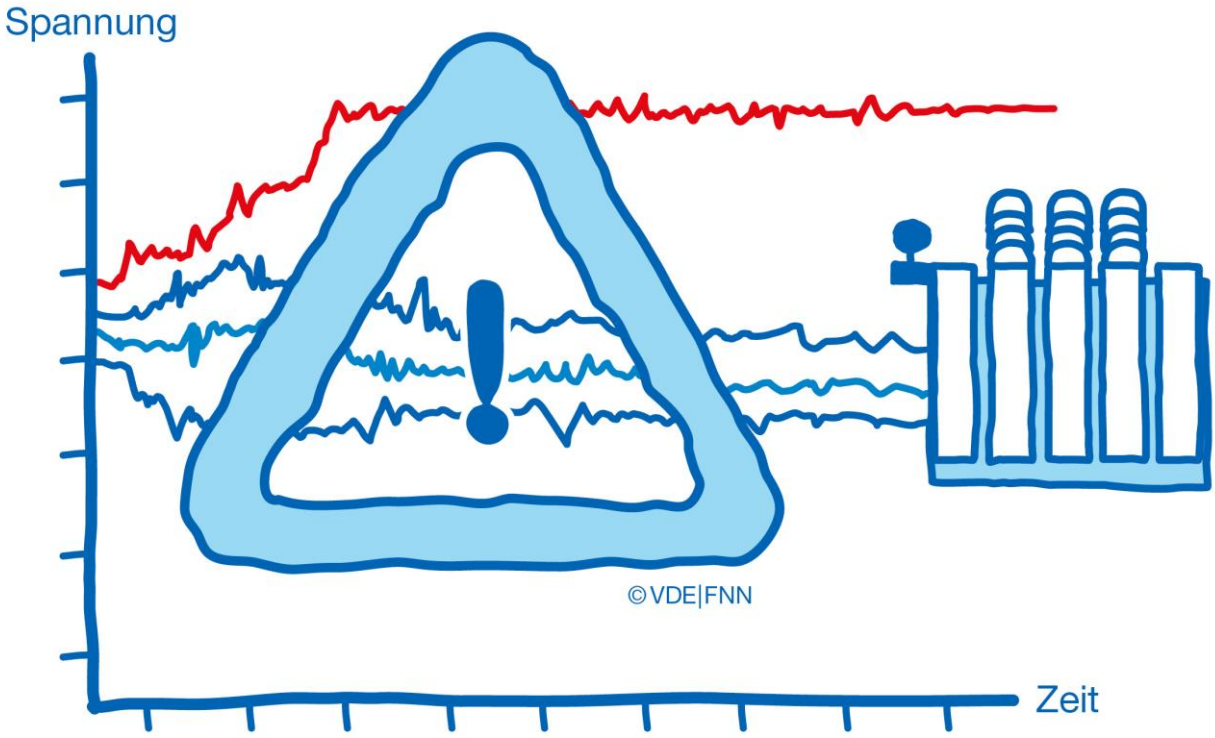

Analyse und Bewertung der Anforderungen an das Leistungsvermögen der Betriebsmittel im Falle von temporären Netzzuständen mit Spannungen oberhalb von U_m

Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Oktober 2019

Analyse und Bewertung der Anforderungen an das Leistungsvermögen der Betriebsmittel im Falle von temporären Netzzuständen mit Spannungen oberhalb von U_m

Prof. Dr.-Ing. C. Neumann

Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen

Oktober 2019

Analyse und Bewertung der Anforderungen an das Leistungsvermögen der Betriebsmittel im Falle von temporären Netzzuständen mit Spannungen oberhalb U_m

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 1

Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen 3

Zusammenfassung 5

1. Einleitung 11

2. Betrieb mit Spannungen >U_m aus Sicht der Vorschriften und Richtlinien 12

2.1. Begriffe und Definitionen in den VDE-Vorschriften 12

2.2. Internationale und nationale Network Codes 13

3. Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen >U_m: Betrieb bei temporären Überspannungen, Zeitdauer, kritische Situationen 15

3.1. Sichtung und Analyse der Erfahrungswerte bei Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern 15

3.1.1. Übertragungsnetzbetreiber 15

3.1.2. Verteilnetzbetreiber 17

3.2. Szenarien für das Auftreten von betriebsfrequenten Spannungen >U_m 18

3.2.1. Zuschaltung von langen Kabelstrecken oder Hybrid-Leitungen (Szenario 1) 19

3.2.2. Wegfall von Erzeugungseinheiten (Szenario 4) 20

4. Grundsätzliche Auslegung von Betriebsmitteln, Prüfvorschriften und angenommene Randbedingungen 22

5. Mögliche Einschränkungen der Funktionalität von Betriebsmitteln bei Betrieb mit Spannungen >U_m 24

5.1. Freileitungen 24

5.2. Freiluft-Schaltanlagen 25

5.3. GIS-Anlagen 25

5.4. Schaltgeräte 26

5.4.1. Leistungsschalter, Schalten von Kurzschlussströmen 26

5.4.1.1. Klemmenkurzschluss 27

5.4.1.2. Abstandskurzschluss 30

5.4.1.3. Teilkurzschlussströme 32

5.4.2. Leistungsschalter, Schalten von kapazitiven Strömen 32

5.4.2.1. Ausschalten von Leitungen 32

5.4.2.2. Einschalten von Leitungen 35

5.4.3. Ausschalten von kleinen induktiven Strömen 36

5.4.3.1. Stromabriss 36

5.4.3.2. Überspannungen 37
5.4.3.3. Einschwingspannung 39
5.4.3.4. Wiederzündungen 41
5.4.4. Trennschalter 41
5.4.4.1. GIS-Trennschalter 41
5.4.4.2. Freiluft-Trennschalter 43
5.5. Transformatoren 43
5.6. Drosselspulen 45
5.7. Strom- und Spannungswandler 45
5.7.1. Genauigkeit 45
5.7.2. Kippschwingungen 45
5.8. Überspannungsableiter 48
5.9. Kabelanlagen 49
5.10. Zusammenfasende Bewertung 50
6. Einfluss von Spannungen > U_m auf das Langzeit- und Alterungsverhalten abhängig von Dauer und Häufigkeit des Auftretens 54
6.1. Szenario 1: Zweimal pro Woche für jeweils 30 min Beanspruchung mit einer zeitweiligen Überspannung von 1,05*U_m über eine Betriebszeit von 40 Jahren 54
6.1.1. Freileitungen 54
6.1.2. Freileiluft-Schaltanlagen 54
6.1.3. Schaltgeräte 54
6.1.4. GIS-Schaltanlagen 55
6.1.5. Strom- und Spannungswandler 57
6.1.6. Leistungstransformatoren 57
6.1.7. Überspannungsableiter 60
6.1.8. Kabelanlagen 60
6.2. Zusammenfassende Bewertung der Lebensdauer von Betriebsmitteln des 380-kV-Netzes sowie des 220-kV- und 110-kV-Netzes bei kurzeitiger Beanspruchung mit 1,05*U_m 63
6.3. Szenario 2: Mögliche Alterung bzw. Lebensdauerverkürzung durch zeitweilige Überspannung von 1,025*U_m mit längerer Beanspruchungsdauer 63
6.3.1. GIS-Schaltanlagen 63
6.3.2. Leistungstransformatoren 64
6.3.3. Kabelanlagen 65
6.4. Zusammenfassende Bewertung der Lebensdauer von 420-kV-Betriebsmitteln bei längerer Beanspruchung mit 102,5 % der dauernd zulässigen Betriebsspannung 66
7. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen 67
8. Schrifttum 69
Anhang: Zu den Autoren 72

Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AKS	Abstandskurzschluss
AWE	Automatische Wiedereinschaltung
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE
KKS	Klemmenkurzschluss
STATCOM	Statische Kompensationseinrichtung
T10	10 %-Klemmenkurzschlussstrom
T30	30 %-Klemmenkurzschlussstrom
TAR	Technische Anschlussregel
USCD	Unified specific creepage distance

Formelzeichen

C_L	Kapazität der induktiven Last
C_N	Kapazität des speisenden Netzes
C_P	Schaltstreckenkapazität
C_t	resultierende Kapazität parallel zu Schaltstrecke
$E_{d0,01\%}$	0,01 %-Durchschlagsfeldstärke (Durchschlagsfeldstärke mit 0,01 %-Durchschlagswahrscheinlichkeit)
$E_{d50\%}$	50 %-Durchschlagsfeldstärke
$E_{d99,99\%}$	99,99 %-Durchschlagsfeldstärke
f	aktuelle Netzfrequenz
f_r	Bemessungsfrequenz
I_k	Bemessungskurzschlussstrom
I_{k1e}	einpoliger Erdkurzschlussstrom
I_{k3}	dreipoliger Kurzschlussstrom
I_L	Abstandskurzschlussstrom
i_{ch}	Abreißstrom
k_a	Überspannungsfaktor beim Ausschalten des Magnetisierungsstromes eines Transformators
k_c	kapazitiver Spannungsfaktor
k_{pp}	Polfaktor
k_{tov}	Verhältnis der gemäß Spannungs-Zeit-Kennlinie eines Ableiters zulässigen betriebsfrequenten Spannung zur Bemessungsspannung des Ableiters
L_b	Streuinduktivität zwischen Netz und Schalter
L_L	Induktivität der induktiven Last
L_N	Kurzschlussinduktivität des speisenden Netzes
L_P	Schaltstreckeninduktivität
P_r	Bemessungsleistung eines Transformators
s_L	Steilheit der leitungsseitigen Einschwingspannung

T_t	Zeitdauer der betriebsfrequenten Spannung bzw. Überspannung
$U_{90\%_ff_is}$	90 %-Blitzstehstoßspannung der in der Leitung verwendeten Isolatorketten
U_{hf}	max. VFT-Überspannung in p.u.
u_L	leitungsseitige Einschwingspannung
U_m	höchste Spannung für Betriebsmittel
U_{max}	höchste Spannung bei Bemessungsfrequenz, bei der ein Dauerbetrieb der Drosselspule möglich sein muss
U_n	Nennspannung eines Netzes
U_N	Netzspannung
U_r	Bemessungsspannung
u_{max}	Abreißüberspannung
u_N	Leiter-Erd-Spannung des speisenden Netzes
u_{NC}	Spannung an der Kapazität C_L zum Zeitpunkt des Stromabrisses
u_{tr}	Einschwingspannung
W_{ch}	auf Lastseite gespeicherte Energie
X_0	Reaktanz im Nullsystem
X_1	Reaktanz im Mitsystem
Z_0	Wellenwiderstand im Nullsystem
Z_1	Wellenwiderstand im Mitsystem
Z_L	Wellenwiderstand der Leitung
$\frac{C_t \cdot U_r^2}{\alpha\ P_r}$	”Chop Parameter” in s
α	Verhältnis Magnetisierungsstrom zu Bemessungsstrom
δ	Erdfehlerfaktor
δ_L	Lastabwurffaktor
λ	Abreißzahl
σ	Standardabweichung

Zusammenfassung

Ausgangspunkt für die Betrachtungen sind zum einen die nationalen und internationalen Network Codes und zum anderen geänderte Übertragungsaufgaben. In den europäischen Network Codes wird für das 380-kV-, 220-kV- und 110-kV-Netz in Zentraleuropa eine zeitlich begrenzte Überschreitung der Bemessungsspannung von 420 kV, 245 kV und 123 kV mit 440 kV, 253 kV und 127 kV für mindestens 20 min und maximal 60 min angegeben. In Deutschland wird der normale Spannungsbereich durch netztechnische Maßnahmen in der Regel eingehalten. Durch Änderung der Erzeugungsstruktur und den damit verbundenen Übertragungsaufgaben sind abhängig vom jeweiligen Betriebsfall und von der Anordnung der Blindleistungskompensationseinrichtungen an einigen Netzknoten zeitweilig Spannungen größer U_m nicht auszuschließen. Daneben sind weitere Ausnahmesituationen, wie Systemsplit, Zuschalten von Leitungen mit Teilverkabelung, oder Lastabwurf zu nennen.

Für die bisher eingesetzten Betriebsmittel, die in der Regel für eine dauernde Betriebsspannung U_m von 123 kV, 245 kV und 420 kV spezifiziert sind, ist zu prüfen, inwieweit ein Betrieb bei Spannungen höher als die dauernde Betriebsspannung möglich ist. Dabei ist ein solcher Betriebsfall zunächst aus Sicht der relevanten Vorschriften zu betrachten. Des Weiteren sind mögliche Funktionseinschränkungen und physikalischen Phänomene zu klären, die bei Beanspruchungen mit Spannungen größer als die dauernde Betriebsspannung auftreten.

Im Kapitel 2 wird zunächst der Betrieb mit Spannungen $>U_m$ aus Sicht der Vorschriften und Richtlinien betrachtet. Aus den genannten Definitionen in den Vorschriften kann abgeleitet werden, dass ein dauernder Betrieb eines Betriebsmittels oberhalb der Bemessungsspannung nicht erlaubt ist. Ein Betrieb mit betriebsfrequenter Spannung oberhalb der Bemessungsspannung stellt einen Betrieb bei zeitweiliger Überspannung dar. Inwieweit ein solcher Betriebsfall zulässig ist, muss im Rahmen der Isolationskoordination geklärt werden. Die internationalen und nationalen Network Codes fordern eine Spannung von bis $1{,}05*U_m$ für 30 bzw. 60 Minuten, bevor der betreffende Netzknoten vom Netz getrennt wird.

Kapitel 3 geht auf die Randbedingungen für den Betrieb mit Spannungen $>U_m$ ein. Hierzu werden zunächst Erfahrungswerte der Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber analysiert. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede sowohl zwischen den einzelnen Übertragungsnetzbetreibern als auch den Verteilnetzbetreibern. Während in einem betrachteten Übertragungsnetz bis auf zwei Ausnahmesituationen keine Überschreitungen von U_m auftreten, kommt es bei einem anderen in einigen Umspannanlagen zu Überschreitungen von 1…2 %, die z. T. über mehrere Stunden andauern. Bei einem städtisch geprägten Verteilnetzbetreiber ist die Spannung in den repräsentativen Umspannanlagen mehr oder weniger konstant und liegt mit 110 kV immer deutlich unter U_m. In einem anderen städtisch und ländlich geprägten Verteilnetz sind die Spannungsschwankungen ausgeprägter, und es können sporadische Überschreitungen von U_m auftreten. In einigen wenigen Umspannanlagen wurden sogar Überschreitungen von U_m um mehr als 5 % über mehrere Stunden festgestellt.
Die von der FNN-Projektgruppe „Spannungsfestigkeit“ aufgeführten Szenarien für das Auftreten von betriebsfrequenten Spannungen $>U_m$ konnten für das Szenario „Zuschaltung von langen Kabelstrecken oder Hybrid-Leitungen“ anhand von Simulationsrechnungen und für das Szenario „Wegfall von Erzeugungseinheiten“ anhand eines aktuellen Fallbeispiels belegt werden.

Das Kapitel 4 befasst sich mit der grundsätzlichen Auslegung von Betriebsmitteln auf Basis der Prüfvorschriften und der angenommenen Randbedingungen. Betriebsmittel für das Hoch-

und Höchstspannungsnetz werden für eine Lebensdauer von 40 bis 50 Jahren ausgelegt. Die Auslegung erfolgt gemäß internationaler Normen (IEC Standards), die eine Vielzahl von betrieblichen Anforderungen, jedoch nicht 100% aller im Betrieb auftretenden Bedingungen abdecken. Andererseits werden bei den Typprüfungen Annahmen getroffen, die unter Netzbedingungen nur sehr selten oder gar nicht auftreten. Es ist Aufgabe des Betreibers, die Einsatzbedingungen und die Anforderungen zu analysieren und die entsprechende Bemessung zu spezifizieren.
Im vorliegenden Fall wird nur der Einfluss der elektrischen Beanspruchungen betrachtet. Der prüftechnische Nachweis, dass das betreffende Betriebsmittel in der Lage ist, die betriebliche Dauerbeanspruchung über die angenommene Lebensdauer zu beherrschen, erfolgt durch eine Prüfung mit Langzeit-Stehwechselspannung, meist für eine Dauer von 30…60 min. Bei einigen Betriebsmitteln wird dieser Nachweis auch durch eine Prüfung mit Kurzzeit-Stehwechselspannung, Prüfdauer meist 1 min, vorgenommen. Die ausreichende Festigkeit gegenüber zeitweiligen Überspannungen wird durch die Prüfung mit Kurzzeit- oder Langzeit-Stehwechselspannung nachgewiesen.
Im Folgenden ist insbesondere das Verhalten bei zeitweiligen Überspannungen von Interesse. Basierend auf den Analysen der Daten der Netzbetreiber und den nationalen und europäischen Network Codes wird angenommen, dass die betreffenden Betriebsmittel zweimal pro Woche für jeweils 30 min mit einer zeitweiligen Überspannung von 1,05*U_m beansprucht werden. Es ist zu prüfen, ob durch diese Beanspruchungen eine Funktionseinschränkung der Betriebsmittel zu erwarten ist und ob diese über die Betriebszeit akkumuliert zu einer merklichen Verkürzung der Lebensdauer führen. Die beiden Fragestellungen werden für die verschiedenen Betriebsmittel – Freileitungen, Freiluftschaltanlagen, Schaltgeräte, gasisolierte Schaltanlagen, Strom- und Spannungswandler, Leistungstransformatoren, Überspannungsableiter und Kabelanlagen – auf Basis der einschlägigen Vorschriften und der Fachliteratur betrachtet.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit möglichen Funktionseinschränkungen der vorgenannten Betriebsmittel bei 1,05*U_m.

Der Betrieb einer Freileitung mit 1,05*U_m hat keine Auswirkung auf die grundsätzliche Bemessung der Abstände einer Freileitung, da hierfür die Blitzstehstoßspannung der Isolatoren maßgeblich ist. Das Koronaverhalten der Leiterseile und Armaturen sowie der vereinheitlichte spezifische Kriechweg der Isolatoren sind in der Regel so bemessen, dass sie auch den Anforderungen bei 1,05 U_m genügen.

Die Mindestabstände in Freiluft-Schaltanlagen im 110-kV- und 220-kV-kV-Netz werden durch die Bemessungs-Blitzstoßspannung und im 380-kV-Netz durch die Bemessungs-Schaltstoßspannung bestimmt. Die Bemessungs-Blitzstoßspannung ist von der atmosphärischen Überspannung abgeleitet. Für die Bemessungs-Schaltstoßspannung wird in der Regel ein Wert von 1 050 kV angesetzt, ausgehend von Schaltüberspannungen von 2,9 p.u, die aber in deutschen 380-kV-Netzen aber gar nicht auftreten. Daher ist die Bemessung der Mindestabstände von aktiven Teilen in Freiluft-Schaltanlagen auch bei Beanspruchung mit 1,05*U_m ausreichend sicher.

Für die Auslegung von gasisolierten Schaltanlagen (GIS) ist die Bemessungs-Blitzstoßspannung maßgebend, die von äußeren Überspannungen abgeleitet wird und von der Betriebsspannung nicht beeinflusst wird. Daneben soll die Bemessungs-Blitzstoßspannung auch eine ausreichende Spannungsfestigkeit gegenüber inneren Überspannungen beim Schalten von Trennschaltern nachweisen. Da die sehr schnell ansteigenden Überspannungen

kleiner sind als die Koordinations-Stehblitzstoßspannung, sind diese durch die Bemessungs-Blitzstoßspannung abgedeckt.

Ist am Netzknoten bei erhöhter Spannung von 1,05*U_m mit Kurzschlussströmen im Bereich des Bemessungs-Kurzschlussstromes des Leistungsschalters zu rechnen, sind die Netzverhältnisse im Kurzschlussfall zu prüfen. Ist das Verhältnis $X_0/X_1 < 2{,}5$, so ist in starr geerdeten Netzen beim dreipoligen Kurzschluss der Polfaktor $k_{pp} < 1{,}3$ und somit die Wiederkehrkehrspannung kleiner als die gemäß Norm geprüfte. In solchen Fällen ist davon auszugehen, dass der Schalter diesen Kurzschlussfall auch bei einer Spannung von 1,05*U_m beherrscht.

Der Abstandskurzschluss wird gemäß Norm mit einem Kurzschlussstrom bezogen auf den Bemessungs-Kurzschlussstrom geprüft. In der Praxis wird dieser Kurzschlussfall durch einen einpoligen Fehler verbunden mit einem Erdkurzschlussstrom in Höhe von 85…90 % des dreipoligen Kurzschlussstromes ausgelöst, sodass auch die kritische Anfangssteilheit geringer sein wird. Somit sollte auch dieser Schaltfall beherrscht werden.

Kurzschlüsse ohne Erdberührung sind äußerst selten. Daher kann auch beim Schalten von Teilkurzschlussströmen von einem Polfaktor $k_{pp} \leq 1{,}3$ ausgegangen werden, sofern der Transformator-Sternpunkt geerdet ist, sodass die Amplitude der Einschwingspannung nur 87 % des Normwertes beträgt. Somit sollte dieser Schaltfall auch bei 1,05*U_m beherrscht werden. Kann der Transformator-Sternpunkt aus netztechnischen Gründen nicht geerdet werden, ist eine Analyse der Einschwingbedingungen unter Berücksichtigung der Eigenfrequenz des Transformators und eine Klärung erforderlich, ob dieser Schaltfall vom eingesetzten Schalter beherrscht wird.

Beim Ausschalten von nicht kompensierten Leitungen bei Spannungen von 1,05*U_m sind Rückzündungen nicht auszuschließen. Erfolgt die Zuschaltung der Leitung bei einer Spannung von 1,05*U_m, sind sowohl der betriebsfrequente als auch der transiente Ausgleichsvorgang ausgeprägter. Auswirkungen auf den Leistungsschalter am Leitungsanfang und am Leitungsende durch die transienten Überspannungen sind aber nicht zu erwarten, da diese durch die Bemessung gemäß Norm abgedeckt sind.

Das Schalten von kleinen induktiven Strömen bei Spannungen von 1,05*U_m kann vermehrt Wiederzündungen zur Folge haben. Wiederzündungen können grundsätzlich durch gesteuertes Schalten vermieden werden. Bei Einstellung des Auslösezeitpunktes sollte aber überprüft werden, ob die Funktionalität auch bei erhöhter Betriebsspannung gewährleistet ist.

Das Schalten von kleinen kapazitiven Strömen mit GIS-Trennschaltern sollte auch bei 1,05*U_m möglich sein, da dieser Schaltfall gemäß Norm mit der 1,1-fachen Phasenspannung auf der Speiseseite und der 1,1-fachen Spannung als Vorladung auf der Lastseite geprüft wird. Bei Freiluft-Trennschaltern ist mit einer geringfügig längeren Schaltdauer zu rechnen, die sich allerdings im Bereich der statistischen Streuung bewegen wird.

Spannungen von 1,05*U_m können an Transformatoren zu einer im Dauerbetrieb unzulässigen Übererregung führen. Da diese aber nur kurzzeitig wirkt, ist keine unzulässige Übererwärmung zu erwarten. In jedem Fall muss aber mit gegenüber der Bemessungsspannung höheren Geräuschen gerechnet werden, ebenso wie bei den nach Network Codes zulässigen Unterfrequenzen. Als kurzschlussfest geltende Transformatoren sollten die stärkere mechanische Beanspruchung durch den höheren Inrush-Strom bei Zuschaltung mit 1,05*U_m beherrschen. Dennoch ist zu prüfen, wie die Schutzgeräte auf die höheren Amplituden des Einschaltstromes reagieren.

Beim Betrieb von Drosselspulen mit Spannungen von 1,05*U_m muss mit einer höheren Verlustleistung gerechnet werden. Diese höhere Verlustleistung wird aber nur für maximal 30 Minuten wirken und in der Regel nicht bei der für die Bemessung angenommenen maximalen Betriebstemperatur von 40°C auftreten, sodass keine unzulässige Übertemperatur zu erwarten ist. In jedem Fall werden aber höheren Geräusche auftreten, da die Geräusche bei Bemessungsspannung und Bemessungsstrom definiert sind.

Gemäß Norm ist auch Genauigkeit von Strom- und Spannungswandlern bei Spannungen von 1,05*U_m gewährleistet. Durch induktive Spannungswandler in bestimmten Netz- und Anlagenkonfigurationen angeregte stationäre Kippschwingungen können durch Einsatz von Spannungswandlern mit Luftspaltkern vermieden werden. Es ist anzunehmen, dass diese Wandler auch bei 1,05*U_m ein ausreichendes Dämpfungsverhalten aufweisen.

Bei den in deutschen Netzen üblichen Überspannungsableitern ist auch bei einer Spannung von 1,05*U_m keine thermische Überbeanspruchung zu erwarten. Lediglich in 110-kV-Netzen mit Erdschlusskompensation könnten Ableiter bei Vorbeanspruchung in Höhe der vollen Nennenergie instabil werden, wobei dieser Fall als selten einzustufen ist. Trifft er zu, ist das thermische Verhalten anhand der Herstellerangaben genauer zu überprüfen.

Die an Kabelanlagen im Rahmen der Typ- und Vorortprüfungen durchgeführten Spannungsprüfungen mit einer Prüfdauer von 30 bis 60 min führen zu deutlich höheren Beanspruchungen als Spannungen von 1,05*U_m. Funktionseinschränkungen sind daher unter diesem Gesichtspunkt nicht zu erwarten.

In Kapitel 6 wird der Einfluss von Spannungen >U_m auf das Langzeit- und Alterungsverhalten abhängig von Dauer und Häufigkeit des Auftretens untersucht. Basierend auf den Analysen der Daten der Netzbetreiber und den nationalen und europäischen Network Codes werden zwei Szenarien betrachtet. Zunächst wird die bisher angenommene Beanspruchung der betreffenden Betriebsmittel zweimal pro Woche für jeweils 30 min mit einer zeitweiligen Überspannung von 1,05*U_m über eine Betriebszeit von 40 Jahren akkumuliert und daraus der Lebensdauerverbrauch abgeleitet. Anschließend wird untersucht, bei welcher Beanspruchungsdauer eine zeitweilige Überspannung von nur 1,025*U_m zu einer merklichen Alterung bzw. Lebensdauerverkürzung führen würde.

Die Betrachtungen gehen davon aus, dass die ausreichende elektrische Langzeitfestigkeit durch eine in den Normen angegebene Kurzzeit- bzw. Langzeit-Stehwechselspannungsprüfung nachzuweisen ist. Das Alterungsverhalten wird aus der Spannungszeitcharakteristik – Lebensdauer abhängig von der angelegten Spannung, engl.: V-t characteristic – hergeleitet.

Die Überlegungen beziehen sich vorrangig auf Betriebsmittel des 380-kV-Netzes. Die Erkenntnisse können auch auf Betriebsmittel des 110-kV- und 220-kV-Netzes übertragen werden, da für diese Betriebsmittel das Verhältnis Kurzzeitwechselspannung zu Bemessungsspannung in der Regel größer als ist als für Betriebsmittel des 380-kV-Netzes.

Die angenommene kurzzeitige Beanspruchung von Betriebsmitteln des 380-kV-Netzes mit 105 % der dauernd zulässigen Betriebsspannung zweimal pro Woche für jeweils 30 min führt nicht zu einer signifikanten Lebensdauerverkürzung. Eine dauernde Beanspruchung mit 105 % würde jedoch eine deutliche Lebensdauerverkürzung um mindestens 50 % bewirken. Daher kann eine solche Beanspruchung nicht nur auf Grund der geltenden Vorschriften, sondern auch aus physikalischen Gründen nicht zugelassen werden. Die Aussage kann auch auf Betriebsmittel des 110-kV- und 220-kV-Netz übertragen werden.

Die Untersuchungen des Lebensdauerverhaltens bei zeitweiligen Überspannungen von 1,025*U_m bezieht sich auf die drei Betriebsmittel GIS, Transformatoren und Kabel, für deren Isoliersystem die Alterungsindizes aus der Literatur bekannt sind. Ein Dauerbetrieb mit Betrieb mit 102,5 % der dauernd zulässigen Betriebsspannung führt bei den Isoliersystemen der hier betrachteten Betriebsmittel zu einer deutlichen Lebensdauerverkürzung. Der Lebensdauerverbrauch liegt bei den Isoliersystemen der Betriebsmittel GIS und Kabel bei 10 Jahren bzw. 12 Jahren. Die Lebensdauer des Transformator-Isoliersystems wird sogar noch deutlicher verkürzt. Derartige Betriebszustände müssen daher zeitlich begrenzt werden. Lässt man eine Lebensdauerverkürzung um 10 % zu, so darf die akkumulierte Betriebszeit mit einer Spannung von 1,025*U_m höchstens 4 Jahre betragen.

Das Kapitel 7 fasst die Schlussfolgerungen zusammen und gibt Handlungsempfehlungen. Ein zeitweiliger Betrieb des Hoch- und Höchstspannungsnetzes mit Spannungen von 105 % der höchsten Spannung für Betriebsmittel U_m stellt einen Betrieb bei zeitweiliger Überspannung dar. Dieser ist zulässig und wird von den Betriebsmitteln in der Regel beherrscht. Funktionseinschränkungen sind in den meisten Fällen nicht zu erwarten, da unter realen Netzbedingungen die dann auftretenden Betriebsbedingungen durch die Annahmen in betreffenden Normen größtenteils noch abgedeckt sind. Die angenommenen Beanspruchung mit 1,05*U_m zweimal pro Woche für jeweils 30 Minuten würde über eine Betriebszeit von 40 Jahren akkumuliert keine signifikante Lebensdauerverringerung verursachen. Auch unter Gesichtspunkten der Alterung der eingesetzten Isoliermedien ist mit keiner technisch relevanten Verkürzung der Lebensdauern zu rechnen.

Bei einigen Betriebsmitteln könnten bei Betrieb mit 1,05*U_m unter besonderen Betriebsbedingungen gewisse Funktionseinschränkungen auftreten. In diesen Fällen werden die im Folgenden angegebenen Maßnahmen empfohlen.

<u>Leistungsschalter</u>
Wenn in Anlagen mit Kurzschlussströmen im Bereich des Bemessungs-Kurzschlussstromes mit erhöhten Betriebsspannungen zu rechnen ist, sollte anhand der konkreten Netzbedingungen geprüft werden, ob die eingesetzten Leistungsschalter Schaltfälle im Grenzleistungsbereich, insbesondere Klemmenkurzschlüsse, beherrschen. Gegebenenfalls müssen Leistungsschalter mit höherem Bemessungs-Kurzschlussstrom eingesetzt werden.
Werden leerlaufende, nicht kompensierte Leitungen bei erhöhter Betriebsspannung von 1,05*U_m ausgeschaltet, so sind Rückzündungen nicht mehr auszuschließen. In diesen Fällen wird gesteuertes Schalten der Leistungsschalter empfohlen.

<u>Transformatoren</u>
Bei Transformatoren muss bei Betrieb mit 1,05*U_m mit deutlich höheren Geräuschen gerechnet werden. Ob eine im Kurzzeitbetrieb unzulässige Übererregung auftreten kann, ist gegebenenfalls zu klären.

<u>Drosselspulen</u>
Beim Betrieb von Drosselspulen mit 1,05*U_m sind neben verstärkten Geräuschen auch höhere Kupfer- und Eisenverluste zu erwarten. Es ist zu überprüfen, ob die zusätzlichen Verluste zu einer unzulässigen Übererwärmung im Kurzzeitbetrieb führen können.

Spannungswandler

Zur Vermeidung von stationären Kippschwingungen wird der Einsatz von induktiven Spannungswandlern mit Luftspalt-Kernen empfohlen. Das ausreichende Dämpfungsverhalten bei 1,05*U_m sollte versuchstechnisch oder durch Simulation überprüft werden.

Überspannungsableiter

Tritt im gelöscht betriebenen 110-kV-Netz ein Erdschluss bei der erhöhten Betriebsspannung von 1,05*U_m auf, so ist bei einer Fehlerdauer ≥30 Minuten eine thermische Überbeanspruchung der Ableiter nach Norm nicht gänzlich auszuschließen. In solchen Fällen ist das thermische Verhalten der Ableiter anhand der Herstellerangaben genauer zu überprüfen.

Kabelanlagen

Neben den hier betrachteten VPE-Kabeln sind im deutschen Hoch- und Höchstspannungsnetz noch Gasaußendruckkabel und Ölkabel im Einsatz. Bei diesen Kabelsystemen wirkt nicht die dielektrische sondern möglicherweise die thermische Alterung Lebensdauer begrenzend.

Die angenommene Häufigkeit und Dauer der Beanspruchungen mit 1,05*U_m führt zu keiner signifikanten Lebensdauerverkürzung der betrachteten Betriebsmittel. Eine deutlich größere Häufigkeit und/oder Beanspruchungsdauer hätte aber negative Auswirkungen auf die Lebensdauer der Betriebsmittel. Ein dauernder Betrieb mit 1,05*U_m würde basierend auf der in den Vorschriften zugrunde gelegten Bemessung zu einer deutlichen Lebensdauerverringerung führen und ist unter Berücksichtigung der einschlägigen Normen nicht zulässig. Selbst der dauernde Betrieb mit einer geringeren Spannung oberhalb der Betriebsspannung, z. B. mit 1,025*U_m würde zu einer beschleunigten Alterung führen. Betriebszustände mit Spannungen oberhalb von U_m sind daher auf das für die Netzsicherheit notwendige Maß zu beschränken. Sie dürfen nicht zur Lastflusssteuerung oder zum Vermeiden von Überlastsituationen eingesetzt werden.

7. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Ein dauernder Betrieb des Hoch- und Höchstspannungsnetzes mit Spannungen größer U_m kann nicht nur aufgrund der geltenden Vorschriften, sondern auch aus physikalischen Gründen nicht zugelassen werden. Ein zeitweiliger Betrieb mit Spannungen von 1,05*U_m stellt einen Betrieb bei zeitweiliger Überspannung dar. Dieser ist zulässig, muss aber in Dauer und Häufigkeit begrenzt werden. Funktionseinschränkungen sind in den meisten Fällen nicht zu erwarten, da unter realen Netzbedingungen die dann auftretenden Betriebsbedingungen durch die Annahmen in den betreffenden Normen größtenteils noch abgedeckt sind. Die angenommene Beanspruchung mit 1,05*U_m zweimal pro Woche für jeweils 30 Minuten würde über eine Betriebszeit von 40 Jahren akkumuliert keine signifikante Lebensdauerverringerung verursachen. Auch unter Gesichtspunkten der Alterung der eingesetzten Isoliermedien ist mit keiner technisch relevanten Verkürzung der Lebensdauer zu rechnen.

Die Funktionsfähigkeit der Betriebsmittel bei Betriebsspannung 1,05*U_m profitiert von den Sicherheitsmargen, die sich aus den in den Normen getroffenen Annahmen ergeben. Diese Sicherheitsmargen werden während eines Betriebs bei 1,05*U_m nun betrieblich genutzt und sind damit als Margen „verbraucht“. Es ist zwar nicht davon auszugehen (wenngleich auch nicht völlig auszuschließen), dass damit ein erhöhtes Ausfallrisiko einhergeht, jedoch ist unter diesen Bedingungen kein Spielraum mehr für noch weiter erhöhte Betriebsspannungen von > 1,05*U_m vorhanden.

Bei den im Folgenden aufgeführten Betriebsmitteln können bei Betrieb mit 1,05*U_m unter den genannten besonderen Betriebsbedingungen gewisse Funktionseinschränkungen auftreten. In diesen Fällen werden die angegebenen Maßnahmen empfohlen.

Leistungsschalter

Sind in Anlagen mit Kurzschlussströmen im Bereich des Bemessungs-Kurzschlussstromes der installierten Leistungsschalter erhöhte Betriebsspannungen nicht auszuschließen, sollte anhand der konkreten Netzbedingungen geprüft werden, ob Schaltfälle im Grenzleistungsbereich, insbesondere Klemmenkurzschlüsse, beherrscht werden. Gegebenenfalls müssen Leistungsschalter mit höherem Bemessungs-Kurzschlussstrom eingesetzt werden.

Beim Abschalten von Transformator nahen Fehlern muss mit Einschwingbedingungen gerechnet werden, die nicht durch die Norm abgedeckt sind, sofern der Transformator-Sternpunkt nicht geerdet ist. In diesen Fällen sollte eine Analyse der der Einschwingbedingungen unter Berücksichtigung der Eigenfrequenz des betreffenden Transformators durchgeführt und geklärt werden, ob der eingesetzte Leistungsschalter den Schaltfall beherrscht.

Werden leerlaufende, nicht kompensierte Leitungen bei erhöhter Spannung von 1,05*U_m ausgeschaltet, so sind Rückzündungen nicht mehr auszuschließen, insbesondere wenn die eingesetzten Leistungsschalter in der Lage sind, den kapazitiven Strom mit sehr kurzen Lichtbogenzeiten zu unterbrechen. Rückzündungen können in diesen Fällen durch gesteuertes Schalten der Leistungsschalter vermieden werden.

Beim Schalten von kleinen induktiven Strömen bei einer Spannung von 1,05*U_m können vermehrt Wiederzündungen auftreten. Diese lassen sich durch gesteuertes Schalten vermeiden. Es sollte aber überprüft werden, ob mit dem eingestellten Auslösezeitpunkt das Ausschalten ohne Wiederzündungen auch bei erhöhter Betriebsspannung sichergestellt ist.

Transformatoren

Bei Transformatoren muss bei Betrieb mit 1,05*U_m mit deutlich höheren Geräuschen gerechnet werden. Eine Übererwärmung ist wegen der Dauer der erhöhten Spannung von nur 30 Minuten unwahrscheinlich. Ob eine im Kurzzeitbetrieb unzulässige Übererregung auftreten kann, ist gegebenenfalls zu klären [54].

Drosselspulen

Beim Betrieb von Drosselspulen mit 1,05*U_m sind neben verstärkten Geräuschen auch höhere Kupfer- und Eisenverluste zu erwarten. Es ist zu überprüfen, ob die zusätzlichen Verluste zu einer unzulässigen Übererwärmung im Kurzzeitbetrieb führen können.

Spannungswandler

Zur Vermeidung von stationären Kippschwingungen wird der Einsatz von induktiven Spannungswandlern mit Luftspalt-Kernen empfohlen. Bei diesen Wandlern sollten auch bei Betrieb mit 1,05*U_m keine stationären Kippschwingungen angeregt werden. Dennoch sollte das ausreichende Dämpfungsverhalten bei 1,05*U_m versuchstechnisch oder durch Simulation nachgewiesen werden.

Überspannungsableiter

Tritt im gelöscht betriebenen 110-kV-Netz ein Erdschluss bei der erhöhten Spannung von 1,05*U_m auf, so ist bei einer Fehlerdauer von 30 Minuten eine thermische Überbeanspruchung der Ableiter nach Norm nicht gänzlich auszuschließen. In solchen Fällen ist das thermische Verhalten der Ableiter anhand der Herstellerangaben genauer zu überprüfen. Erleichternd würde wirken, wenn man eine Belastung der Ableiter mit voller Nennenergie ausschließen kann. Eine Überbeanspruchung der Ableiter durch Lastabwurf bei 1,05*U_m ist auszuschließen, sofern der Spannungsregler die einspeisende Maschine innerhalb von 10 Sekunden auf U_m zurückfährt. Gegebenenfalls ist das Reglerkonzept zu prüfen.

Die angenommene Häufigkeit und Dauer der Beanspruchungen mit 1,05*U_m ruft keine signifikante Lebensdauerverkürzung der betrachteten Betriebsmittel hervor. Eine deutlich größere Häufigkeit und/oder Beanspruchungsdauer hätte aber negative Auswirkungen auf die Lebensdauer der Betriebsmittel. Ein dauernder Betrieb mit 1,05*U_m kann zum einen unter physikalischen Gesichtspunkten nicht zugelassen werden, da dieser basierend auf der in den Vorschriften zugrunde gelegten Bemessung zu einer deutlichen Lebensdauerverringerung führen würde. Zum anderen ist ein dauernder Betrieb bei Spannungen oberhalb der Bemessungsspannung gemäß den einschlägigen Normen nicht zulässig, sondern nur der Betrieb bei zeitweiligen Überspannungen. Dieser Betriebsfall ist im Rahmen der Isolationskoordination zu berücksichtigen.

Selbst der dauernde Betrieb mit einer geringeren Spannung oberhalb der Betriebsspannung, z. B. mit 1,025*U_m, würde zu einer beschleunigten Alterung und damit zu einer Lebensdauerverkürzung auf z.T. unter 50 % führen. Betriebszustände mit Spannungen oberhalb von U_m sind daher auf das für die Netzsicherheit notwendige Maß zu beschränken. Sie dürfen nicht zur Lastflusssteuerung oder zum Vermeiden von Überlastsituationen eingesetzt werden.