüsse keine Erdberührung. Das Szenario 4 (Ausschalten Fehlerlichtbogen mit Erde) unterscheidet sich vom Szenario 3 dadurch, dass der zweipolige und der dreipolige Kurzschluss mit Erdberührung auftreten.

## 5.7 Integration eines neuen Leistungsschaltertyps

Das in dieser Arbeit mit Hilfe der DIgSILENT Programmiersprache (DPL) sowie der DIgSILENT Simulationssprache (DSL) programmierte dreiphasige Leistungsschaltermodell ermöglicht es, neue Leistungsschalterttypen in PowerFactory zu integrieren. Daher ist das dreiphasige Leistungsschaltermodell mit dem unter „Berechnungsfall“ gespeicherten Oberskript in das zu untersuchende Netz zu kopieren.

Die Abbildung 30 zeigt das mit Hilfe von PowerFactory entwickelte dreiphasige Leistungsschaltermodell. Es befindet sich in der Registerkarte „Leistungsschaltermodell“.

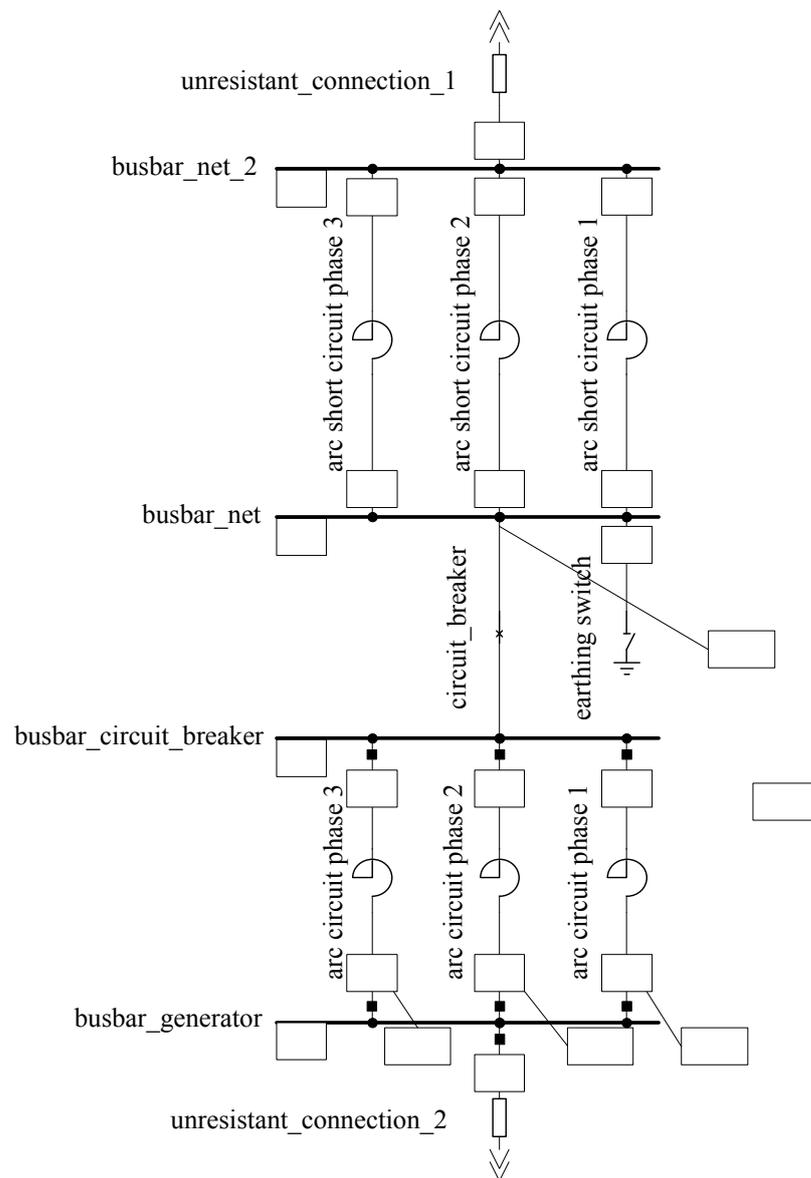


Abbildung 30: Leistungsschaltermmodell

Dieses Leistungsschaltermmodell beinhaltet einen Erdungsschalter, der es PowerFactory ermöglicht, dreipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung zu berechnen.

Zwischen den Sammelschienen „busbar\_net\_2“ und „busbar\_net“ des Leistungsschaltermodells befindet sich das Fehlerlichtbogenmodell, mit dessen Hilfe der Fehlerlichtbogenwiderstand am Fehlerort nachgebildet wird. Das Fehlerlichtbogenmodell verfügt über eine variable Impedanz.

Wie in Kapitel 5.4 beschrieben, gibt der Benutzer dafür Feldstärke und Länge des Fehlerlichtbogens ein. Beide Eingabeparameter werden für die im Oberskript gespeicherten

Ausschalt Szenarien „Ausschalten\_Fehlerlichtbogen\_ohne\_Erde“ und „Ausschalten\_Fehlerlichtbogen\_mit\_Erde“ benötigt. Tritt ein metallischer Kurzschluss auf, wird das Fehlerlichtbogenmodell automatisch deaktiviert.

Beim Anschluss des dreiphasigen Leistungsschaltermodells ist unbedingt darauf zu achten, dass die „Klemmleiste unter SS 2“ mit der Generatorseite verbunden wird und die „Sammelschiene 1“ mit dem Übertragungsnetz verbunden wird.

Ist der zu untersuchende Leistungsschalterttyp noch nicht im Berechnungsfall des zu untersuchenden Netzes innerhalb des Oberskripts im Ordner „LS\_Typen“ des Leistungsschaltermodells gespeichert, ist er neu anzulegen. Dafür wird einer der im Ordner „LS\_Typen“ gespeicherten Leistungsschalterttypen im Ordner „LS\_Typen“ kopiert, umbenannt, und die Parameter des neuen Leistungsschalterttyps (siehe Abbildung 31) werden in die kopierte Matrix eingetragen. Die Matrix mit den Parametern des neu angelegten Leistungsschalterttyps erhält als Namen die Nummer des neuen Leistungsschalterttyps.

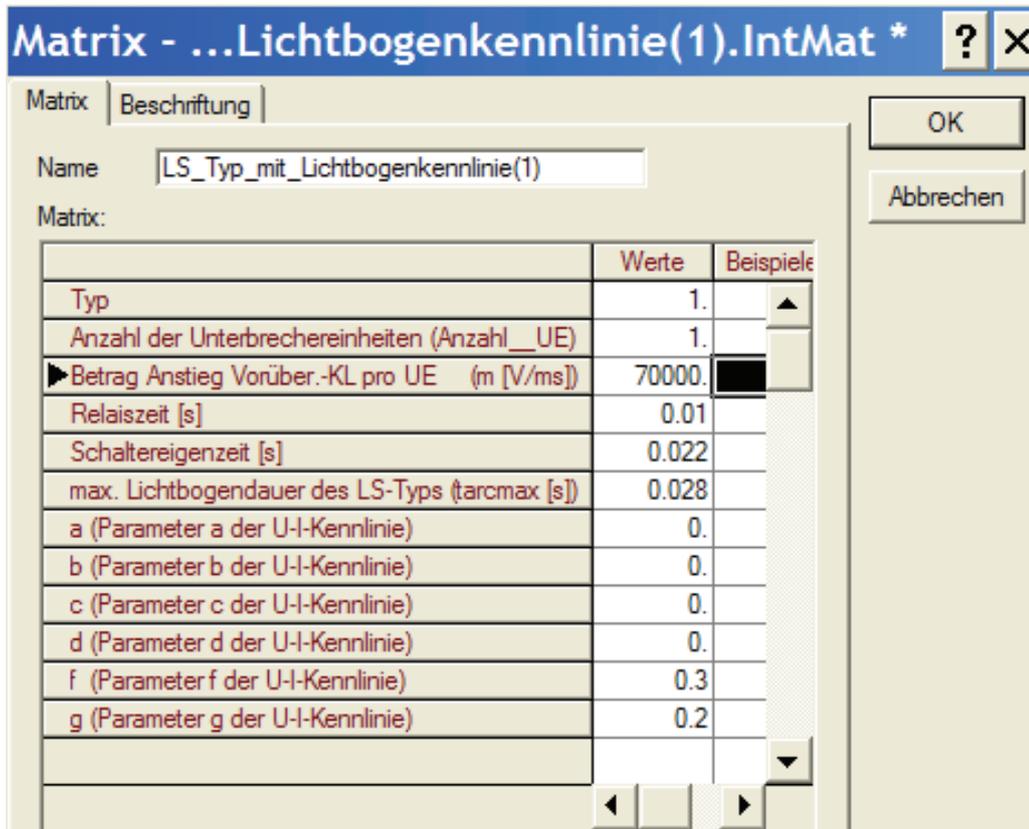


Abbildung 31: Eingabeparameter eines neuen Leistungsschaltertyps

Mit Hilfe der in Abbildung 31 dargestellten Variablen ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $f$ ,  $g$ ) wird die Lichtbogenkennlinie des zu untersuchenden Leistungsschalters durch folgende Gleichung für eine Unterbrechereinheit nachgebildet.

$$u(i) = a e^{bi} + c e^{di} + f i^g \quad (5.1)$$

Die Lichtbogenkennlinien des gespeicherten Leistungsschaltertyps können mit Hilfe der vereinfachten Gleichung

$$u(i) = a e^{bi} + c e^{di} \quad (5.2)$$

erzeugt werden. Dafür ist für die Variablen ( $f$ ,  $g$ ) Null einzusetzen.

Für die Lichtbogenkennlinien anderer Leistungsschalterttypen sind in der Gleichung (5.1) die Variablen ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ) Null zu setzen.

$$u(i) = f i^g \quad (5.3)$$

Dem neu angelegten Leistungsschaltertyp ist zudem eine Wichtungsfunktion zuzuordnen. Diese ist als Matrix innerhalb des Oberskripts im Ordner „Wichtungsfunktionen“ anzulegen.

Dafür wird jeweils eine der dort gespeicherten Wichtungsfunktionen kopiert, umbenannt und die Werte der neuen Wichtungsfunktion eingetragen. Die Parameter werden erst in PowerFactory übernommen, wenn die Option „Speichern“ gewählt wird.

Um eine neue Wichtungsfunktion einem neuen Leistungsschalter zuzuordnen, wird das Oberskript durch Rechtsklick geöffnet und die Option „Bearbeiten“ ausgewählt. In dem Fenster wird „Skript“ ausgewählt und der Name der neuen Wichtungsfunktion nach dem Kommentar in Kommandozeile 443 aktualisiert.

Durch das Ausführen des Oberskripts wird die neu angelegte Wichtungsfunktion in Matrix „Wichtung“ kopiert. Die Matrix „Wichtung“ befindet sich im Oberskript und darf genau wie die Matrix „LS\_Typ\_mit\_Lichtbogenkennlinie“ nicht gelöscht werden. D.h. PowerFactory kopiert vor jeder Simulation die Parameter des zu untersuchenden Leistungsschaltertyps in eine der beiden Matrizen.

Mit der Matrix „Wichtung“ können zurzeit Wichtungsfunktionen durch die Eingabe von 13 Werten für 13 Zeitpunkte nachgebildet werden. Wenn für die Nachbildung der Wichtungsfunktion eines neuen Leistungsschaltertyps mehr Werte erforderlich sind, dann sind zusätzliche Zeilen in der Matrix „Wichtungsfunktion“ zu erzeugen und diese mit den entsprechenden Werten zu füllen.

Dafür öffnet man „Wichtung“ durch Doppelklick und bewegt den Mauszeiger in die erste Spalte. Abhängig von der Anzahl der zusätzlich benötigten Werte werden die Optionen „Zeilen anhängen“ oder „n Zeilen anhängen“ durch Rechtsklick ausgewählt und die leeren Zeilen mit den passenden Werten gefüllt.

Zu beachten ist, dass die Matrix „Wichtung“ im Oberskript genauso viele Zeilen wie die neu angelegte Matrix „Wichtungsfunktion“ enthält, da alle Werte in die Matrix „Wichtung“ kopiert werden. Ist die Anzahl der Zeilen in „Wichtung“ kleiner, werden die restlichen Werte bei der Nachbildung der Wichtungsfunktion nicht berücksichtigt.

Nach der Eingabe der neuen Wichtungsfunktion und dem Vergleich der Zeilenanzahl muss das Oberskript aktualisiert werden. Das Vorgehen ist durch Kommentare im Oberskript ab Zeile 443 ausführlich erklärt.

Die weitere Dateneingabe erfolgt wie für den Einschaltvorgang in Kapitel 5.3 beschrieben und für den Ausschaltvorgang in Kapitel 5.4 erläutert.

## 5.8 Berücksichtigung der Generatorbetriebszustände

Da der Leistungsschalter Fehler bei jedem Betriebszustand des Generators sicher abschalten soll, sind alle Generatorbetriebszustände zu betrachten. Das gilt sowohl für den übererregten als auch für den untererregten Betriebszustand. Beim übererregten Betrieb des Generators tritt eine erhöhte Polradspannung auf. Der Generator liefert induktive Blindleistung in das Netz. Er verhält sich demnach wie eine Kapazität. [7]

Besonders kritisch ist der untererregte Betrieb des Generators, der das Netz kapazitiv belastet. D.h., der Erregerstrom wird so gewählt, dass die Polradspannung kleiner als die Klemmenspannung  $U_{bN}$  des Generators ist. Im untererregten Betrieb gibt der Generator Wirkleistung in das Netz ab und bezieht Blindleistung. Dabei kann der Anfangswert des Gleichstromgliedes größer als der des Wechselstromgliedes werden, und die gegenüber der Längsachse ungünstigeren Zeitkonstanten sowie Reaktanzen der Querachse des Generators für den zeitlichen Verlauf des Wechselstromgliedes werden wirksam. [14]

Die Eingabe der Generatorarbeitspunkte in PowerFactory ist in Kapitel 5.5 beschrieben. Mit Hilfe dieser Werte und den gespeicherten Parametern des zu untersuchenden Leistungsschalters führt PowerFactory für verschiedene Generatorarbeitspunkte nacheinander automatisch stationäre Berechnungen durch und vergleicht die ermittelte Ausschaltzeit  $t_{arc}$  für jeden Schalterpol des Leistungsschalters mit der für den gewählten Leistungsschalterttyp vorliegenden Gewichtungsfunktion. Die Gewichtungsfunktion  $c(t)$  zeigt in Kombination mit der Lichtbogenkennlinie das Abschaltvermögen des Leistungsschalters und damit auch seine wirksame Lichtbogenspannung an.

Der Faktor 0,1, der in Abbildung 32 dargestellt ist, gibt 10 % des Nennausschaltvermögens an. Das Schaltvermögen setzt sich aus der Strom- und Spannungsbeanspruchung

zusammen. Die Spannungsbeanspruchung ist abhängig von der Steilheit und dem Scheitelwert der transienten Einschwingspannung.

Den Einfluss der Gewichtungsfunktion auf das Unterbrechen von generatornahen Kurzschlussströmen bei verschiedenen Generatorbetriebszuständen zeigen die folgenden zwei Beispiele.

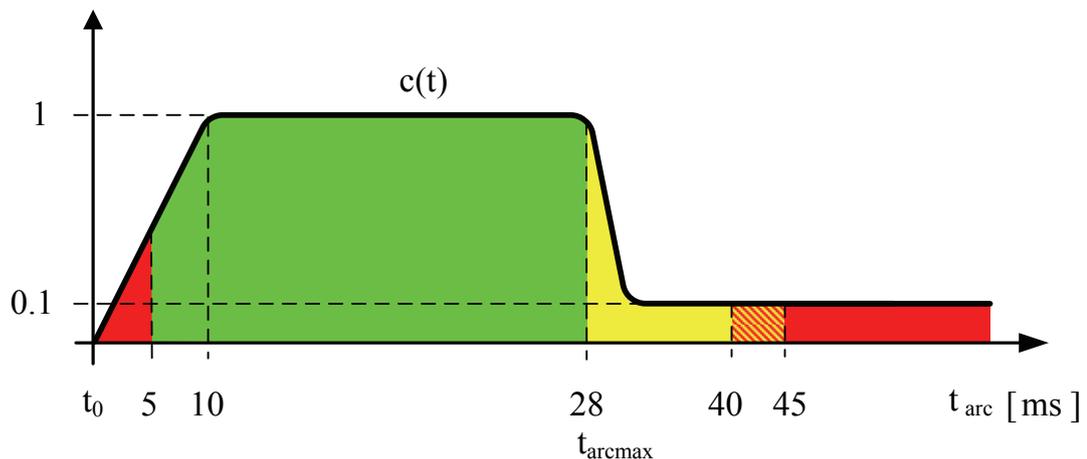


Abbildung 32: Gewichtungsfunktion einer Unterbrechereinheit mit Bewertung des Ausschaltvermögens (Beispiel 1)

In dem in Abbildung 32 dargestellten Beispiel 1 unterbricht der Leistungsschalter den Strom in den ersten fünf Millisekunden nach der Kontakttrennung nicht (roter Bereich). In der Realität kann in dieser Zeitperiode zwar ein Stromnulldurchgang auftreten, aber der Leistungsschalter kann den Strom nicht unterbrechen, da die Kontakte ihre Mindestlöschdistanz noch nicht erreicht haben.

Nach den ersten fünf bis zehn Millisekunden kann der Leistungsschalter den generatornahen Kurzschlussstrom abschalten (grüner Bereich), hat aber sein Abschaltvermögen bei Bemessungskurzschlussausschaltstrom nicht erreicht.

Gelb gibt an, dass der Leistungsschalter unter gewissen Bedingungen abschalten kann. Das gilt beispielsweise, wenn die Ausschaltzeit  $t_{arc}$  kleiner als 40 ms ist und zum Abschaltzeitpunkt ein geringer Momentanwert der Lichtbogenspannung ansteht.

Die gelb-rot schraffierte Fläche im Zeitraum 40 – 45 ms zeigt, dass ein Abschalten abhängig von einem speziellen Generatorarbeitspunkt möglich ist.

Die rot gefärbte Fläche markiert dagegen den Zeitraum, in dem der Leistungsschalter aufgrund mangelnden Abschaltvermögens nicht abschalten kann ( $t_{\text{arc}} < 5 \text{ ms}$ ) und ( $t_{\text{arc}} > 45 \text{ ms}$ ).

Entsprechend der Simulationsergebnisse werden auch die untersuchten Generatorarbeitspunkte im Generatorleistungsdiagramm grün, gelb oder rot dargestellt. Zu beachten ist, das Leistungsschaltermodell färbt jeden Generatorarbeitspunkt rot, bei dem die Stromlöschung erst nach der Kontakttrennung und weiteren 90 ms erfolgt. Die Einstellung 90 ms kann im Leistungsschaltermodell in der Registermappe „Berechnung R\_Lb“ geändert werden.

Mit Hilfe der farblich gekennzeichneten Generatorarbeitspunkte kann der Benutzer Aussagen treffen, bei welchen Generatorbetriebszuständen abgeschaltet werden kann (siehe Abbildung 33).

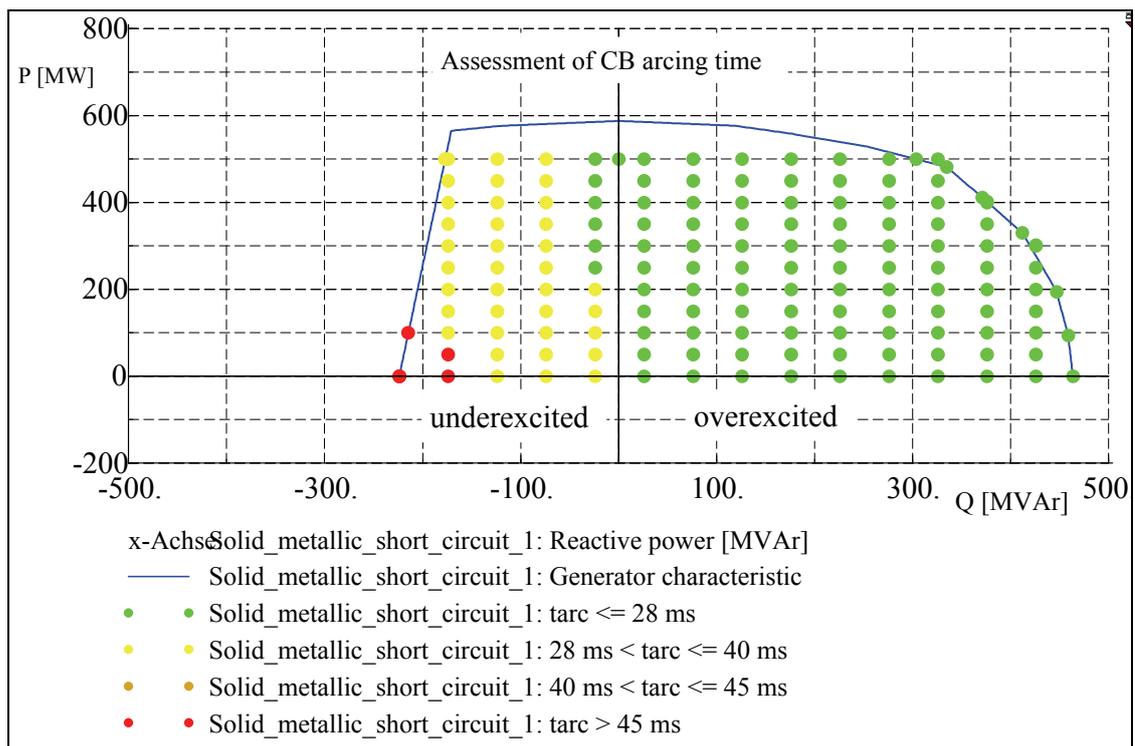


Abbildung 33: Generatorleistungsdiagramm (Beispiel 1)

Beispiel 2: Praktische Versuche haben gezeigt, dass Leistungsschalter mit geeigneter Unterbrechereinheit Ströme aus generatornahen Kurzschlüssen, deren Nulldurchgänge erheblich verzögert sind, auch mit Lichtbogenzeiten  $\geq 40 \text{ ms}$  abschalten können. Im

vorliegenden Beispiel wird davon ausgegangen, dass generatornahe Kurzschlussströme bis zu einer Lichtbogenzeit von 40 ms sicher abgeschaltet werden, und dass im Bereich 40 – 45 ms (gelber Bereich) Ausschaltungen durchaus möglich sind.

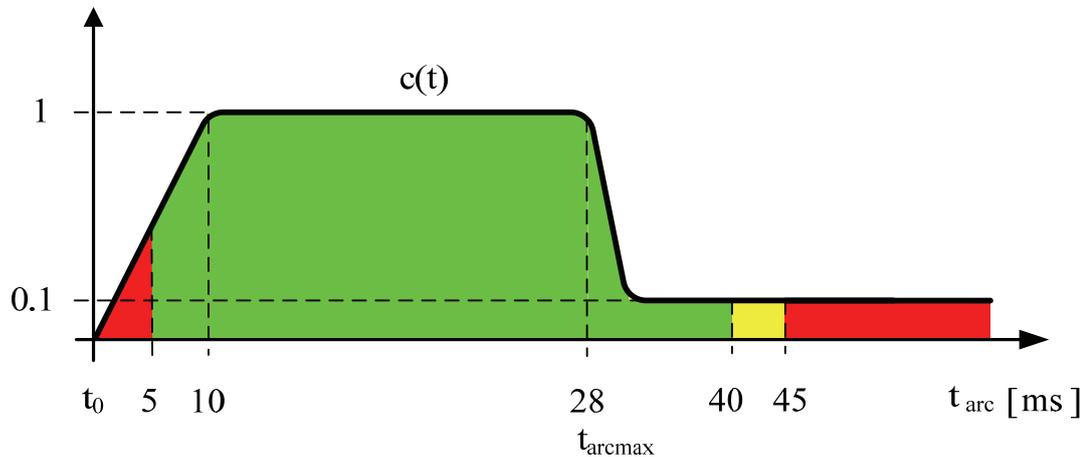


Abbildung 34: Gewichtungsfunktion einer Unterbrechereinheit mit Bewertung des Ausschaltvermögens (Beispiel 2)

Das Ergebnis der Simulation mit dem gleichen Leistungsschalter und den Daten aus Abbildung 34 (Beispiel 2) zeigt die Abbildung 35, wobei die identischen Kreis- und Generatordaten zugrunde gelegt wurden.

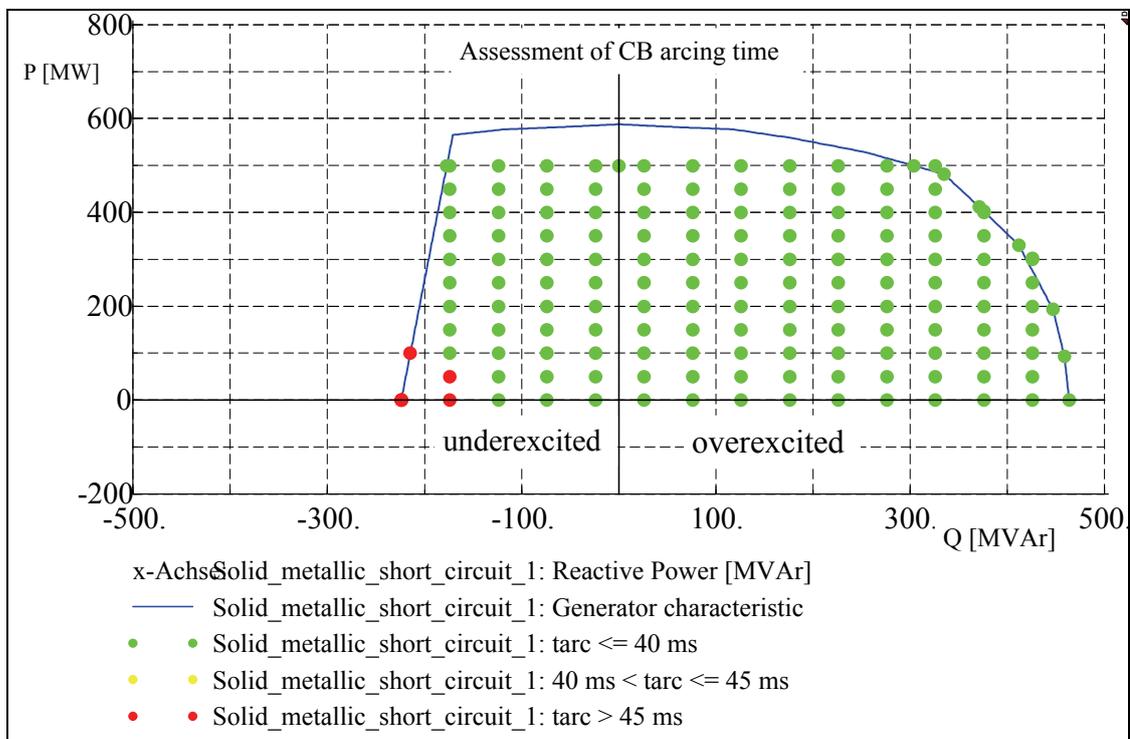


Abbildung 35: Generatorleistungsdiagramm (Beispiel 2)

Wie Abbildung 35 zeigt, wird durch das Beherrschen längerer Lichtbogenzeiten das Schaltvermögen im untererregten Betrieb wesentlich verbessert.

Der Arbeitsbereich des Generators wird durch die Turbinennennleistung (waagrecht zur Abszisse), den zulässigen Polradwinkel, die zulässige Scheinleistung und den zulässigen Erregerstrom begrenzt. Jeder Arbeitspunkt wird durch Dampfzufuhr der Turbine und den Erregerstrom  $I_E$  bestimmt. [7]

Weitere Einflussgrößen sind die Generatordaten, zum Beispiel die Quer- und Längsreaktanzen. Abbildungen 36 und 37 vergleichen das Beherrschen generatornaher Kurzschlüsse im Fall von Generatoren gleicher Nennspannung, aber unterschiedlicher Leistung sowie entsprechend anderen Quer- und Längsreaktanzen.

Die Abbildung 36 (Beispiel 3) stellt die Simulationsergebnisse eines weiteren Beispielnetzes mit einem Generator der Bemessungsscheinleistung 1006 MVA und dem Leistungsfaktor 0,8 dar. Seine Bemessungsscheinleistung ist also wesentlich höher als die des den Beispielen 1 und 2 (Abbildungen 33 und 35) zugrunde liegenden Generators.

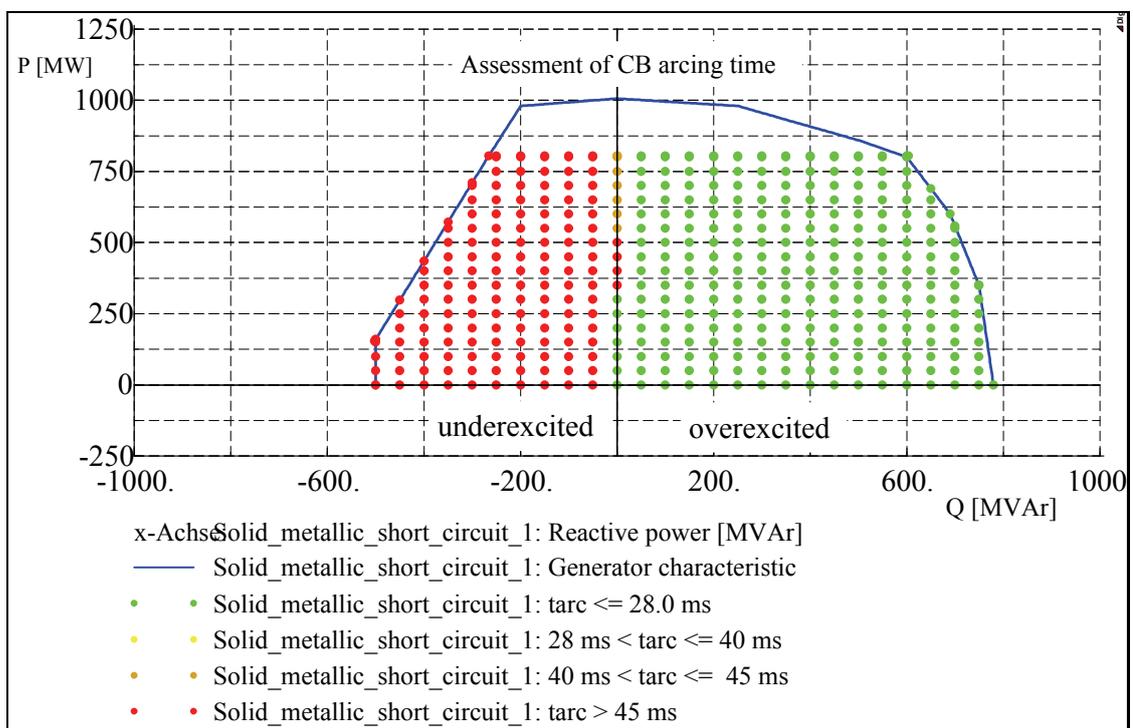


Abbildung 36: Generatorleistungsdiagramm mit 1006-MVA-Generator (Beispiel 3)

Der gesamte untererregte Bereich des Generatorleistungsdiagramms ist rot markiert und weist demnach Lichtbogenzeiten  $> 45$  ms auf.

Die folgende Abbildung 37 (Beispiel 4) wurde mit denselben Netzparametern, aber einem neuen Generatortyp berechnet. Dieser Generator besitzt dieselbe Nennspannung und denselben Leistungsfaktor, aber eine weiter erhöhte Bemessungscheinleistung (1175 MVA).

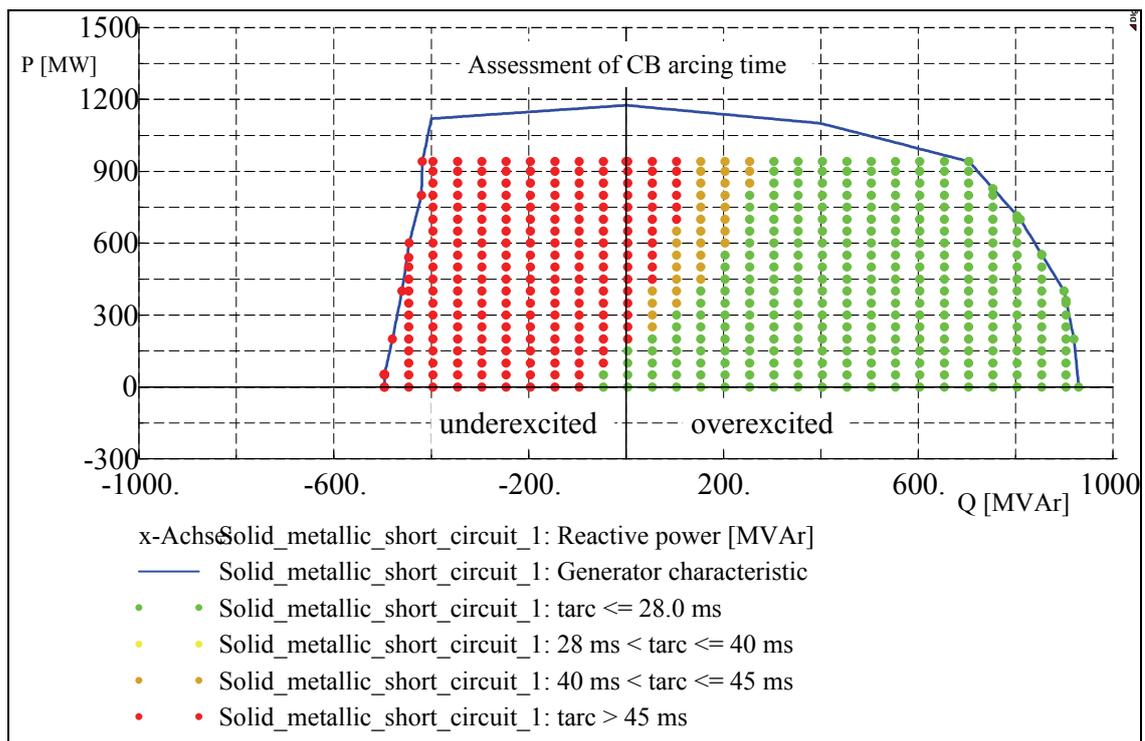


Abbildung 37: Generatorleistungsdiagramm mit 1175-MVA-Generator (Beispiel 4)

Das in Abbildung 37 dargestellte Generatorleistungsdiagramm weist im Gegensatz zu den in Abbildung 36 dargestellten Ergebnissen einen rot markierten Bereich im übererregten Generatorbetriebszustand auf. Ursache dafür ist die im Vergleich zum Generator aus Beispiel 3 höhere Gleichstromzeitkonstante des Generators ( $T_g$ ), wodurch das Gleichstromglied in Beispiel 4 später abklingt und den Zeitpunkt der Stromnulldurchgänge weiter verzögert. Die Gleichstromzeitkonstante des Generators wird wie folgt berechnet:

$$T_g = \frac{X_d''}{\omega_0 \cdot R_a} \quad (5.4)$$

$T_g$  ist von der subtransienten Längsreaktanz des Generators  $X_d''$ , der Kreisfrequenz  $\omega_0$  und dem Ständerwiderstand des Generators  $R_a$  abhängig.

Die Leistungserhöhung im Vergleich zum Generator aus Beispiel 3 verändert die Längsreaktanz und damit die Gleichstromzeitkonstante des Generators.

Im untererregten Betriebszustand ist das Feld der Querachse des Generators besonders stark ausgeprägt und liefert einen Beitrag zum subtransienten Kurzschlussstrom. D.h. der zunehmende Einfluss der subtransienten Generatorquerreaktanz führt zu einer hohen subtransienten Zeitkonstante der Querachse des Generators. Aufgrund der fehlenden Erregerwicklung hat die Querachse keinen Anteil am Dauer Kurzschlussstrom. Der Stromanteil der Querachse klingt daher mit der subtransienten und transienten Zeitkonstante der Querachse ( $T_q''$  und  $T_q'$ ) ab. [6]

Bei untererregtem Betriebszustand werden die resultierenden Zeitkonstanten, mit denen der Kurzschlussstrom abklingt, besonderes durch die Komponenten der Querachse bestimmt. Dadurch entsteht ein Gleichstromglied, das größer als die erste Amplitude des Wechselstromgliedes ist. Durch den geringen Erregerstrom wird das Gleichstromglied eingeschnürt und das vollständig abklingende Querfeld verstärkt die Einschnürung.

Kleine Subtransient- und Transientzeitkonstanten sowie große Synchronreaktanzen verursachen eine schnelle und starke Einschnürung des Wechselstromanteils. [6]

## 5.9 Ausgabe der Werte in PowerFactory

Die Ergebnisse werden in PowerFactory z.B. als Diagramm dargestellt und können exportiert und in einen Bericht eingefügt werden. Dafür wird das Diagramm markiert und die Option „Datei exportieren“ aus dem Hauptmenü ausgewählt. Die Datei kann als Windows-Metadatei oder als Bitmap-Datei gespeichert werden. [11]

Die für die Darstellung der Ergebnisse auszuwählenden Parameter befinden sich im Anhang 1 in den Tabellen 1 und 2 (Parameterauswahl der Grafiken Teil 1 und Teil 2).

Die in einem Diagramm dargestellten Ergebnisse können ebenfalls als ASCII-Text in das Ausgabefenster, die Windows-Zwischenablage, eine Messdatendatei oder in eine Textdatei exportiert werden. Die Kurvendaten können dadurch in eine Exceltabelle eingefügt werden.

Um die Betriebsmitteldaten des untersuchten Netzes anzuzeigen, wird das PowerFactory-Hauptfenster geöffnet und in der obersten Taskleiste die Option „Ausgabe“ ausgewählt. Dazu ist die „Dokumentation Betriebsmitteldaten“ anzuklicken, in der sich die Berichtarten „Auflistung“ oder „ausführlicher Bericht“ auswählen lassen. In der „Auflistung“ erscheinen die wichtigsten Betriebsmitteldaten im Ausgabefenster, wobei für jedes Betriebsmittel eine Zeile verwendet wird. Der ausführliche Bericht enthält alle Betriebsmitteldaten der Elemente, die vom Benutzer ausgewählt werden. Der Bericht kann Typdaten enthalten. Dafür ist „Typdaten in Element ausgeben“ auszuwählen. [11]

Der Speicherort der Ergebnisse aus den Ein- und Ausschalt Szenarien befindet sich im Verzeichnis C:\Temp und wird in Kapitel 5.1 näher erläutert. In C:\Temp werden die Ergebnisse der Ein- und Ausschaltvorgänge des untersuchten Leistungsschaltertyps als Grafiken und die Daten der Generatorleistungsdiagramme, wie Ausschaltzeit des Leistungsschalters bei der jeweiligen Wirk- und Blindleistung des Generatorarbeitspunktes automatisch als Textdatei gespeichert. Das wird in Abbildung 38 am Beispiel der roten Generatorarbeitspunkte für das Ausschalt Szenario 4 dargestellt.

Red	Arc_short_circuit_involving_ground_4	Arc_short_circuit_involving_ground_4	Arc_short_circuit_involving_ground_4	Arc_short_circuit_involving_ground_4	Arc_shor
Index	ActReactPower	ActPower	tarc		
0.000000	0.000000	940.000000	0.090001		
1.000000	-418.000000	940.000000	0.090008		
2.000000	-496.000000	52.000000	0.090017		
3.000000	-496.000000	0.000000	0.090017		

Abbildung 38: Daten der roten Generatorarbeitspunkte im Szenario 4

Die Abbildung 38 zeigt in der obersten Zeile durch „Red“, dass es sich in dieser Textdatei um rote Generatorarbeitspunkte handelt. Daneben steht das dazugehörige Ausschalt Szenario. Die zweite Zeile enthält den Index, der die Nummer des Generatorarbeitspunktes angibt. Daneben steht „ActReactPower“, die Blindleistung des Generatorarbeitspunktes und „ActPower“, die Wirkleistung. Rechts neben der Wirkleistung steht tarc, die Ausschaltzeit des Lichtbogens für diesen Generatorarbeitspunkt. Für jedes Ausschalt Szenario werden die Textdateien der grünen, gelben und roten Generatorarbeitspunkte automatisch gespeichert. Alle Textdateien können in Excel geöffnet werden, um die Ergebnisse in Tabellen aufzulisten.

Die Generatorleistungsdiagramme werden für jedes Ausschalt Szenario in den Mappen „Generatorleistungsdiagramm 1“, „Generatorleistungsdiagramm 2“, Generatorleistungs-

diagramm 3“ und „Generatorleistungsdiagramm 4“ nach Abschluss der Simulation dargestellt. Wenn der Benutzer die in der obersten Taskleiste die Schaltfläche „Datei“ und die Option „Exportieren“ auswählt, kann das jeweilige Generatorleistungsdiagramm z.B. als Windows-Metadatei oder Windows-Bitmap exportiert werden.

Die gesamte Textausgabe von PowerFactory wird in das Ausgabefenster geschrieben. Das umfasst alle Fehlermeldungen und Warnungen, Befehlsanzeigen, die Betriebsmitteldokumentation und Berechnungsergebnisse. Das Ausgabefenster befindet sich am unteren Bildschirmrand des PowerFactory-Hauptfensters. An der rechten Seite des Ausgabefensters sind Symbole, mit denen der Inhalt des Ausgabefensters kopiert, gespeichert, gedruckt oder gelöscht werden kann. [11]

Das Ausgabefenster zeigt nicht nur die Nachrichten und Ergebnisse an, sondern unterstützt den Benutzer z.B. bei der Suche nach möglichen Fehlern im Projekt. Jede Zeile des Ausgabefensters, die einen kompletten Verzeichnis- und Objektnamen enthält, kann durch Doppelklick mit der linken Maustaste geöffnet werden. Es erscheint der Bearbeitungsdialog des Betriebsmittels, in dem der Fehler korrigiert werden kann. [11]

## **6 Beanspruchung des Leistungsschalters beim Ausschalten von Strömen mit ausbleibenden Nulldurchgängen**

### **6.1 Einflussfaktoren für das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen**

Der Fehlerort hat entscheidenden Einfluss auf das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen. Ausbleibende Stromnulldurchgänge treten lediglich beim generatornahen Kurzschluss auf.

Beim generatornahen Kurzschluss wird der vom Hochspannungs-Leistungsschalter Q1 zu unterbrechende Strom nur aus der Verbindung zum Kraftwerk gespeist (Fehler 1 in Abbildung 1). Der generatornahe Kurzschlussstrom besteht aus einem abklingenden Wechselstromglied und einem Gleichstromglied, dessen Höhe, in Relation zum Wechselstromglied, vom Zeitpunkt des Kurzschlusseintritts abhängt (siehe Kapitel 2.2 und 2.4).

Ein Gleichstromglied tritt bei einem generatornahen Kurzschluss immer auf, wenn der Kurzschluss nicht im Spannungsmaximum erfolgt. Den größten Wert hat das Gleichstromglied, wenn der Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang eintritt. Das heißt, der Anfangswert des Gleichstromgliedes in einer Phase wird vom Momentanwert der Spannung an der Kurzschlussstelle unmittelbar vor Kurzschlusseintritt bestimmt.

Die Höhe des Gleichstromgliedes ist außerdem abhängig vom Zeitpunkt des Vorüberschlages, wenn der Leistungsschalter auf einen bestehenden Kurzschluss einschaltet. Der Zeitpunkt des Vorüberschlages hängt von der Steilheit der Vorüberschlagskennlinie im Verhältnis zum Verlauf der Spannungshalbwellen unmittelbar vor Spannungsnulldurchgang ab (siehe Kapitel 3.2).

Schneidet die Vorüberschlagskennlinie den absoluten Verlauf der Spannungshalbwellen, so tritt ein Vorüberschlag auf. Ein Vorüberschlag senkt daher die Wahrscheinlichkeit des Auftretens fehlender Stromnulldurchgänge bzw. deren Dauer, weil durch den Vor-

überschlag kein Einschalten im Spannungsnulldurchgang erfolgt. Bei mehrfach unterbrechenden Schaltern ist die resultierende Steilheit der Vorüberschlagskennlinie größer als bei einfachunterbrechenden, so dass mit größeren Gleichstromgliedern bzw. länger ausbleibenden Stromnulldurchgängen zu rechnen ist.

Das Gleichstromglied klingt mit der e-Funktion  $e^{-t/\tau}$  ab. Die Abklingzeitkonstante

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (6.1)$$

des Kurzschlusskreises ist bestimmt durch die Reaktanz des Generators und des Blocktransformators sowie durch deren ohmsche Widerstände einschließlich der ohmschen Widerstände der Verbindung zwischen Blocktransformator und dem den generatornahen Kurzschluss unterbrechenden Leistungsschalter Q1 (siehe Abbildung 1). Generatoren und Transformatoren neuerer Bauart haben durch ihre hohe Güte einen kleineren ohmschen Innenwiderstand als Geräte älterer Bauart. Die Wahrscheinlichkeit des Ausbleibens von Stromnulldurchgängen ist daher gestiegen.

Damit wächst auch der Einfluss von Leitungsverbindungen mit ihrem ohmschen Widerstand auf den Verlauf des Gleichstromgliedes. Der Lichtbogenwiderstand am Kurzschlussort ist eine weitere Einflussgröße. Wenn am Kurzschlussort zum Kurzschlusszeitpunkt statt eines metallischen Kurzschlusses ein Kurzschluss mit Lichtbogen auftritt, z.B. als Überschlag über einen Isolator, verkürzt der Lichtbogenwiderstand die Dauer von ausbleibenden Stromnulldurchgängen ebenfalls.

Ein Einflussfaktor für das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen ist die Transformatorstufung. Durch die Transformatorstufung verändert sich die bezogene Bemessungskurzschlussspannung  $u_{kr}$  des Transformators. Infolge der Erhöhung der Bemessungsspannung  $U_{rIT}$  an der Oberspannungsseite des Transformators steigt auch die Streu- bzw. Kurzschlussreaktanz. Wie in Gleichung 6.1 dargestellt, besteht eine direkte Proportionalität zwischen der Induktivität und der Lichtbogenzeitkonstanten  $\tau$ .

Durch eine Erhöhung der Streu- bzw. Kurzschlussreaktanz wächst die Lichtbogenzeitkonstante  $\tau$ , das Gleichstromglied klingt langsamer ab, sodass sich die Dauer ausbleibender Stromnulldurchgänge verlängert. Wird die Streu- bzw. Kurzschlussreaktanz durch die Transformatorstufung verringert, so verringert sich die Lichtbogenzeitkon-

stante, das Gleichstromglied klingt schneller ab und die Dauer ausbleibender Stromnulldurchgänge wird kürzer (siehe Kapitel 3.3).

Der Lichtbogen in einer Unterbrechereinheit eines Schalters lässt sich durch einen nichtlinearen ohmschen Widerstand darstellen, der als zusätzlicher Widerstand in dem geschalteten Kreis wirkt und damit die Gleichstromzeitkonstante  $\tau = L/R$  des Kurzschlussstromes verringert, während die Wechselstromkomponente kaum beeinflusst wird. [9]

Die Abhängigkeit der Lichtbogenspannung vom Stromfluss wird durch die Lichtbogenkennlinie  $u(i)$  beschrieben, die in Abbildung 11 für eine Unterbrechereinheit eines Hochspannungs-Leistungsschalters dargestellt ist. Der Momentanwert der Lichtbogenspannung ist außer vom Momentanwert des Stromes vom lokalen Gasdruck und der Gestaltung der Unterbrechereinheit, der Brennzeit des Lichtbogens und der variablen Länge des Lichtbogens sowie der Intensität der Löschgassströmung während seiner Brenndauer abhängig. Dieser Zusammenhang wird durch eine Gewichtungsfunktion beschrieben, die in Kapitel 3.1 in Abbildung 12 dargestellt ist.

Der für das Beeinflussen der Gleichstromzeitkonstante wirksame Momentanwert der Lichtbogenspannung einer Unterbrechereinheit wird durch die Multiplikation beider Kennlinien bestimmt, d.h. es gilt [9]:

$$u_{LB}(t,i) = u_{LB}(i)c(t) \tag{6.2}$$

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Höhe des Gleichstromgliedes ist der Betriebszustand des Generators unmittelbar vor Fehlereintritt. Da der Leistungsschalter Fehler bei jedem Betriebszustand des Generators sicher abschalten soll, sind alle Generatorbetriebszustände zu betrachten. Das gilt sowohl für den übererregten als auch für den untererregten Betriebszustand. Beim übererregten Betrieb des Generators tritt eine erhöhte Polradspannung auf. Der Generator liefert induktive Blindleistung in das Netz. Übererregter Betrieb ist der normale Betriebszustand des Generators.

Besonders kritisch ist der untererregte Betrieb des Generators, der außer bei Pumpspeicherkraftwerken, extrem selten auftritt. Dabei wird der Anfangswert des Gleichstromgliedes größer als der des Wechselstromgliedes, und die gegenüber der Längsachse ungünstigeren Zeitkonstanten sowie Reaktanzen der Querachse des Generators für den

zeitlichen Verlauf des Wechselstromgliedes werden wirksam. Mit zunehmender Untererregung werden die Transientenspannung und Polradspannung kleiner. Das verursacht kleinere Transient- und Dauerkurzschlussströme und damit eine Unterdrückung der Nulldurchgänge. [14]

Der höchste Wert des Gleichstromgliedes tritt auf, wenn ein nichtsimultaner Kurzschluss eintritt, d.h. ein zweipoliger Kurzschluss tritt auf, der nach wenigen Millisekunden zum dreipoligen Kurzschluss wird. In dem Fall kann das Gleichstromglied bis 36% größer als das Wechselstromglied.

Der erhöhende Einfluss der Spannungsschnellregelung des Generators auf den Wechselstromanteil begünstigt ein schnelleres Entstehen von Stromnulldurchgängen. Die Wirkung der Spannungsregelung hängt vom Betriebszustand des Generators unmittelbar vor Kurzschlusseintritt ab. Durch die dominierende Verzögerung der Erregerwicklung wird der Einfluss der Spannungsregelung erst nach einigen Perioden wirksam.

Unter Berücksichtigung sämtlicher oben genannter Einflussfaktoren wird die Abschaltzeit des Leistungsschalters für verschiedene Szenarien berechnet und mit dem Abschaltvermögen des Leistungsschalters verglichen.

Der Leistungsschalter kann den Strom in den ersten fünf Millisekunden nach der Kontakttrennung nicht unterbrechen. In der Realität kann in dieser Zeitperiode zwar ein Stromnulldurchgang auftreten, aber der Leistungsschalter kann den Strom nicht unterbrechen, da die Kontakte ihre Mindestlöschdistanz noch nicht erreicht haben.

Nach den ersten fünf Millisekunden kann der Leistungsschalter den Strom abschalten. Das Schaltvermögen ist in den Abbildungen 32 und 34 dargestellt: Grün bedeutet, der Leistungsschalter schaltet generatornahe Kurzschlussströme ab.

Gelb gibt an, dass der Leistungsschalter unter gewissen Bedingungen abschalten kann.

Rot gefärbte Generatorarbeitspunkte markieren dagegen Generatorbetriebszustände, in denen der Leistungsschalter aufgrund mangelnden Abschaltvermögens nicht abschaltet.

Entsprechend der Simulationsergebnisse werden auch die untersuchten Generatorarbeitspunkte im Generatorleistungsdiagramm grün, gelb oder rot dargestellt. Mit Hilfe der farblich gekennzeichneten Generatorarbeitspunkte kann der Benutzer Aussagen tref-

fen, unter welchen Arbeitsbedingungen ein Abschalten mit dem gegebenen Leistungsschalter sicher möglich ist (siehe Abbildung 33 und 35).

## 6.2 Wahrscheinlichkeit des Ausbleibens von Stromnulldurchgängen

Um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von ausbleibenden Stromnulldurchgängen bestimmen zu können, ist es erforderlich, die Möglichkeit des Auftretens der die ausbleibenden Stromnulldurchgänge beeinflussenden Faktoren zu ermitteln. Zu den Einflussfaktoren zählen der Fehlerort, der Lichtbogenwiderstand am Fehlerort, die Generatordaten, der Generatorbetriebszustand unmittelbar vor Fehlereintritt, der Zeitpunkt des Fehlereintritts in Bezug auf den betriebsfrequenten Spannungsverlauf, die Transformatorstufung, der Zeitpunkt der Kontakttrennung im Schalter und die Steilheit der Vorüberschlagskennlinie des Leistungsschalters.

Der Vorüberschlag beim Einschalten des Leistungsschalters beeinflusst die Höhe des Gleichstromgliedes und damit die Wahrscheinlichkeit des Auftretens fehlender Stromnulldurchgänge (siehe Kapitel 3.2). Abhängig von der Netzfrequenz und dem Scheitelwert der Phasenspannung kann die Steilheit der Phasen- und der verketteten Spannung vor dem Spannungsnulldurchgang ermittelt und mit dem Anstieg der Vorüberschlagskennlinie verglichen werden. Die Steilheit der Vorüberschlagskennlinie beträgt z.B. 100 kV/ms pro Unterbrechereinheit (siehe Kapitel 3.2).

Beispiel 1:

Für einen Leistungsschalterttyp mit zwei Unterbrechereinheiten in Reihe pro Pol beträgt der Anstieg der Vorüberschlagskennlinie 200 kV/ms und ist damit größer als der für ein 420-kV-Netz (50 Hz) in Gleichung 6.5 berechnete Wert 107,7 kV/ms der Steilheit der Phasenspannung vor dem Spannungsnulldurchgang. D.h. die Kontaktberührung kann im Spannungsnulldurchgang erfolgen.

$$\frac{du}{dt} = \frac{U_r}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (6.3)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{420 \cdot 10^3 V}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{s} = 1077 \cdot 10^5 \frac{V}{s} = 107,7 \frac{kV}{ms} \quad (6.4)$$

Für die Bemessungsspannung 550 kV und die Netzfrequenz 60 Hz ergibt sich folgende Spannungsänderung:

$$\frac{du}{dt} = \frac{550 \cdot 10^3 V}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{60}{s} = 1692,97 \cdot 10^5 \frac{V}{s} = 169,30 \frac{kV}{ms} \quad (6.5)$$

Da der Anstieg der Vorüberschlagskennlinie eines Leistungsschalters mit zwei oder mehr Unterbrechereinheiten steiler als 169,30 kV/ms ist, kann auch im 550 kV/60 Hz-Netz die Kontaktberührung im Spannungsnulldurchgang der Phasenspannung  $U_{L3}$  erfolgen. Die mechanische Streuung zwischen den Schalterpolen ist ebenfalls von entscheidender Bedeutung für die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des Ausbleibens von Nulldurchgängen.

Beispiel 2:

In der folgenden Abbildung 37 tritt ein zweipoliger Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang von  $U_{L1L2}$  auf. 5 ms später ist der Spannungsnulldurchgang der Phasenspannung L3.

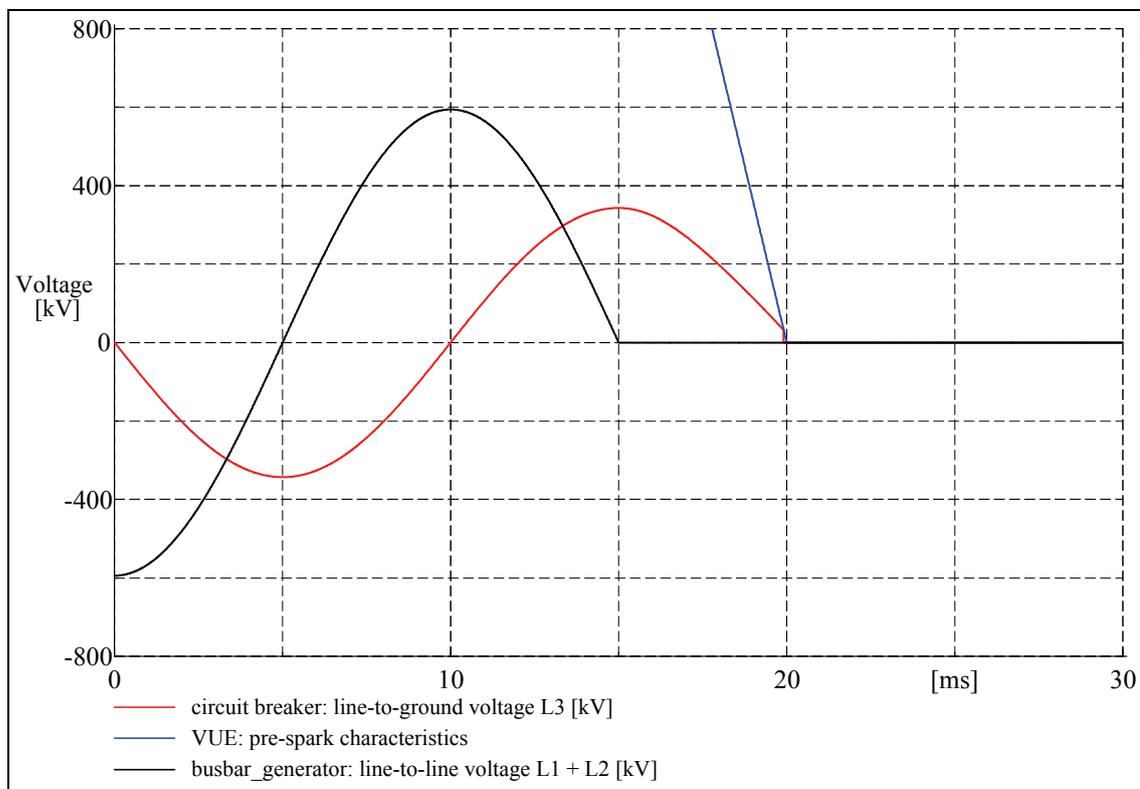


Abbildung 39: Einflussfaktor mechanische Streuung

Theoretisch kann die mechanische Streuung der Schalterpole untereinander 5 ms betragen. In der Regel beträgt die mechanische Streuung beim Einschalten maximal 3 ms. Daher ist der Anstieg der Vorüberschlagskennlinie des Leistungsschalters mit zwei Unterbrechereinheiten steiler als der Anstieg der Phasenspannung, aber aufgrund der zu geringen mechanischen Streuung ( $< 1/4$  Periode) kann die Kontaktberührung für den untersuchten Leistungsschalterttyp nicht im Spannungsnulldurchgang der Phasenspannung  $U_{L3}$  erfolgen.

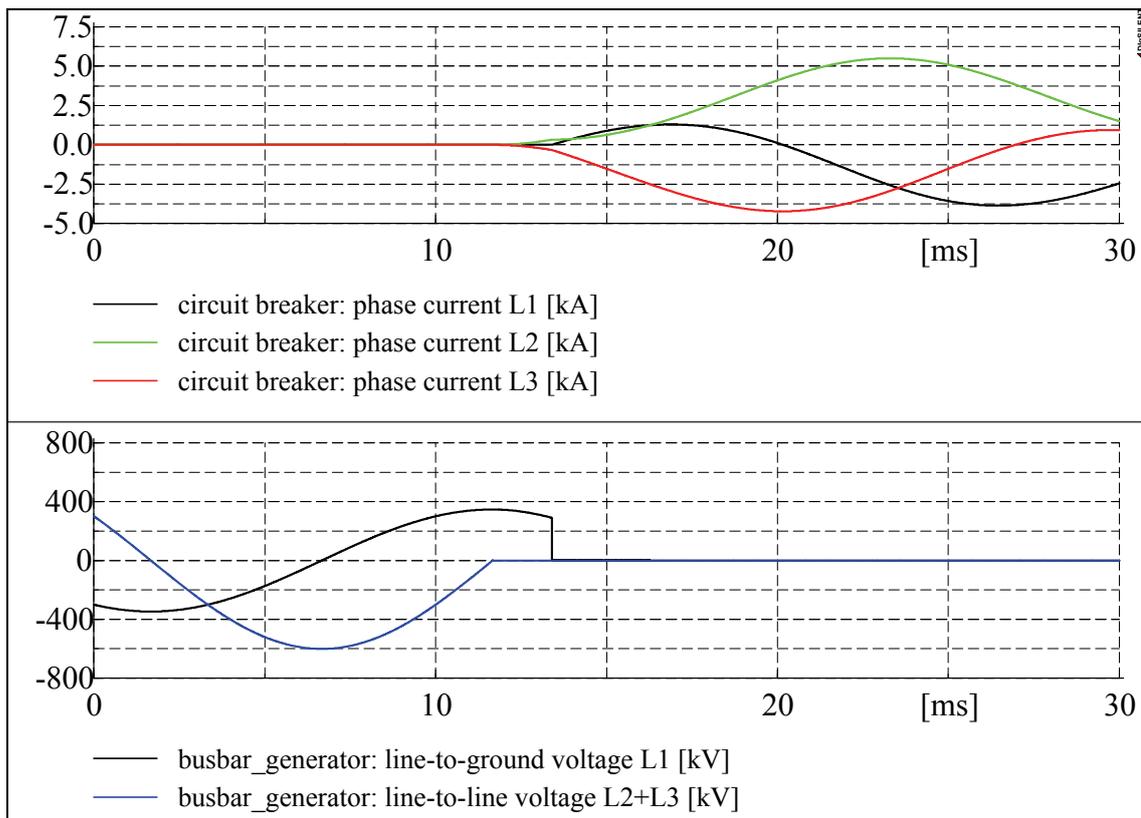
Beispiel 3:

Um einen zweipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung einzuleiten, müssen zwei Phasen eines dreiphasigen Leistungsschalters durchzünden. Im Fall eines 550-kV-Leistungsschalters mit zwei Unterbrechereinheiten pro Pol liegen damit 2 + 2 Schaltstrecken in Reihe. Die resultierende Steilheit der Vorüberschlagskennlinie beträgt also 400 kV/ms.

Die Steilheit der verketteten Spannung im 550 kV/60 Hz-Netz beträgt unmittelbar vor dem Spannungsnulldurchgang 293 kV/ms. Es ist also ein Stromflussbeginn im Spannungsnulldurchgang der Leiter-Leiterspannung L1-L2 sowie im Nulldurchgang der Leiterspannung L3 möglich, sofern beim Einschalten der Schalterpol L3 gegenüber L1-L2 um 4,33 ms verzögert ist.

In der Praxis ist beim Einschalten die Zeitdifferenz zwischen den Polen  $\leq 3$  ms. Das bedeutet beim Übergang vom zweipoligen zum dreipoligen Kurzschluss:

Entweder beginnt der zweipolige Stromfluss im Spannungsnulldurchgang der Phasen L2-L3, dann liegt der Beginn des Stromflusses in L1 nahe dem Scheitelwert der Spannung L1 und das maximale Gleichstromglied hat den Wert 47,4 % (siehe Abbildung 40).



*Abbildung 40: Zweipoliger Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang von  $U_{L2L3}$  und Übergang zum dreipoligen Kurzschluss beim Vorüberschlag in L1*

Oder, wenn der Stromfluss in L1 im Nulldurchgang der Spannung L1 einsetzt, haben L2-L3 bei einem endlichen Spannungswert nach dem Nulldurchgang der Leiter-Leiterspannung durchgezündet. Das maximale Gleichstromglied beträgt in diesem Fall 100 % (siehe Abbildung 41).

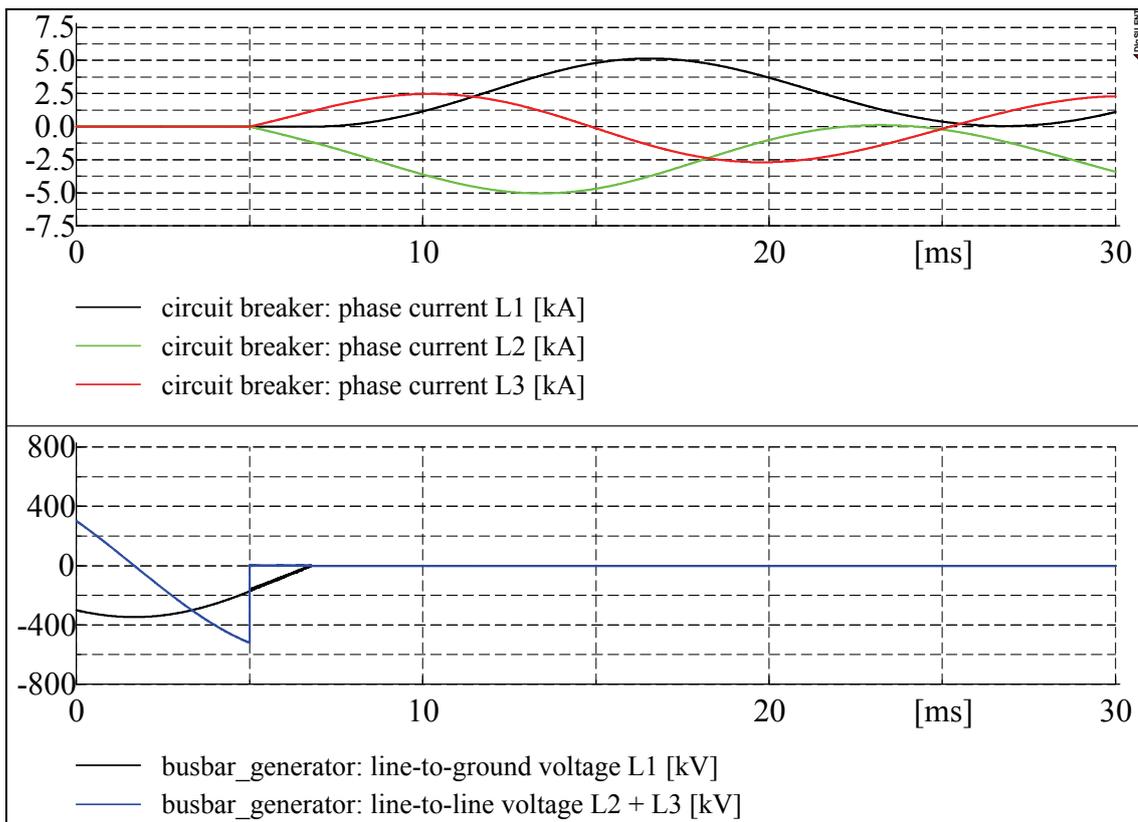


Abbildung 41: Zweipoliger Kurzschluss bei endlicher Spannung in L2-L3 und Übergang zum dreipoligen Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang von  $U_{L1}$

Bei kürzerer Zeitdifferenz als 3 ms zwischen den einschaltenden Schalterpolen wird das maximale Gleichstromglied noch kleiner.

### 6.3 Möglichkeit des Abschaltens

Durch den nach der Kontakttrennung des Leistungsschalters auftretenden Lichtbogenwiderstand  $R_{LB}$  und die dadurch erzwungene Verringerung der Gleichstromzeitkonstante  $\tau$  zu  $\tau'$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$\tau' = \frac{L}{R + R_{LB}} \tag{6.6}$$

klingt das Gleichstromglied nach der Kontakttrennung schneller ab. Stromnulldurchgänge treten demzufolge früher auf als ohne den Einfluss des Lichtbogenwiderstandes.

Der Leistungsschalter kann dadurch eine Möglichkeit bekommen, den generatornahen Kurzschlussstrom zu unterbrechen, während er noch ein entsprechendes Lichtbogen-Lösch-Vermögen hat. Dieser Zeitbereich ist in den Abbildungen 32 und 34 grün bzw. gelb markiert.

Neben dem Lichtbogenwiderstand können auch andere zusätzliche Widerstände zu einem schnelleren Abklingen der Gleichstromkomponente führen. Ein zusätzlicher Widerstand kann auftreten, wenn z.B. statt einem metallischen Kurzschluss ein Kurzschluss mit Lichtbogen auftritt. Ein Beispiel ist der Überschlag über einen Freileitungsisolator. Dieser zusätzliche Fehlerlichtbogenwiderstand reduziert ebenfalls die Gleichstromzeitkonstante bei Fehlereintritt. [4]

#### **6.4 Abschaltvermögen bei Lichtbogenzeiten größer als $t_{arcmax}$**

Wird die maximale Lichtbogenzeit  $t_{arcmax}$  überschritten und die Gewichtungsfunktion  $< 1$ , kann der Leistungsschalter dennoch in der Lage sein, generatornahe Kurzschlussströme abzuschalten.

Beim generatornahen Kurzschluss, also bei Strömen von 2 bis 6 kA, ist der Strom, ebenso wie bei einem Kurzschluss im Netz, annähernd rein induktiv ( $\cos \varphi \leq 0,1$ ). Bei  $\cos \varphi = 0$  bedeutet das, dass die treibende Spannung im Nulldurchgang des Wechselstromgliedes ihren Scheitelwert hat. Der Spannungsnulldurchgang liegt im Zeitpunkt des Scheitelwertes des Wechselstromgliedes.

Ist das Gleichstromglied nur wenig kleiner als der Scheitelwert des Wechselstromgliedes bei entgegengesetzter Polarität, so wird die Nulllinie durch den resultierenden Gesamtstrom im Bereich des Scheitelwertes des Wechselstromgliedes berührt oder knapp geschnitten. In diesem Nulldurchgang des resultierenden Stromes kann der Leistungsschalter unterbrechen.

Die betriebsfrequente treibende Phasenspannung hat zu diesem Zeitpunkt ihren Nulldurchgang. Sie steigt nach der Stromunterbrechung im 420 kV/50-Hz-Netz mit 107,7 kV/ms bzw. im 550 kV/60-Hz-Netz mit 169,3 kV/ms an.

Bei einem Schalter mit zwei Unterbrechereinheiten je Pol und einer Spannungsaufteilung von 52/48 % auf die beiden Unterbrechereinheiten bedeutet dies einen Spannungsgradienten in der höher beanspruchten Unterbrechereinheit von

$$0,52 \cdot 107,7 \text{ kV/ms} = 56 \text{ kV/ms} = 0,056 \text{ kV/\mu s} \quad (6.7)$$

bzw.

$$0,52 \cdot 169,3 \text{ kV/ms} = 88,04 \text{ kV/ms} = 0,088 \text{ kV/\mu s} \quad (6.8)$$

Im Vergleich dazu muss im Fall eines im Netz auftretenden Klemmenkurzschlusses der Schalter nach Unterbrechen seines Bemessungs-Kurzschlussstromes eine Spannungsteilheit von  $2 \text{ kV/\mu s}$  mit einem Scheitelwert von  $624 \text{ kV}$  im  $420 \text{ kV}$ -Netz und  $817 \text{ kV}$  im  $550 \text{ kV}$ -Netz beherrschen. [16]

Wird der Strom im Scheitelwert des Wechselstromgliedes unterbrochen und der Einfluss der Resistanzen der im zu untersuchenden Netz vorhandenen Betriebsmittel vernachlässigt, so dass  $\cos \varphi = 0$  gilt; so tritt keine Einschwingspannung auf (siehe Abbildung 42).

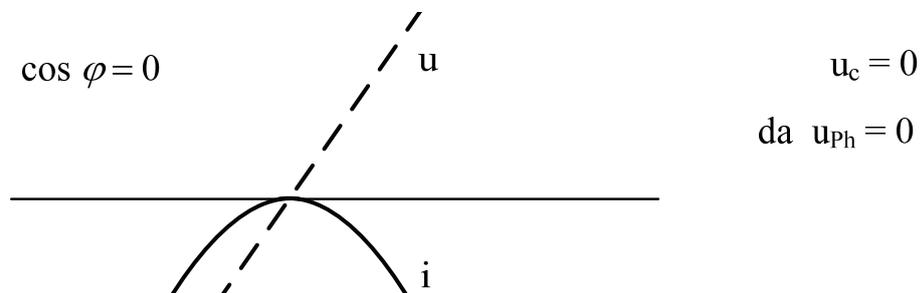


Abbildung 42: Stromunterbrechung im Scheitelwert des Wechselstromgliedes ( $\cos \varphi = 0$ )

Zum Zeitpunkt der Stromunterbrechung im Scheitelwert des Wechselstromgliedes ist die Phasenspannung  $u_{ph} = 0$ . Daher ist der Scheitelwert der transienten Einschwingspannung  $u_c = 0$ . Da die im zu untersuchenden Netz vorhandenen Betriebsmittel Resistanzen haben, ist dies ein hypothetischer Fall, der nur zur Erläuterung der Vorgänge dient.

Durch die ohmschen Widerstände des Generators, des Transformators, einer eventuell vorhandenen Freileitung und des Lichtbogens verschiebt sich der Phasenwinkel auf unter  $90^\circ$ . Dadurch tritt eine relativ geringe Einschwingspannung auf (siehe Abbildung 43).

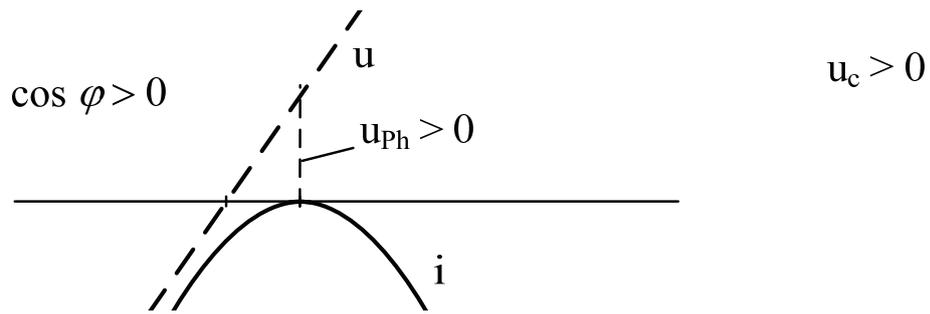


Abbildung 43: Stromunterbrechung im Scheitelwert des Wechselstromgliedes ( $\cos \varphi > 0$ )

Die Höhe der transienten Einschwingspannung und damit die Höhe des Scheitelwertes der Einschwingspannung  $u_c$  sind vom Zeitpunkt der Stromunterbrechung abhängig, wenn der Strom vor dem Scheitelwert des Wechselstromgliedes unterbrochen wird (siehe Abbildung 44).

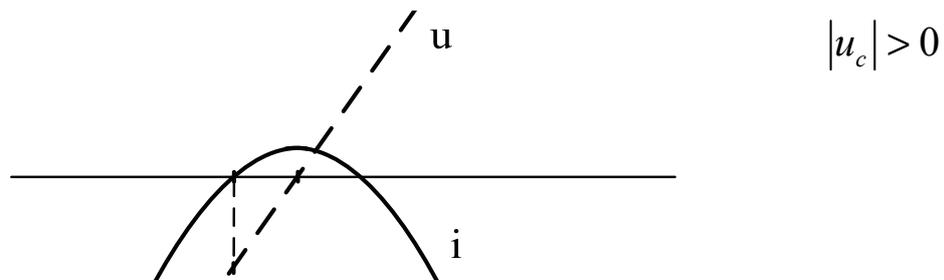


Abbildung 44: Stromunterbrechung vor dem Scheitelwert des Wechselstromgliedes

Wird der Strom vor dem Scheitelwert des Wechselstromgliedes unterbrochen, ist der Betrag des Scheitelwertes der Einschwingspannung  $u_c$  größer Null. Es tritt eine transiente Einschwingspannung auf.

Im Fall eines generatornahen Kurzschlusses hat die Wechselstromkomponente des Kurzschlussstromes zum Beispiel bei einer Generatornennleistung von 676 MW einen Effektivwert von 46,4 kA bei 27 kV bzw. 3,0 kA bei 420 kV. Der zu unterbrechende Strom liegt in diesem Fall bei ca. 10% und die Steilheit der nach der Unterbrechung wiederkehrenden Spannung bei  $< 10\%$  der bei einem Klemmenkurzschluss auftretenden Beanspruchung. Das heißt, für die Abschätzung des Abschaltvermögens empfiehlt es sich, Strom- und Spannungsanstieg ca. 1 ms vor Erreichen des Scheitelwertes des Wechselstromgliedes zu bestimmen, wenn in der Nähe dieses Scheitelwertes ein Stromnulldurchgang auftritt.

## 7 Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Rechenverfahren entwickelt, mit dessen Hilfe festgestellt werden kann, ob ein gegebener Hochspannungs-Leistungsschalter in einem vorgegebenen Kreis bei anzugebenden Betriebszuständen einen Kurzschluss mit ausbleibenden Stromnulldurchgängen beherrscht.

Zu Beginn der Arbeit wurden die Voraussetzungen für ausbleibende Stromnulldurchgänge für den Fall eines generatornahen Kurzschlusses erläutert. Diese umfassen den Fehlerort, den Zeitpunkt des Kurzschlusseintritts, die Daten und den Betriebszustand des Generators vor Fehlereintritt sowie die Transformatorstufung. Der generatornahe Kurzschlussstrom besteht aus einem abklingenden Wechselstromglied und einem Gleichstromglied, dessen Höhe in Relation zum Wechselstromglied vom Zeitpunkt des Kurzschlusseintritts abhängt.

Beim generatornahen Kurzschluss tritt ein Gleichstromglied außer beim Kurzschlusseintritt im Spannungsmaximum immer auf. Den größten Wert hat das Gleichstromglied, wenn der Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang eintritt.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Höhe des Gleichstromgliedes ist der Betriebszustand des Generators unmittelbar vor Fehlereintritt. Der höchste Wert des Gleichstromgliedes tritt auf, wenn sich der Generator vor dem Fehlereintritt im untererregten Betriebszustand befindet. In dem Fall ist das Feld der Querachse stark ausgeprägt und liefert einen Beitrag zum subtransienten Kurzschlussstrom. D.h. der Einfluss der subtransienten Querreaktanz des Generators steigt und die resultierenden Zeitkonstanten, die sich aus Zeitkonstanten der Längs- und Querachse zusammensetzen, werden vor allem durch die Querachse bestimmt.

Dabei wird der Anfangswert des Gleichstromgliedes größer als der des Wechselstromgliedes. Durch den kleinen Erregerstrom wird der Kurzschlussstrom stark eingeschnürt. Die Einschnürung wird durch das vollständig abklingende Querfeld verstärkt. Klingt das Gleichstromglied langsamer ab als das Wechselstromglied, so kommt es zu ausbleibenden Stromnulldurchgängen.

Im übererregten Betriebszustand steigt der Einfluss der subtransienten Längsreaktanz des Generators. Die subtransiente Längsreaktanz und der Ankerwiderstand bestimmen die Gleichstromzeitkonstante des Generators und damit die Dauer ausbleibender Stromnulldurchgänge. Die subtransiente Reaktanz der Längsachse ist abhängig von der Bemessungsleistung und der Bemessungsspannung des Generators.

Die geringeren inneren ohmschen Widerstände von Generatoren heutiger Bauweise verursachen ein extrem langsames Abklingen des Gleichstromgliedes – mit Abklingzeitkonstanten von mehreren hundert Millisekunden.

Die Transformatorstufung hat Einfluss auf das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen. Durch die Transformatorstufung verändert sich die relative Bemessungskurzschlussspannung  $u_{kr}$  des Transformators. Wird die Bemessungsspannung  $U_{rIT}$  an der Oberspannungsseite des Transformators erhöht, steigt die Streu- bzw. Kurzschlussreaktanz. Aufgrund der direkten Proportionalität zwischen der Induktivität und der Gleichstromzeitkonstanten  $\tau = L/R$ , erhöht sich die Gleichstromzeitkonstante, das Gleichstromglied klingt langsamer ab und es verlängert sich die Dauer ausbleibender Stromnulldurchgänge.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Dauer ausbleibender Stromnulldurchgänge hat der Lichtbogenwiderstand am Fehlerort. Tritt ein Kurzschluss mit Lichtbogen auf, beschleunigt der Fehlerlichtbogenwiderstand das Abklingen des Gleichstromgliedes, so dass Stromnulldurchgänge früher auftreten.

Der Einfluss des Schaltlichtbogens auf den Verlauf des Gleichstromgliedes und damit auf die ausbleibenden Stromnulldurchgänge wird durch die Lichtbogenkennlinie in Kombination mit einer Gewichtungsfunktion beschrieben. Letztere kennzeichnet die dynamischen Vorgänge während der Stromunterbrechung, wie lokaler Gasdruck, Gestaltung der Unterbrechereinheit, Brennzeit und variablen Länge des Lichtbogens sowie die Intensität der Löschgassströmung.

Der Schaltlichtbogen in einer Unterbrechereinheit eines Schalters wurde durch einen nichtlinearen ohmschen Widerstand dargestellt, der als zusätzlicher Widerstand in dem geschalteten Kreis wirkt und damit die Gleichstromzeitkonstante des Kurzschlussstromes verringert, während die Wechselstromkomponente kaum beeinflusst wird.

Damit der Schalter sein volles Lichtbogen-Löschvermögen erreicht und die nach der Stromunterbrechung auftretende Spannung beherrscht, müssen die Kontakte einen bestimmten Mindestabstand haben. Tritt ein Stromnulldurchgang bei einem kleineren als diesem Mindestabstand auf, besteht nur ein geringeres Ausschaltvermögen. Ebenso verringert sich das Ausschaltvermögen, wenn nach einer gewissen Zeit die Löschgasströmung nachlässt. Versuche haben jedoch gezeigt, dass im Fall generatornaher Kurzschlüsse der Strom mit Lichtbogenzeiten bis zu  $\geq 40$  ms unterbrochen wird. Das Abschalten generatornaher Kurzschlüsse im untererregten Betrieb wird damit erheblich verbessert.

Schaltet der Leistungsschalter auf einen bestehenden Kurzschluss, entsteht ein Vorüberschlag zwischen den sich nähernden Kontakten, sobald die Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke den Momentanwert der anstehenden Spannung unterschreitet. Der Stromkreis wird vor der galvanischen Kontaktberührung über den Lichtbogen geschlossen.

Der Vorüberschlag senkt die Wahrscheinlichkeit des Ausbleibens von fehlenden Stromnulldurchgängen, weil kein Einschalten im Spannungsnulldurchgang erfolgt. Durch den Vorüberschlag wird das maximal auftretende Gleichstromglied geringer als das theoretisch mögliche. Die Dauer ausbleibender Stromnulldurchgänge ist geringer als beim theoretisch möglichen Einschalten im Spannungsnulldurchgang.

Die Entwicklung des Rechenverfahrens, mit dem das Ein- und Ausschaltverhalten eines Leistungsschalters bei ausbleibenden Stromnulldurchgängen simuliert wird, erfolgte in dem Netzberechnungsprogramm PowerFactory der Firma DIgSILENT GmbH. PowerFactory ermöglicht Kurzschlussberechnungen und dreiphasige Simulation von Elektromagnetischen Transienten.

In PowerFactory wurde ein flexibles dreiphasiges Leistungsschaltermmodell in der DIgSILENT-Simulationssprache DSL programmiert. Um die Worst-Case-Szenarien für das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen untersuchen zu können, wurden vier Szenarien in der DIgSILENT-Programmiersprache DPL erstellt. DPL ermöglicht es, nacheinander ablaufende Simulationen zu automatisieren. Mit Hilfe von DPL werden sämtliche Generatorbetriebszustände, die unmittelbar vor Fehlereintritt auftreten, automatisch nacheinander simuliert. Dadurch kann das Ausschaltvermögen des Leistungsschalters

für jeden Generatorbetriebszustand ermittelt und in einem Generatorleistungsdiagramm grafisch dargestellt werden.

Anschließend wurde in der Arbeit die Simulation des Ausschaltvorgangs beschrieben. Das setzt die Eingabe des zu untersuchenden Netzes und die Auswahl des zu untersuchenden Leistungsschalters und die Eingabe der Parameter für den Ein- und Ausschaltvorgang sowie die Eingabe der Generatorarbeitspunkte voraus.

Wurden sämtliche Parameter eingegeben, erfolgt die automatische Berechnung des Einschalt Szenarios, um die Zeit zwischen dem zweipoligen und dem dreipoligen Kurzschluss zu ermitteln. Die anschließenden automatisch berechneten Simulationen des Ausschaltvorgangs umfassen nichtsimultane metallische Kurzschlüsse mit und ohne Erdberührung sowie nichtsimultane Kurzschlüsse mit Fehlerlichtbogen mit und ohne Erdberührung.

Da der Leistungsschalter Fehler bei jedem Betriebszustand des Generators sicher abschalten soll, werden alle Generatorbetriebszustände berechnet. Das gilt sowohl für den übererregten als auch für den untererregten Betriebszustand. Beim übererregten Betrieb des Generators tritt eine erhöhte Polradspannung auf. Der Generator liefert induktive Blindleistung in das Netz.

Mit Hilfe der Parameter des zu untersuchenden Leistungsschalters führt PowerFactory für verschiedene Generatorarbeitspunkte nacheinander automatisch transiente Berechnungen durch und vergleicht die ermittelte Ausschaltzeit  $t_{arc}$  für jeden Schalterpol des Leistungsschalters mit der für den gewählten Leistungsschalterttyp vorliegenden Gewichtungsfunktion. Die Gewichtungsfunktion zeigt das Abschaltvermögen des Leistungsschalters in Abhängigkeit von der Lichtbogenzeit.

Entsprechend der Simulationsergebnisse werden auch die untersuchten Generatorarbeitspunkte im Generatorleistungsdiagramm farblich markiert. Dadurch kann der Benutzer Aussagen treffen, bei welchen Generatorbetriebszuständen ein Abschalten möglich ist.

Außer dem Generatorbetriebszustand, dem Fehlerort und der Verzugszeit beeinflusst die Spannungsregelung des Generators das Abklingverhalten des Kurzschlussstromes. Bei Kurzschlusseintritt registriert die Spannungsregelung, dass die Klemmenspannung abgesunken ist. Zur Stützung der Klemmenspannung wird übererregt und weiter auf den

Kurzschluss gearbeitet. Nach Eintritt des Kurzschlusses wird zunächst nur die Turbinenregelung heruntergefahren. Da die Turbinenregelung sehr langsam ist, ist der Einfluss kaum messbar.

Das gilt nicht für Generatoren mit besonders schneller Regelung, wie z.B. die Stromrichtererregung, falls die Deckenspannung, d.h. der Maximalwert der Erregerspannung über dem 1,6-fachen der Nennerregerspannung liegt. Dann erhöht sich die Spannung bereits während der Verzugszeit und schwächt das Abklingen des Wechselstromgliedes. Dadurch wird die mögliche Dauer des Ausbleibens von Stromnulldurchgängen verringert.

Der Einfluss der Generatorschnellentregung wurde ebenfalls betrachtet. Sie hat keinen Einfluss auf das Gleichstromglied.

Andere zusätzliche Widerstände, wie z.B. ein Fehlerlichtbogenwiderstand bei einem Kurzschluss mit Lichtbogen, können zu einem schnelleren Abklingen der Gleichstromkomponente führen.

Im Anschluss wurden die Beanspruchungen des Leistungsschalters beim Schalten von Strömen mit ausbleibenden Nulldurchgängen betrachtet und die Einflussfaktoren für das Ausbleiben von Stromnulldurchgängen ermittelt. Zudem wird die Wahrscheinlichkeit des Ausbleibens von Stromnulldurchgängen abgeschätzt.

Die Möglichkeit des Abschaltens wurde ebenfalls untersucht. Durch den nach der Kontakttrennung des Leistungsschalters auftretenden Lichtbogenwiderstand und die dadurch erzwungene Verringerung der Gleichstromzeitkonstante klingt das Gleichstromglied nach der Kontakttrennung schneller ab. Stromnulldurchgänge treten daher früher auf als ohne den Einfluss des Schaltlichtbogenwiderstandes. Der Leistungsschalter kann dadurch eine Möglichkeit bekommen, den Strom zu unterbrechen, während er noch ein Lichtbogen-Lösch-Vermögen hat.

Der Leistungsschalter ist in der Lage, bei längeren Lichtbogenzeiten als unter den Bedingungen des Bemessungs-Kurzschluss-Ausschaltstromes abzuschalten. D.h. wird die maximale Lichtbogenzeit  $t_{arcmax}$  überschritten und die Gewichtungsfunktion  $< 1$ , ist der Leistungsschalter dennoch in der Lage, Ströme bei einem generatornahen Kurzschluss abzuschalten. Wird die Nulllinie im Bereich des Scheitelwertes des Wechselstromgliedes berührt oder knapp geschnitten, ist in diesem Nulldurchgang des resultierenden

---

Stromes die Spannungsbeanspruchung geringer und der Leistungsschalter weniger beansprucht.

Die weitere Entwicklung von Hochspannungs-Leistungsschaltern führt jedoch dazu, dass die einzelnen Unterbrechereinheiten für eine höhere Bemessungsspannung ausgelegt werden als dies bisher der Fall ist. Durch die damit verbundene geringere Zahl der Unterbrechereinheiten pro Schalterpol sinkt die Lichtbogenspannung, und es verringert sich der die Gleichstromzeitkonstante verkürzende Einfluss. Diese Tendenz ist bei der Gestaltung der Schaltstrecken zu berücksichtigen.

## 8 Anhang

### 8.1 Formelzeichen, Indizes, Einheiten

Formelzeichen /	Einheit	Erklärung
Index		
$\gamma$	-	Überschwingfaktor
$\delta_0$	°	Anfangs-Außertrittfallphasenwinkel
$\delta$	°	Außertrittfall-Phasenwinkel
$\varphi_E$	s	Zeitpunkt des Vorüberschlags bezogen auf den Spannungsnulldurchgang
$\mu$	-	Faktor zur Ermittlung des Ausschaltwechselstromes
$\Theta_C$	s	Zeitkonstante der Cassie-Gleichung
$\Theta_M$	s	Zeitkonstante der Mayr-Gleichung
$\tau$	s	Lichtbogenzeitkonstante
$\tau_g$	s	Gleichstromzeitkonstante
$\omega_0$	Hz	Kreisfrequenz
$c(t)$	-	Gewichtungsfunktion
$\cos(\varphi)$	°	Leistungsfaktor
$g$	S	Leitfähigkeit des Lichtbogens
$g_C$	S	Leitfähigkeit, die durch die Cassie-Gleichung beschrieben wird
$g_M$	S	Leitfähigkeit, die durch die Mayr-Gleichung beschrieben wird

$I_E$	A	Erregerstrom
$I_k''$	A	Anfangskurzschlusswechselstrom
$I_{aG}$	A	Ausschaltwechselstrom im Generatorzweig
$I_{rG}$	A	Bemessungsstrom des Generators
$i_s$	A	Strom durch den Leistungsschalter
$k_{pp}$	-	erstlöschender Polfaktor
$L1$	-	Phase 1
$L2$	-	Phase 2
$L3$	-	Phase 3
$L_{Err}$	H	Induktivität der Erregerwicklung
$m$	kV/ms	Anstieg der Vorüberschlagskennlinie
$P_0$	kW	stationärer Energieverlust des Lichtbogens
$Q1, Q2, Q3$	-	Leistungsschalter
$R_a$	$\Omega$	Ankerwiderstand des Generators
$R_{Err}$	$\Omega$	Resistanz der Erregerwicklung
$s$	-	bezogene Steilheit
$t_{arc}$	s	Lichtbogendauer
$t_{arcmax}$	s	maximale Lichtbogendauer
$t_s$	s	Vorüberschlagszeitpunkt
$T_g$	s	Gleichstromzeitkonstante des Generators
$T_q''$	s	subtransiente Zeitkonstante der Generatorquerachse
$T_q'$	s	transiente Zeitkonstante der Generatorquerachse
$U_{bN}$	kV	Klemmenspannung des Generators

---

$u_C$	kV	konstante Lichtbogenspannung (Parameter der Cassie-Gleichung)
$u_c$	kV	Scheitelwert der Einschwingspannung
$u_{kr}$	%	bezogene Bemessungs-Kurzschlussspannung
$u_{LB}(t,i)$	kV	Lichtbogenspannung
$\hat{u}$	kV	Scheitelwert der zum Zeitpunkt des Vorüberschlages am jeweiligen Schalterpol anstehenden Leiter-Erd-Spannung
$U_{L1L2}$	kV	verkettete Leiter-Leiterspannung zwischen den Phasen L1 und L2
$U_p$	kV	Polradspannung des Generators
$U_r$	kV	Bemessungsspannung
$X_d''$	$\Omega$	subtransiente Längsreaktanz des Generators

## 8.2 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
DPL	DIgSILENT Programming Language
DSL	DIgSILENT Simulation Language
EMT	Elektromagnetische Transienten
FKZ	Fehlerklärungszeit
KS	Kurzschluss
RMS	Effektivwert
VUE	Vorüberschlag

### 8.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Grundsätzlich mögliche Fehlerorte.....	3
Abbildung 2:	Strom- und Spannungsverlauf bei einem generatorfernen Kurzschluss.....	5
Abbildung 3:	Stromzeigerdiagramme für den Übergang vom dreiphasigen zum ein-phasigen Fehler (Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang einer Phase).....	7
Abbildung 4:	Simultaner dreipoliger Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang der Phase L1 ohne Erdberührung.....	8
Abbildung 5:	Stromzeigerdiagramme für den Übergang vom dreiphasigen zum zwei-phasigen Fehler (Kurzschluss im Spannungsscheitelwert einer Phase).....	9
Abbildung 6:	Zweipoliger Kurzschluss, der 90° später ein dreipoliger Kurzschluss wird.....	10
Abbildung 7:	Nicht simultaner Kurzschluss ohne Erdberührung.....	11
Abbildung 8:	Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung wird ein dreipoliger Kurzschluss mit Erdberührung.....	11
Abbildung 9:	Nicht simultaner Kurzschluss mit Erdberührung.....	12
Abbildung 10:	Transformatorersatzschaltbild.....	15
Abbildung 11:	Lichtbogenkennlinie $u_{LB}(i)$ einer Unterbrechereinheit.....	18
Abbildung 12:	Gewichtungsfunktion $c(t)$ einer Unterbrechereinheit.....	21
Abbildung 13:	Überlagerung von Vorüberschlagskennlinie und Spannungsverlauf [2].....	22
Abbildung 14:	Transienter Einschaltstrom.....	24
Abbildung 15:	Ersatzschaltbild des Einschaltvorgangs.....	25

---

Abbildung 16:	PowerFactory-Hauptfenster .....	29
Abbildung 17:	PowerFactory-Datenmanager .....	30
Abbildung 18:	Zuordnung der Generatorparameter.....	34
Abbildung 19:	Zuordnung der Objekte zu den Simulationsereignissen .....	35
Abbildung 20:	Variablenauswahl-Fenster .....	37
Abbildung 21:	Aktivieren der Option Multi-Threading .....	39
Abbildung 22:	Eingabemaske Nummer des Leistungsschaltertyps .....	42
Abbildung 23:	Eingabematrix Einschaltvorgänge .....	42
Abbildung 24:	Vorüberschlagskennlinie eines Leistungsschaltertyps.....	43
Abbildung 25:	Eingabematrix Ausschaltvorgänge .....	44
Abbildung 26:	Zeitlicher Ablauf des Ausschaltvorgangs .....	45
Abbildung 27:	Eingabematrix der Generatorkennlinie .....	46
Abbildung 28:	Eingabematrix für vier Generatorarbeitspunkte.....	47
Abbildung 29:	Szenario 1 - Spannungen und Phasenströme für einen Generator- arbeitspunkt.....	48
Abbildung 30:	Leistungsschaltermodell .....	50
Abbildung 31:	Eingabeparameter eines neuen Leistungsschaltertyps .....	52
Abbildung 32:	Gewichtungsfunktion einer Unterbrechereinheit mit Bewertung des Ausschaltvermögens (Beispiel 1) .....	55
Abbildung 33:	Generatorleistungsdiagramm (Beispiel 1) .....	56
Abbildung 34:	Gewichtungsfunktion einer Unterbrechereinheit mit Bewertung des Ausschaltvermögens (Beispiel 2) .....	57
Abbildung 35:	Generatorleistungsdiagramm (Beispiel 2) .....	57
Abbildung 36:	Generatorleistungsdiagramm mit 1006-MVA-Generator (Beispiel 3).....	58

---

Abbildung 37: Generatorleistungsdiagramm mit 1175-MVA-Generator (Beispiel 4).....	59
Abbildung 38: Daten der roten Generatorarbeitspunkte im Szenario 4.....	61
Abbildung 39: Einflussfaktor mechanische Streuung.....	68
Abbildung 40: Zweipoliger Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang von $U_{L2L3}$ und Übergang zum dreipoligen Kurzschluss beim Vorüberschlag in L1 .....	70
Abbildung 41: Zweipoliger Kurzschluss bei endlicher Spannung in L2-L3 und Übergang zum dreipoligen Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang von $U_{L1}$ .....	71
Abbildung 42: Stromunterbrechung im Scheitelwert des Wechselstromgliedes ( $\cos\varphi = 0$ ).....	73
Abbildung 43: Stromunterbrechung im Scheitelwert des Wechselstromgliedes ( $\cos\varphi > 0$ ).....	74
Abbildung 44: Stromunterbrechung vor dem Scheitelwert des Wechselstromgliedes .....	74



### Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Stefan Fenske

Cottbus, den 05.07.2011

## 8.4 Literaturverzeichnis

- [1] IEC 62271-100 / VDE 0671-100: Hochspannungs-Schaltgeräte und - Schaltanlagen Teil 100: Wechselstrom-Leistungsschalter
- [2] Schramm, Heinz-H.: Vorlesung Schalterverhalten im Netz
- [3] Tsanakas, D.: Ströme, Kräfte und mechanische Beanspruchung bei nicht gleichzeitig eintretenden Kurzschlüssen, *etz-a* 96, 1975, S. 501-505
- [4] IEEE-Standard C37.013-1997 – High Voltage Generator Circuit Breakers, 1998, S. 32-33, 53-54
- [5] Nelles, D.: Einfluß des Schalterlichtbogens auf die Nulldurchgänge von Kurzschlußströmen, *Elektrizitätswirtschaft, Frankfurt (Main)*, 73, 1974, 22, S. 658-659
- [6] Geyl. W.: Ausschalten von stark verlagerten Kurzschluß-Strömen, *etz-Archiv, Berlin*, 1979,1, S. 10
- [7] Heuck, K.; Dettmann, K.-D.: Elektrische Energieversorgung, 3. Auflage, *Vieweg Verlag, Braunschweig*, 1995, S. 108, 127, 129, 196-197, 296, 440
- [8] Knies., W.: Elektrische Anlagentechnik: Kraftwerke, Netze, Schaltanlagen, Schutzeinrichtungen, 2. Auflage, *Hanser Verlag, München*, 1998, S. 218-219
- [9] Brinkhoff, R., Kulicke, B., Schramm, Heinz-H.: Ausbleiben nicht-simultaner Kurzschlüsse mit ausbleibenden Stromnulldurchgängen durch SF<sub>6</sub>-Blaskolbenschalter, *Elektrizitätswirtschaft*, Band 77, H. 11, 1978, S.386-387
- [10] Habedank, U.: On the mathematical description of arc behaviour in the vicinity of current zero, *etzArchiv Bd. 10* (1988), H. 11, S. 339-343
- [11] PowerFactory: Handbuch für Einsteiger, *Gomaringen*, 2008, S. 1-1, 2-1, 2-2, 2-3, 2-4, , 6-3, 22-4, 22-5, 22-8, 24-4, 27-43, 27-53, 27-56, 27-64, 27-78, 27-79, 29-1

- 
- [12] Manual DIgSILENT Simulation Language (DSL), *Gomaringen, 2005, S. 1-3, 1-4*
- [13] Herold, G.: Elektrische Energieversorgung IV: Ein- und Ausschaltvorgänge, Überspannungen, Grundprinzipien des Selektivschutzes, 1. Auflage, *J. Schlembach Fachverlag, Wilburgstetten, 2003, S. 91, 93*
- [14] Webs, A.: Sonderprobleme bei Kurzschlüssen in Drehstromnetzen. VDE-Fachbericht 24, *1966, S. 138-148*
- [15] Spring, E.: Elektrische Energienetze: Energieübertragung und -verteilung, 1. Auflage, *VDE Verlag GmbH, Berlin, 2003, S. 357-358*
- [16] IEC 60909 / DIN VDE 0102: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen

## 9 Anhänge

Anhang 1:	Parameterauswahl der Grafiken.....	92
Anhang 2:	Generatorparameter .....	93

**Anhang 1: Parameterauswahl der Grafiken Teil 1**

Registerkarte: Kurvenverlauf LS neu  
oberes Diagramm: Phasenströme LS

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Leistungsschalter	m:i:bus2:A	1
2		Leistungsschalter	m:i:bus2:B	3
3		Leistungsschalter	m:i:bus2:C	2

Registerkarte: Kurvenverlauf LS neu  
unteres Diagramm: Phasenspannung Klemmleiste Generator

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Klemmleiste_Gen	m:U:A	1
2		Klemmleiste_Gen	m:U:B	3
3		Klemmleiste_Gen	m:U:C	2

Registerkarte: Kurvenverlauf LS neu(1)  
oberes Diagramm: Phasenströme LS

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Leistungsschalter	m:i:bus2:A	1
2		Leistungsschalter	m:i:bus2:B	3
3		Leistungsschalter	m:i:bus2:C	2

Registerkarte: Kurvenverlauf LS neu(1)  
unteres Diagramm: Spannungen an Klemmleiste Generator

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Klemmleiste_Gen	m:U:C	2
2		Klemmleiste_Gen	m:U:A	4

Registerkarte: Fehlerlichtbogen  
oberes Diagramm: Fehlerlichtbogenspannung

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Widerstand_DSL_L1	c:U_Lb	1
2		Widerstand_DSL_L2	c:U_Lb	3
3		Widerstand_DSL_L3	c:U_Lb	2

Registerkarte: Fehlerlichtbogen  
unteres Diagramm: Fehlerlichtbogenwiderstand

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Fehlerlichtbogen Phase 1	s:Rin	1
2		Fehlerlichtbogen Phase 2	s:Rin	3
3		Fehlerlichtbogen Phase 3	s:Rin	2

Registerkarte: t\_d elektrisch

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Leistungsschalter	s:dU_C	2
2		VUE	c:U_VUE_C	4
3		VUE	c:U_VUE2C	4
4		Klemmleiste_Gen	m:U:A	1

**Anhang 1: Parameterauswahl der Grafiken Teil 2**

Registerkarte: Schaltlichtbogen

oberes Diagramm: Spannungsdifferenz Schalterspannung

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Spanndiff	c:U:diff	1
2		Spanndiff	c:U:diff2	3
3		Spanndiff	c:U:diff3	2

Registerkarte: Schaltlichtbogen

mittleres Diagramm: Spannungsdifferenz Schalterspannung

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Widerstand_DSL_L1	c:U_Lb	1
2		Widerstand_DSL_L2	c:U_Lb	3
3		Widerstand_DSL_L3	c:U_Lb	2

Registerkarte: Schaltlichtbogen

unteres Diagramm: Phasenströme LS

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1		Leistungsschalter	m:i:bus2:A	1
2		Leistungsschalter	m:i:bus2:B	3
3		Leistungsschalter	m:i:bus2:C	2

Registerkarte: Generatorleistungsdiagramm 1

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1	GenKurv	Ausschalten_metallischer_KS_ohne_Erde_1	b:ActPower	4
2	Green	Ausschalten_metallischer_KS_ohne_Erde_1	b:ActPower	3
3	Yellow	Ausschalten_metallischer_KS_ohne_Erde_1	b:ActPower	117
4	Red	Ausschalten_metallischer_KS_ohne_Erde_1	b:ActPower	2

Registerkarte: Generatorleistungsdiagramm 2

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1	GenKurv	Ausschalten_metallischer_KS_mit_Erde_2	b:ActPower	4
2	Green	Ausschalten_metallischer_KS_mit_Erde_2	b:ActPower	3
3	Yellow	Ausschalten_metallischer_KS_mit_Erde_2	b:ActPower	117
4	Red	Ausschalten_metallischer_KS_mit_Erde_2	b:ActPower	2

Registerkarte: Generatorleistungsdiagramm 3

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1	GenKurv	Ausschalten_Fehlerlichtbogen_ohne_Erde_3	b:ActPower	4
2	Green	Ausschalten_Fehlerlichtbogen_ohne_Erde_3	b:ActPower	3
3	Yellow	Ausschalten_Fehlerlichtbogen_ohne_Erde_3	b:ActPower	117
4	Red	Ausschalten_Fehlerlichtbogen_ohne_Erde_3	b:ActPower	2

Registerkarte: Generatorleistungsdiagramm 4

Nr.	Ergebnisse	Element	Variable	Farbe
1	GenKurv	Ausschalten_Fehlerlichtbogen_mit_Erde_4	b:ActPower	4
2	Green	Ausschalten_Fehlerlichtbogen_mit_Erde_4	b:ActPower	3
3	Yellow	Ausschalten_Fehlerlichtbogen_mit_Erde_4	b:ActPower	117
4	Red	Ausschalten_Fehlerlichtbogen_mit_Erde_4	b:ActPower	2

**Anhang 2: Generatorparameter**

Beispiel 1 und Beispiel 2:	
	$S_{rT} = 588 \text{ MVA}$
	$\cos(\varphi) = 0,85$
	$I_k'' = 74 \text{ kA (20 kA)}$
	$x_d'' = 0,24 \text{ p.u.}$
	$R/X = 0,03$
Beispiel 3:	
	$S_{rT} = 1006 \text{ MVA}$
	$\cos(\varphi) = 0,8$
	$x_d'' = 0,3374 \text{ p.u.}$
	$R/X = 0,0055$
Beispiel 4:	
	$S_{rT} = 1175 \text{ MVA}$
	$\cos(\varphi) = 0,8$
	$x_d'' = 0,2135 \text{ p.u.}$
	$R/X = 0,00815$