

Blindleistungskompensation von 110-kV-Hochspannungskabeln im Salzburger Verteilnetz

Philipp Möschl-Brandl¹, Dominik Grall², Philipp Hackl², Fabian Ivos²

Kurzfassung: Im Zuge des mittelfristigen Netzausbaukonzepts der Salzburg Netz GmbH besteht die Möglichkeit zur Errichtung von 110-kV-Leitungen in Form von Hochspannungskabeln. Vor diesem Hintergrund untersucht der vorliegende Beitrag die Anforderungen an die Blindleistungskompensation sowie die netzbetrieblichen Auswirkungen beim Einsatz von Kompensationsdrosseln. Hierzu wird das Spannungsprofil im 110-kV-Netz für verschiedene Konfigurationen analysiert. Zudem werden potenzielle Herausforderungen beim Schalten von Kompensationsdrosseln aufgezeigt. Abschließend erfolgt ein Einblick in die praktische Umsetzung.

Keywords: Verteilnetz, Hochspannungskabel, Blindleistungskompensation, Kompensationsdrossel, Schaltvorgänge

1 Einleitung und Motivation

Zur Dimensionierung der erforderlichen Blindleistungskompensation sowie zur Analyse des Spannungsprofils werden in der Netzplanung die vorhandenen Einspeiser und Lasten in Form von repräsentativen Schwach- und Starklastfällen (Extremfälle) abgebildet. Für die Bewertung des Spannungsprofils sind der Lastfluss sowie das daraus resultierende Blindleistungsverhalten der Leitungen maßgeblich. Im unternatürlichen Betrieb weisen Leitungen ein kapazitives³ Verhalten auf, was zu einer Spannungsanhebung führt, während im übernatürlichen Betrieb der entgegengesetzte Effekt auftritt. Die natürliche Leistung hängt von den Leitungsparametern sowie der anliegenden Spannung ab, wobei ihre Größe quadratisch mit der Spannung zunimmt. Mit steigendem Verkabelungsgrad treten vermehrt unternatürliche Betriebszustände auf, sodass das erhöhte Spannungsniveau im 110-kV-Netz insbesondere während Schwachlastzeiten zunehmend in den Fokus rückt.

Zur Einordnung der aktuellen Situation im Salzburger Verteilnetz wird in [1] eine Übersicht der Blindleistungserzeuger bzw. -verbraucher dargestellt. Diese Betrachtung umfasst sowohl bereits umgesetzte als auch weiterführende Maßnahmen zur Blindleistungsbilanzierung. Ergänzend dazu erfolgt in [2] eine Analyse von 15-min-Zeitreihen der Wirk- und Blindleistungsbilanz des Salzburger Verteilnetzes. Der vorliegende Beitrag knüpft an diese Arbeiten an und untersucht das resultierende Spannungsniveau bei einem Netzausbau mit Hochspannungskabeln im 110-kV-Netz einschließlich Kompensationsdrosseln zur

¹ Salzburg Netz GmbH, Bayerhamerstraße 16, 5020 Salzburg, Österreich, +43/676/86876267, philipp.moeschl-brandl@salzburgnetz.at, www.salzburgnetz.at

² Technische Universität Graz, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Inffeldgasse 18/I, 8010 Graz, Österreich

³ Alle Beschreibungen werden im Verbraucherzählpfeilsystem durchgeführt. Positive Blindleistung wirkt spannungssenkend, negative Blindleistung spannungsstützend

Blindleistungsbilanzierung. Neben den Auswirkungen auf die Spannungshaltung in Stark- und Schwachlastszenarien wird zudem der Schaltvorgang von Kompensationsdrosseln mit besonderem Fokus auf den Abschaltvorgang analysiert sowie die praktische Umsetzung der gewählten Maßnahmen beschrieben.

2 Blindleistungsbilanz und Maßnahmen zur Kompensation

In Abbildung 1 ist das 110-kV-Netz der Salzburg Netz GmbH im aktuellen Ausbauzustand einschließlich möglicher Erweiterungen dargestellt. Das Verteilnetz gliedert sich in zwei Teilnetze (rot bzw. blau dargestellt), welche im UW 13/14 kuppelbar sind. Die Anschlusspunkte an das Übertragungsnetz werden als externe Netze (Slack-Knoten, $\underline{u} = 1$ pu) modelliert, wobei der grau dargestellte Slack-Knoten eine zum Betrachtungszeitpunkt zukünftige Anbindung repräsentiert und lediglich in ausgewählten Szenarien berücksichtigt ist. Grau strichliert sind jene Kabelstrecken (jeweils zwei Systeme) eingezeichnet, die den Ausgangspunkt der Untersuchungen bilden. In unterschiedlichen Farben sind potenzielle Standorte für Kompensationsdrosseln markiert.

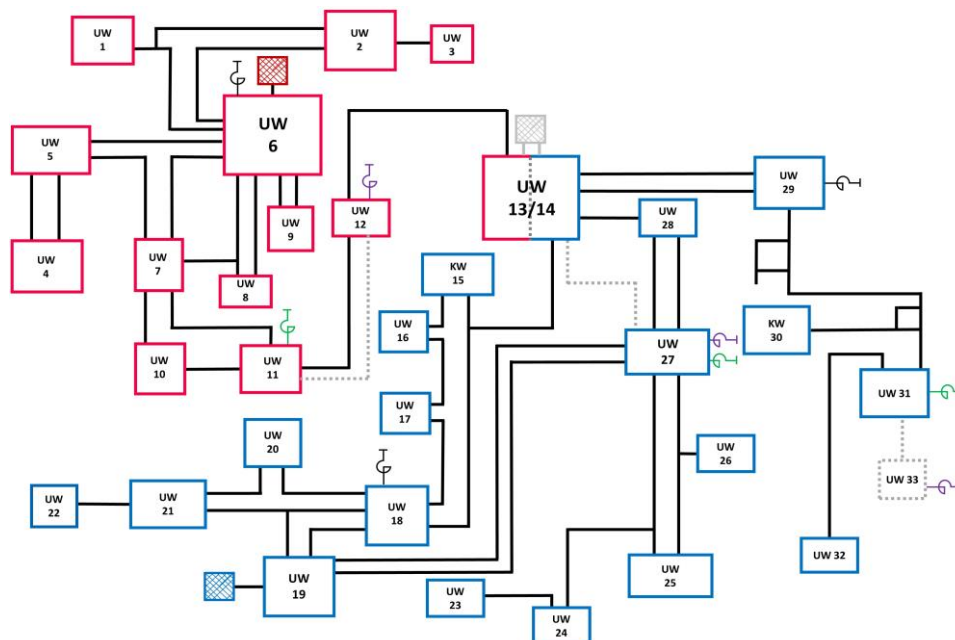


Abbildung 1: Übersichtsdarstellung 110-kV-Netz Salzburg schematisch

Die drei genannten Kabelstrecken verbinden bestehende bzw. geplante Umspannwerksstandorte. In Szenarien werden die eingezeichneten Kompensationsdrosseln in unterschiedlicher Positionierung und Blindleistungsstufe im Modell verbaut und das resultierende Spannungsniveau in einem Schwach- und Starklastfall betrachtet. Tabelle 1 stellt die Szenarien dar.

Tabelle 1: Betrachtete Simulationsfälle

Szenarienüberblick	
Referenzfall (ohne Kabelzubau)	Verteilte Kabelkompensation 3x
Verteilte Kabelkompensation 6x (3x + 3x)	Verteilte Kabelkompensation (3x + 3x) & zentrale Kompensationsdrosseln zur Blindleistungsbilanzierung (UW 6,18,29)

Zur Einordnung der Situation ist in Abbildung 2 der Verkabelungsgrad (prozentualer Anteil an Systemkilometern der jeweiligen Spannungsebene) gemäß Netzentwicklungsplan 2024 [3] sowie der daraus resultierende Anteil nach Einbau der zusätzlichen Kabelstrecken im 110-kV-Netz dargestellt. Ergänzend zum Verkabelungsgrad ist die Blindleistungserzeugung der Leitungskapazitäten auf Basis von [1] abgebildet und um die zusätzliche Blindleistungserzeugung der drei neuen Kabelstrecken erweitert. Der im Vergleich zur Hochspannung deutlich höhere Verkabelungsgrad im Mittel- und Niederspannungsnetz ist dabei klar ersichtlich.

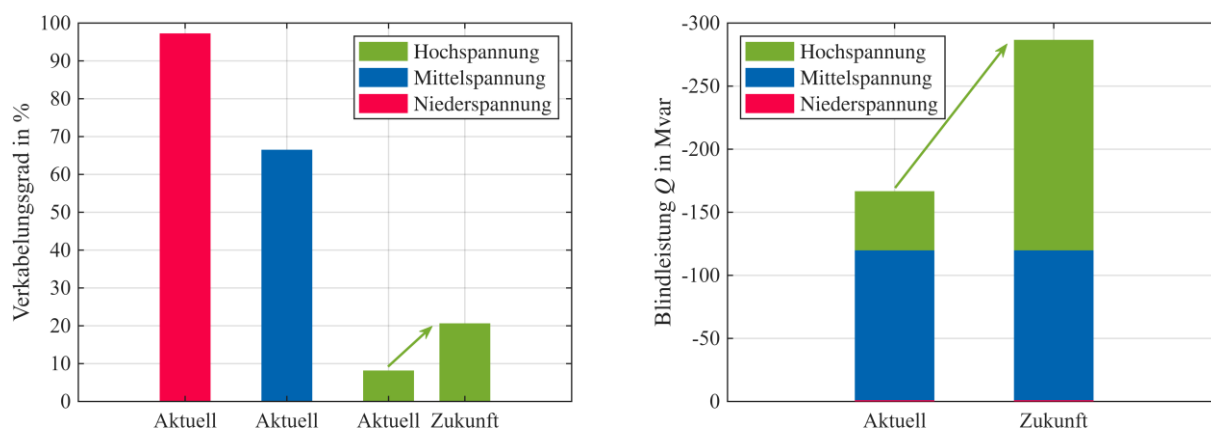


Abbildung 2: Verkabelungsgrad (links) und Blindleistungserzeugung (rechts) der Leitungen im Salzburger Verteilnetz nach Spannungsebene

Neben Leitungstyp und Leitungslänge ist für die resultierende Blindleistungserzeugung der Querkapazitäten insbesondere die Spannungsebene maßgeblich. In Schwachlastzeiten, bei unternatürlichem Betrieb der Leitungen, muss diese Blindleistungserzeugung ausreichend kompensiert werden. Hierfür können Blindleistungsregelungen der Einspeiser ($\cos(\varphi)$, $Q(U)$, usw.) oder FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) herangezogen werden. Im Gegensatz zur Blindleistungsregelung durch Einspeiser stehen Kompensationsdrosseln tageszeitunabhängig zur Verfügung und sind darüber hinaus kostengünstiger als FACTS [4].

Abbildung 3 zeigt die Spannungsabweichung ΔU relativ zur Nennspannung in Form von Boxplots für unterschiedliche Kompensationsszenarien. Als Referenzfälle dienen die Szenarien „Erzeugung“ (Schwachlast bei hoher Erzeugung) und „Hochlast“ (Starklast bei geringer Erzeugung). In beiden Fällen werden die Teilnetze getrennt betrieben; im Hochlastfall ist das UW 12 dem blauen Teilnetz zugeordnet. Diese Einteilung bleibt auch bei Einbau der Kabelstrecken unverändert (Slack 3 an UW 13/14).

Im Erzeugungsfall ergibt sich erwartungsgemäß eine Spannungsanhebung an den Netzknoten, wobei bei zusätzlichem Kabelzubau im 110-kV-Netz ohne Kompensation ein weiterer Spannungsanstieg zu beobachten ist. In sämtlichen Kompensationsszenarien kann das Spannungsniveau deutlich abgesenkt werden. Insbesondere nach der Erweiterung des Verteilnetzes um Slack 3 (UW 13/14) zeigt sich eine erhebliche Verbesserung des Spannungsniveaus.

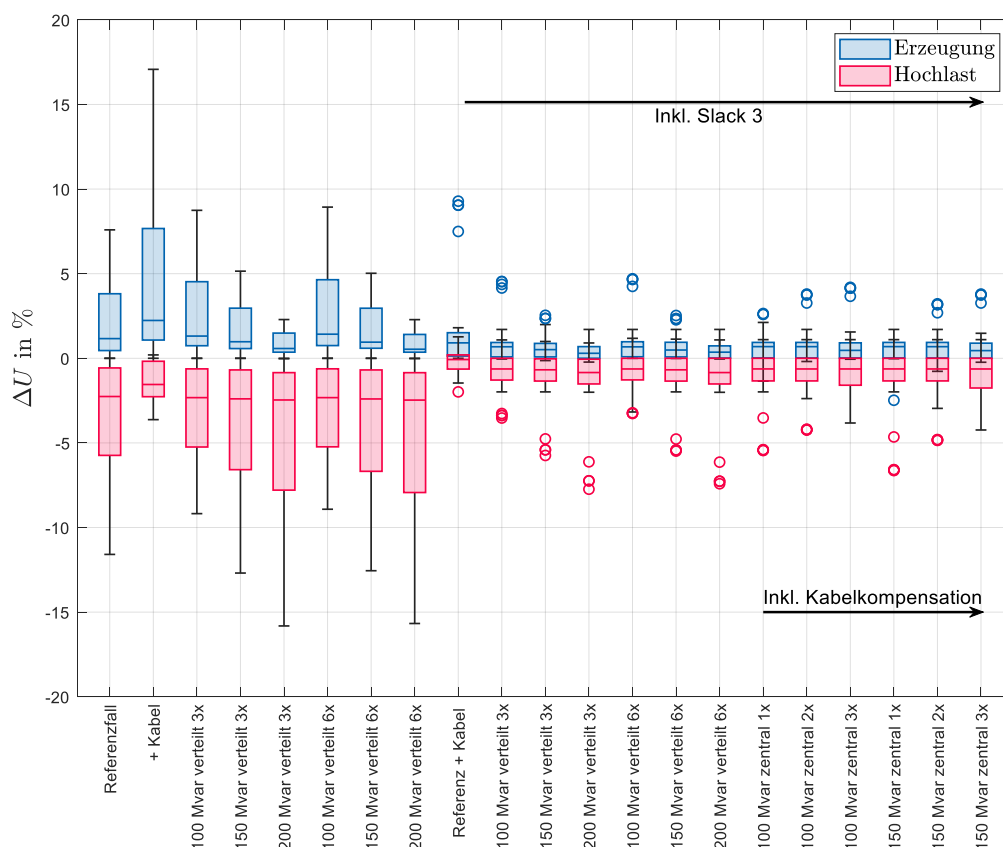


Abbildung 3: Boxplots der Spannungsabweichung ΔU in % für Erzeugung (blau) und Hochlast (rot).

Das Hinzufügen mehrerer nicht schaltbarer Kompensationsdrosseln führt zwar zu einer erheblichen Verbesserung der Situation im Erzeugungsfall, senkt jedoch im Hochlastfall das Spannungsniveau an den gewählten Drosselstandorten weiter ab. Auf Basis der dargestellten Untersuchungen zeigt sich, dass eine fixe Kompensation der Kabelstrecken direkt am Kabel in Kombination mit einer zentralen, schaltbaren Kompensationsdrossel in der Nähe des Slack-Knotens im roten Teilnetz (UW 6) eine geeignete Lösung darstellt. Im künftigen Szenario werden ein Kompensationsgrad der Kabel von 75 % sowie 50 Mvar in der Nähe der Übergabestelle zum Übertragungsnetzbetreiber (UW 6) angestrebt, wodurch sich ein flaches Spannungsprofil bzw. eine ausgeglichene Blindleistungsbilanz im 110-kV-Netz ergibt.

Abbildung 4 zeigt das resultierende Spannungsniveau im Referenz- sowie im künftigen Szenario. Die Umspannwerke sind gemäß dem Spannungsprofil des Referenzfalls „Erzeugung“ sortiert. In den zukünftigen Szenarien ist die Anbindung an den Übertragungsnetzbetreiber im UW 13/14 bereits berücksichtigt. Ergänzend zum Spannungsverlauf entlang der Umspannwerksstandorte ist die resultierende Blindleistungsbilanz an den Slack-Knoten dargestellt. Dabei wird deutlich, dass mit der Einführung von Slack 3 der Blindleistungsaustausch an Slack 1 und Slack 2 maßgeblich abnimmt. Die zentrale Drossel (50 Mvar) ist im Modell für das Szenario „Künftiges Szenario Hochlast“ abgeschaltet. Der Einfluss auf den Wirklastfluss wird in allen Szenarien nicht dargestellt, da – losgelöst vom Einbau der Hochspannungskabel – keine weiteren Änderungen beziehungsweise Steuerungen des Lastflusses erfolgen.

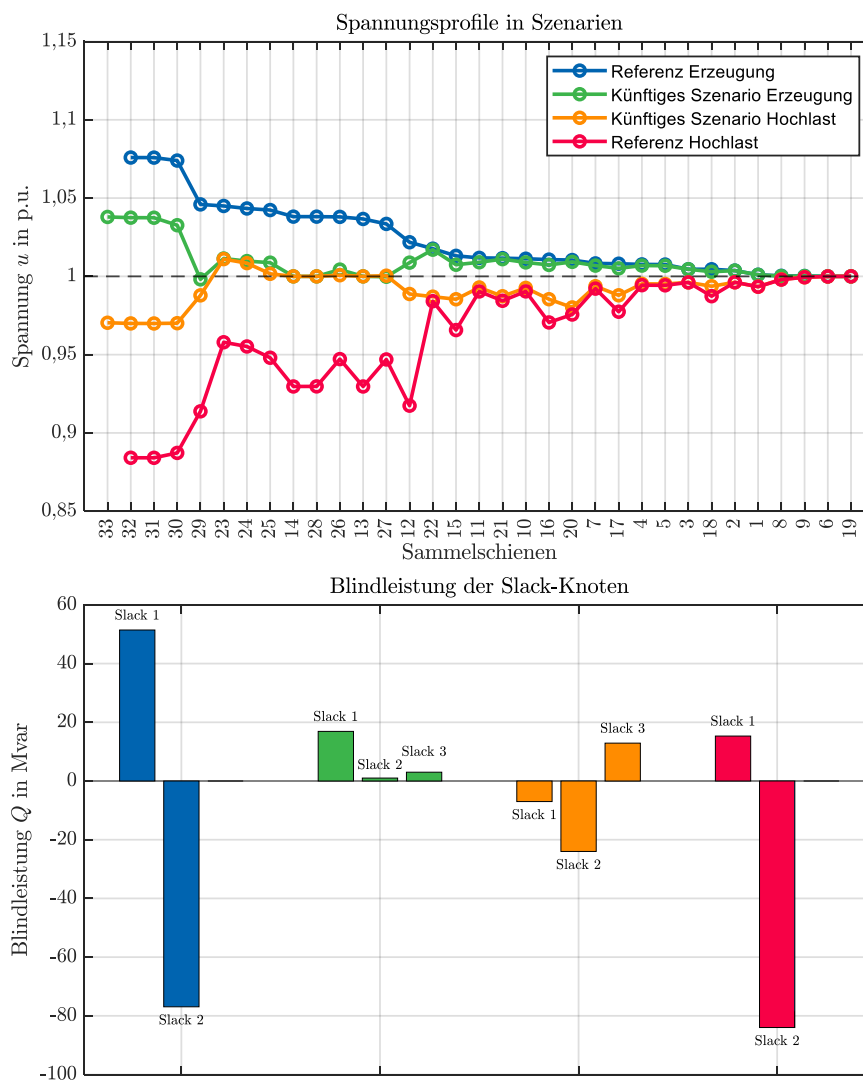


Abbildung 4: Spannungsprofil und resultierende Blindleistungsbilanz nach Umspannwerksstandorten gereiht

3 Schalten von Kompensationsdrosseln

Das Abschalten von Kompensationsdrosseln zählt zu den anspruchsvollsten Aufgaben für Leistungsschalter. Das gilt unabhängig vom Schaltprinzip und dem verwendeten Lösch- und Isoliermedium. Um sicherzustellen, dass die Betriebsmittelgrenzen von Leistungsschaltern, Transformatoren und Kompensationsdrosseln eingehalten werden, müssen verschiedene technische Aspekte berücksichtigt werden.

3.1 Normative Anforderungen

Es wird empfohlen, Leistungsschalter für das Schalten von Kompensationsdrosseln, neben der IEC 62271-100 [5] auch nach den Anforderungen der IEC 62271-110 [6] zu prüfen. Beim Abschaltvorgang wird der Strom im Stromnulldurchgang durch das Löschen des Lichtbogens abgeschaltet. Dies führt zur Anregung von gedämpften Schwingkreisen, welche in Abhängigkeit der vorhandenen Induktivitäten und Kapazitäten in Last- und Netzseite zu einer transienten wiederkehrenden Spannung u_{TRV} über der Schaltstrecke führen. Der Leistungsschalter muss in der Lage sein den in der Norm definierten Scheitelwert (u_c) und die Steilheit der wiederkehrenden Spannung $RRRV$ einzuhalten.

In der IEC 62271-110 [6] sind Prüfkreise mit zwei Lastkreisen für das Schalten von Drosseln mit unterschiedlichen Lastströmen definiert. Daraus resultieren minimale normgeprüfte Bemessungsblindleistungen von Kompensationsdrosseln für die 30- und 110-kV-Spannungsebene. Bei Unterschreitung des Prüfstroms im jeweiligen Anwendungsfall (geringere Blindleistung der Kompensationsdrossel) wird eine Abstimmung mit dem Schalterhersteller empfohlen.

Tabelle 2 gibt die Prüfströme und resultierenden genormten Bemessungsgrößen der Kompensationsdrosseln an.

Tabelle 2: Prüfströme laut IEC 62271-110 [6] inklusive der resultierenden normgeprüfte Bemessungsgrößen der Kompensationsdrosseln

Bemessungs- spannung	Prüfstrom Lastkreis 1		Prüfstrom Lastkreis 2	
	I_{LK1}	Q_{LK1}	I_{LK2}	Q_{LK2}
U_r kV	A	Mvar	A	Mvar
30	1600	83	500	26
110	315	60	100	19

3.2 Stromabriss und Wiederzündungen

Leistungsschalter sind für das Klären von Kurzschlussströmen im zweistelligen kA-Bereich ausgelegt, wobei es beim Abschalten von kleinen induktiven Strömen (wie bei Kompensationsdrosseln) zu zwei Besonderheiten kommt.

Bei langen Lichtbogenzeiten kann der Lichtbogen vor dem Stromnulldurchgang erlöschen, wobei es zu einem Stromabriss kommt. Da die Drossel aufgrund ihrer hohen Induktivität den Strom weitertreibt, wird diese gespeicherte magnetische Energie in die Kapazitäten des Drosselabganges umgeladen. Diese Kapazitäten sind jedoch aufgrund des kurzen Zuleitungskabels sehr gering (nF-Bereich), was zu hohen Spannungsspitzen im lastkreisseitigen Schwingkreis führt. Der Einfluss ist in [7] detaillierter dargestellt.

Ist die wiederkehrende Spannung über den Leistungsschalter steiler oder höher als die Wiederverfestigungskennlinie des Schalters, führt dies zu Wiederzündungen. Bei geringen Schalterpolabständen (kurzen Lichtbogenzeiten) kann es nach dem ersten Stromnulldurchgang aufgrund der Überschreitung der Isolationsfähigkeit des Schalters zu Wiederzündungen kommen. Diese hochfrequenten Wiederzündungen können aufgrund von steilen Spannungsanstiegen zu Beschädigungen der nahen gelegenen Betriebsmittel führen.

3.3 Ergebnisse eines exemplarischen Schaltvorganges

Dieser Beitrag geht auf einen exemplarischen Abschaltvorgang einer Kompensationsdrossel an einem eigenen Umspannungsabgang ein. Das 110-kV-Netz ist über eine Ersatzspannungsquelle mit einer Kurzschlussleistung von $S_k = 2 \text{ GVA}$ ($X/R = 10$) und einer Bemessungsspannung von $U_r = 110 \text{ kV}$ modelliert. Das untersuchte Umspannwerk ist über ein Kabel mit einer Länge von 15 km an das Netz angebunden. Der Stromabriss ist mit 5 A angenommen und die Drossel in Stern mit isoliertem Sternpunkt verschalten. Abbildung 5 zeigt das Einlinienschaltbild des 110-kV-Drosselabganges mit einer zentralen Kompensationsdrossel, wobei der untersuchte Leistungsschalter grün umrahmt ist.

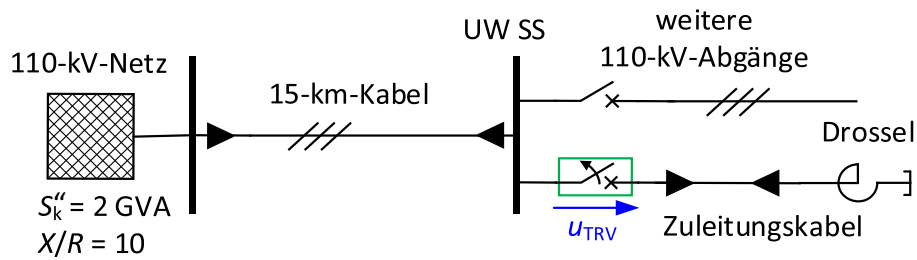


Abbildung 5: Einlinienschaltbild eines 110-kV-Drosselabganges

Abbildung 6 zeigt links die 3-polige transiente wiederkehrende Spannung beim Abschaltvorgang mit dem Lastkreis 1 (60 Mvar) im zeitlichen Verlauf. Der Abschaltbefehl kommt zum Zeitpunkt 5 ms, wobei in Phase b der erste Stromnulldurchgang erfolgt und diese somit zum erstlöschenden Pol wird. Der erstlöschende Pol (Phase b – blau) erreicht aufgrund des Polfaktors im gelöschten 110-kV-Netz die höchste Spannung über den Leistungsschalter [7].

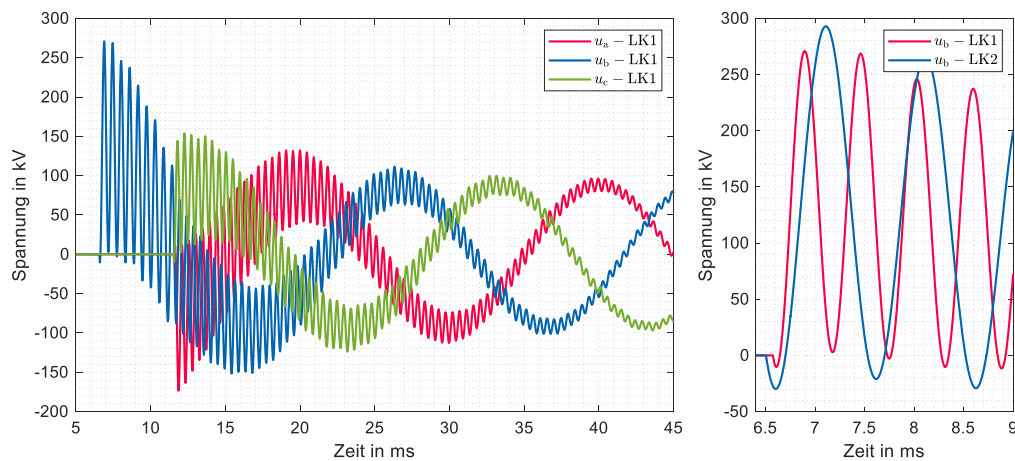


Abbildung 6: 3-polige transiente wiederkehrende Spannung von Lastkreis 1 (links) und Vergleich des erstlöschenden Poles von Lastkreis 1 (rot) und Lastkreis 2 (blau) (rechts)

Abbildung 6 zeigt rechts die Spannung des erstlöschenden Poles von Lastkreis 1 (rot – 60 Mvar) und Lastkreis 2 (blau – 19 Mvar). Mit gleich hohem Stromabriss von 5 A erreicht die Spannung von Lastkreis 2 (blau) einen höheren Scheitelwert. Im Gegensatz dazu ist die Spannungssteilheit von Lastkreis 1 (rot) steiler als die von Lastkreis 2. Der verwendete Leistungsschalter muss in der Lage sein, der Steilheit und dem Scheitelwert der wiederkehrenden Spannung standzuhalten.

3.4 Zusammenfassung und Erkenntnisse

Für erfolgreiches Schalten von Kompensationsdrosseln muss in Abhängigkeit der Topologie eine geeignete Wahl der Betriebsmittel einschließlich des Leistungsschalters erfolgen. Die wichtigsten Auslegungskriterien beim Abschaltvorgang können wie folgt zusammengefasst werden:

- Leistungsschalter, welche Kompensationsdrosseln schalten, sollen neben der IEC 62271-100 [5] auch nach IEC 62271-110 [6] geprüft werden.
- Die Sternpunktbehandlung des Netzes, sowie der Drossel haben einen Einfluss auf die Spannung des erstlöschenden Poles, welcher über den Polfaktor berücksichtigt ist.
- Nach IEC 62271-110 [6] sind für das Unterbrechen kleiner induktiver Ströme Lastkreise mit definierten Prüfströmen vorgegeben, welche eine minimale normgeprüfte Bemessungsleistung für Kompensationsdrosseln definieren.
- Für Vakuum-Leistungsschalter in der 30- und 110-kV-Netzebene wird die Verwendung von RC-Dämpfungsgliedern zur Dämpfung von Wiederzündungen empfohlen.
- Als weitere Mitigation-Methode wird das Durchführen von „gesteuertem Schalten“, welches jedoch die Installation eines Leistungsschalters mit getrennten Antrieben der Pole voraussetzt, empfohlen.

Für projektbezogene genauere Betrachtungen müssen detaillierte Daten zur Verfügung gestellt werden. Konkret können unterschiedliche Kabeltypen, Kabellängen, Drosseltypen, Bemessungsleistungen, Lasten, Transformatoren und die Berücksichtigung weiterer Betriebsmittel (z.B. Wandler) die Ergebnisse beeinflussen.

4 Praktische Umsetzung

Im Zuge der geplanten 110-kV-Kabelprojekte werden die Erkenntnisse der Studie in der Praxis umgesetzt. Die ersten beiden betroffenen Projekte decken eine zentrale Kompensation, zur Übergabe an den Übertragungsnetzbetreiber, sowie eine dezentrale Kompensation einer geplanten Kabelstrecke mit einer Länge von ca. 15 km ab.

Grundlegend stellen sich aus Sicht des Netzbetreibers noch folgende Fragen für die Umsetzung der beiden Projekte:

- Welche Drossel-Technologie wird verwendet? (Öl-Drossel oder Luft-Drossel)
- Wo werden die Drosseln, insbesondere aufgrund des Platzbedarfs, platziert?
- Wie erfolgt die Optimierung des Schaltverhaltens? (RC-Dämpfungsglied oder gesteuertes Schalten)

4.1 Drossel-Technologie und Platzierung

Als Technologie für die zu verbauenden Drosseln stehen Öl-Drosseln sowie Luft-Drosseln zur Auswahl. Die beiden Technologien unterscheiden sich grundlegend in der Art der Isolation, dem Platzbedarf, der Steuerbarkeit sowie dem Emissionsverhalten hinsichtlich elektromagnetischer Felder und Lärm. Als Entscheidungsgrundlage für den Netzbetreiber sind insbesondere der Platzbedarf sowie die mögliche Stufung (Einstellung mit Stufensteller) der Kompensationsleistung relevant.

Das Steuern der Drosseln wird jedoch im ersten Umsetzungsschritt sowohl für die zentrale als auch für die dezentrale Drossel nicht angestrebt. Da der Platzbedarf an beiden geplanten Standorten stark limitiert ist, fiel die Wahl auf eine Öl-Drossel.

Die Aufstellung der Drosseln erfolgt bei beiden Projekten in Form eines nicht eingehausten Fundaments mit Ölwanne. Bei der dezentralen Kompensation erfolgt dies entgegen den Studienergebnissen stets nur auf einer Seite des Kabels. Dies resultiert ebenfalls aus den limitierten Platzverhältnissen in den jeweiligen Umspannwerken.

4.2 Optimierung des Schaltverhaltens

Bei der Optimierung des Schaltverhaltens wurde zusätzlich zur durchgeführten Studie die Expertise der Schaltanlagen-Hersteller vom Netzbetreiber eingeholt. Grundsätzlich decken sich die Kernaussagen der Hersteller mit den Studienergebnissen.

Um weitere 110-kV-Komponenten zu vermeiden und dennoch das Schaltverhalten der zentralen Kompensations-Drossel zu optimieren, wird ein einzelpolgesteuerter Leistungsschalter eingesetzt. Mit Hilfe dieses Schalters kann ein gesteuertes Schalten sowohl bei der Zu- als auch bei der Abschaltung der Drossel realisiert werden. Dies beeinflusst auch die Konfiguration der Schutzgeräte.

Bei der Beschaffung der Schaltgeräte für die Kompensationsdrosseln wird unter Berücksichtigung der Kabel-, Netz- und Drosselaten ein zusätzlich nach IEC 62271-110 [6] geprüfter Schalter vom Hersteller gefordert. Dies wird im Zuge der Ausschreibung fixiert. Ein gesteuertes Schalten bei Drosseln direkt am Kabel ist aktuell nicht vorgesehen.

5 Ausblick

Die aus der Studie gewonnenen Erkenntnisse werden in den kommenden Jahren vom Netzbetreiber, sofern es die Platzverhältnisse der Umspannwerksstandorte erlauben, in der Praxis umgesetzt. In einem ersten Schritt handelt es sich bei den Projekten um die Inbetriebnahme einer Schaltanlage mit zentraler Kompensationsdrossel sowie die Inbetriebnahme einer 110-kV-Kabelstrecke mit Kompensationsdrossel.

Es folgen weitere umfangreiche Simulationen hinsichtlich der Schaltheandlungen, resultierenden transienten Überspannungen und möglicherweise auftretender Einschränkungen anhand von konkreten Projektdaten.

Im Anschluss an die Umsetzung werden vom Netzbetreiber Messungen durchgeführt, um die Studienergebnisse in der Praxis zu verifizieren und weitere Verbesserungen für die Anlagen- und Schutzkonfiguration daraus abzuleiten.

6 Referenzen

- [1] C. Groß, D. Grubinger und R. Schwalbe, „Blindleistungsbilanz im Salzburger Verteilnetz,“ Symposium Energieinnovation, Technische Universität Graz, 2018.
- [2] C. Groß, „Darstellungsvarianten von 15-min Zeitreihen zur effizienten Analyse des Strom-Verteilernetzes,“ Symposium Energieinnovation, Technische Universität Graz, 2024.
- [3] Salzburg Netz GmbH, „Netzentwicklungsplan für das Verteilernetz der Salzburg Netz GmbH,“ Salzburg Netz GmbH, Salzburg, 2024.
- [4] 50Hertz, Amprion, TenneT, TransnetBW, „Kostenschätzungen Netzentwicklungsplan Strom 2025,“ Bundesnetzagentur, Bonn, 2025.
- [5] OVE, „OVE EN IEC 62271-100: Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen, Teil 100: Wechselstrom-Leistungsschalter,“ OVE, Wien, 2023.
- [6] OVE, „OVE EN IEC 62271-110: Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen, Teil 110: Schalten induktiver Lasten,“ OVE, Wien, 2018.
- [7] P. Hackl, K. Friedl, R. Schürhuber, B. Heimbach, B. Wartmann und A. Casura, „Switching overvoltages caused by shunt reactor switching and mitigation methods,“ CIRED, Rome, 2023.