

Metastudie zur Spannungsstabilität

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SYS STAB 2030

SysStab2030 bündelt die Kompetenzen von Übertragungsnetzbetreibern, Forschungseinrichtungen, Industrie und Zertifizierern um die Systemstabilität in einem zunehmend stromrichterdominierten Energiesystem zu sichern. Im Zentrum steht die Frage, wie die erforderlichen Systembedarfe ermittelt und durch Erzeugungsanlagen und Verbraucher über technische Mindestanforderungen oder marktliche Beschaffung am besten gedeckt werden sollen. Das Ziel hierbei ist es, schon innerhalb des Projekts einen Branchenkonsens abzubilden, sodass die Umsetzung in den technischen Mindestanforderungen beschleunigt wird. Dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhaben wird an vielen Stellen mit der BMW-Roadmap Systemstabilität verknüpft, um sowohl Prozesse aus der BMW-Roadmap zu bedienen als auch um Ergebnisse aus der BMW-Roadmap im Verbundprojekt weiterzuverwenden. Expertinnen und Experten von insgesamt 13 geförderten sowie neun assoziierten Partnern arbeiten gemeinsam an Lösungen, um die Systemstabilität bei Fortschreiten der immensen Herausforderungen von Struktur- und Netznutzungswandel auch in Zukunft zu gewährleisten. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie fördert das Forschungsprojekt mit über 5 Millionen Euro.

Publikationsdetails

Bitte zitieren Sie folgendes Dokument als:

Verbundvorhaben SysStab2030 – Metastudie zur Spannungsstabilität

Erstellt als Teil des Vorhabens:

Verbundvorhaben SysStab2030 – Systemstabilität durch marktbasierte Systemdienstleistungen und technische Mindestanforderungen an zukünftige elektrische Anlagen

Version 1.0

22.06.2026



Unter diesem QR Code
steht diese Publikation
als PDF-Download zur
Verfügung

Kontakt:

www.sysstab2030.de

sysstab2030@amprion.net

Autoren:

Universität Stuttgart: Svenja Eberspächer, Hassan Abouelgheit

TenneT TSO GmbH: Mojtaba Momeni

Amprion GmbH: Dr. Maik Schönefeld

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert:

Bewilligungszeitraum: 01.07.2024 – 31.12.2026

Förderkennzeichen: 03EI6122

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis.....	v
1 Begriffsdefinition der Spannungsstabilität	1
1.1 Definition und Klassifikation.....	1
1.2 Abgrenzung zu anderen Stabilitätsaspekten.....	1
2 Historische Störereignisse mit Gefährdung der Spannungsstabilität	3
3 Ursachen für Spannungsinstabilitäten	5
4 Bedarfsbetrachtung für ein stabiles System der Zukunft.....	6
4.1 Handlungsbedarf durch Energiewendeziele.....	6
4.2 Aktuelle Situation und Handhabe in Deutschland	6
4.3 Aktivitäten auf ENTSO-E-Ebene.....	7
5 Voraussetzung für Spannungsstabilität	8
5.1 Metriken zur Beurteilung der Spannungsstabilität.....	8
5.2 Definition des betrachteten Spannungsstabilitätsaspekts in SysStab2030.....	9
6 Maßnahmen zur Vermeidung von Spannungs-instabilität	10
6.1 Ein- und Ausschalten von Kondensatorbänken.....	10
6.2 Ein- und Ausschalten von Kompensationsspulen.....	10
6.3 Blockierung von automatischen Transformator-Stufenschalter	10
6.4 Lastabwurf.....	11
7 Beitrag heutiger und zukünftiger Anlagen zur Spannungsstabilität	12
7.1 Passive Blindleistungskompensationsanlagen.....	12
7.2 Dynamische Blindleistungskompensationsanlagen.....	13
8 Literaturverzeichnis	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Klassifikation der Systemstabilität von Elektrizitätsversorgungssystemen [1]	1
Abbildung 2:	Globale Störereignisse und ihre Auswirkung auf die Bevölkerung (eigene Abbildung)	4
Abbildung 3:	Schematische Darstellung einer SVC-Anlage.....	14
Abbildung 4:	Schematische Darstellung einer STATCOM-Anlage.....	15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der relevanten Metriken für Spannungsstabilität	8
------------	---	---

1 Begriffsdefinition der Spannungsstabilität

1.1 Definition und Klassifikation

Im Allgemeinen beschreibt die Systemstabilität die Fähigkeit eines elektrischen Verbundsystems, nach einer Störung wieder einen neuen stationären Betriebspunkt zu erreichen. Der Erhalt der Systemstabilität ist somit eine grundlegende Voraussetzung für den sicheren Netzbetrieb.

In Abhängigkeit der betrachteten Phänomene und Zeitbereiche wurde in [1] eine Definition und Klassifikation der Systemstabilität vorgenommen. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt:

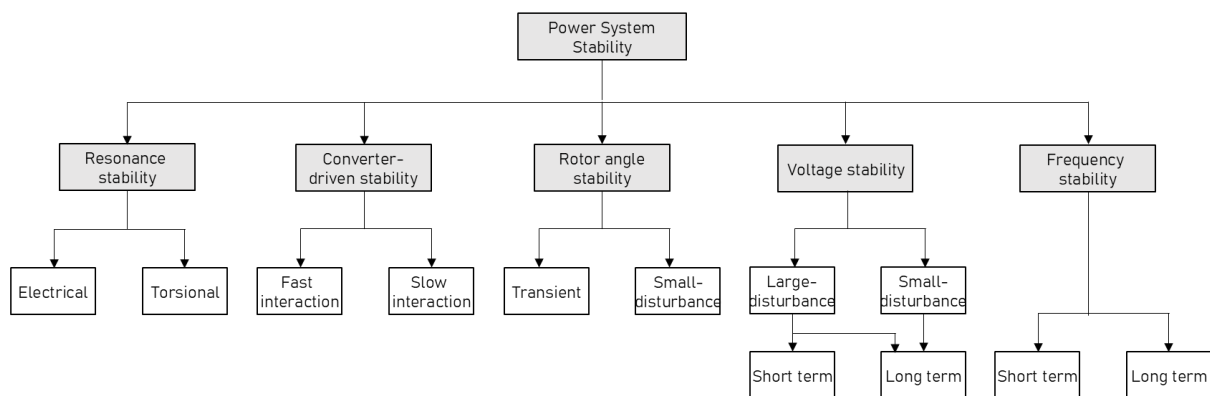


Abbildung 1: Klassifikation der Systemstabilität von Elektrizitätsversorgungssystemen [1]

Spannungsstabilität beschreibt nach [1] die Fähigkeit eines elektrischen Energieversorgungssystems, die Spannung an allen Knotenpunkten innerhalb eines zulässigen Bereichs zu halten, insbesondere nach einer Störung oder Laständerung und steht im Fokus dieser Meta-Studie.

Untersuchungen der Spannungsstabilität können infolge von Klein- (bspw. Schalthandlungen oder Lastrauschen) oder Großsignalstörungen (bspw. Kurzschlüsse) vorgenommen werden. Während der Fokus bei der Betrachtung von Kleinsignalstörungen auf der Langzeitspannungsstabilität liegt, werden Großsignalstörungen auf Basis der Zeitkonstanten der betrachteten dynamischen (Ausgleichs-) Vorgänge in Kurzzeit- und/oder Langzeitspannungsstabilitätsuntersuchungen betrachtet.

1.2 Abgrenzung zu anderen Stabilitätsaspekten

Abgrenzung zur Rotorwinkelstabilität: Rotorwinkelstabilität bezieht sich auf die Fähigkeit eines synchronen Generators, im Gleichgewicht zu bleiben und synchron mit dem Rest des Systems zu arbeiten. Während Spannungsstabilität sich auf die

Spannungsgrößen im System konzentriert, bezieht sich Rotorwinkelstabilität auf die mechanisch-elektrische Dynamik des Generators.

2 Historische Störereignisse mit Gefährdung der Spannungsstabilität

In der Historie gab es bereits einige Störfälle, die auf Spannungsinstabilitäten zurückzuführen waren. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

Nordamerika (USA und Kanada) – 2003

Am 14. August 2003 ereignete sich der größte Blackout in der Geschichte Nordamerikas, der über 50 Millionen Menschen in den USA und Kanada betraf. Die Ursachen lagen in einer Kombination aus Überlastung des Netzes, unzureichender Blindleistung und fehlerhaften Systemen zur Überwachung und Steuerung der Netzstabilität. Die Spannungsinstabilität führte zu einer Kettenreaktion von Netzabschaltungen und Stromausfällen.

Nordeuropa (Dänemark, Schweden) – 2003

Am 23. September 2003 führte ein Fehler in einem schwedischen Umspannwerk zu einem Spannungsabfall und Instabilitäten im Netz. Dies führte zu einem großflächigen Stromausfall, der etwa 4 Millionen Menschen in Dänemark und Schweden betraf. Die Instabilität wurde durch mangelnde Blindleistung und Überlastung des Netzes verschärft.

Italien – 2003

Am 28. September 2003 erlebte Italien einen weitreichenden Stromausfall, der fast das gesamte Land betraf und etwa 56 Millionen Menschen ohne Strom ließ. Der Blackout begann mit einem Kurzschluss in der Schweiz und führte zu einer Kaskade von Ereignissen, die Spannungsinstabilität und letztlich den Zusammenbruch des Netzes verursachten.

Brasilien – 2009

Am 10. November 2009 führte ein Fehler in einem Umspannwerk und ein darauffolgender Spannungsabfall zu einem massiven Stromausfall, der weite Teile Brasiliens und Paraguays betraf. Etwa 60 Millionen Menschen waren ohne Strom. Die Spannungsinstabilität war eine Folge von Problemen in der Blindleistungsregelung und der Übertragungskapazität.

Indien – 2012

Am 30. und 31. Juli 2012 erlebte Indien zwei der größten Stromausfälle in der Geschichte, die rund 620 Millionen Menschen betrafen. Die Blackouts wurden durch eine Kombination aus Überlastung des Netzes, unzureichender Infrastruktur und

Spannungsinstabilitäten verursacht. Der hohe Energiebedarf und unzureichende Blindleistung trugen wesentlich zur Eskalation der Situation bei.

Türkei – 2015

Am 31. März 2015 führte ein technischer Fehler im Übertragungsnetz zu einem landesweiten Stromausfall, der fast das gesamte Land betraf. Die Spannungsinstabilität resultierte aus einer unzureichenden Blindleistung und einer hohen Belastung des Netzes, was zu einer Kaskade von Ausfällen führte.

Pakistan – 2023

Am 23. Januar 2023 erlebte Pakistan einen großflächigen Stromausfall, der viele Regionen des Landes betraf und ca. 220 Millionen Menschen stromlos ließ. Zum Zeitpunkt des Blackouts ging ein 500 MW Windpark in Betrieb, was zu einem Anstieg in der Netzspannung. Zusätzlich wurde ein Wasserkraftwerk vom Netz getrennt, wodurch eine große Menge an Blindleistung verloren ging. Die Netzspannung hat die zulässigen Grenzen überschritten und mehrere Schutzeinrichtungen wurden ausgelöst.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass viele der historischen Störfälle auf Überlastungen des Netzes und/oder eine unzureichende Blindleistungsbereitstellung zurückzuführen sind. Im folgenden Kapitel werden die Ursachen für Spannungsinstabilitäten im Allgemeinen kurz erläutert. Abbildung 2 zeigt eine Weltkarte mit den größten spannungsbezogenen Störereignissen und die davon betroffenen Menschen.

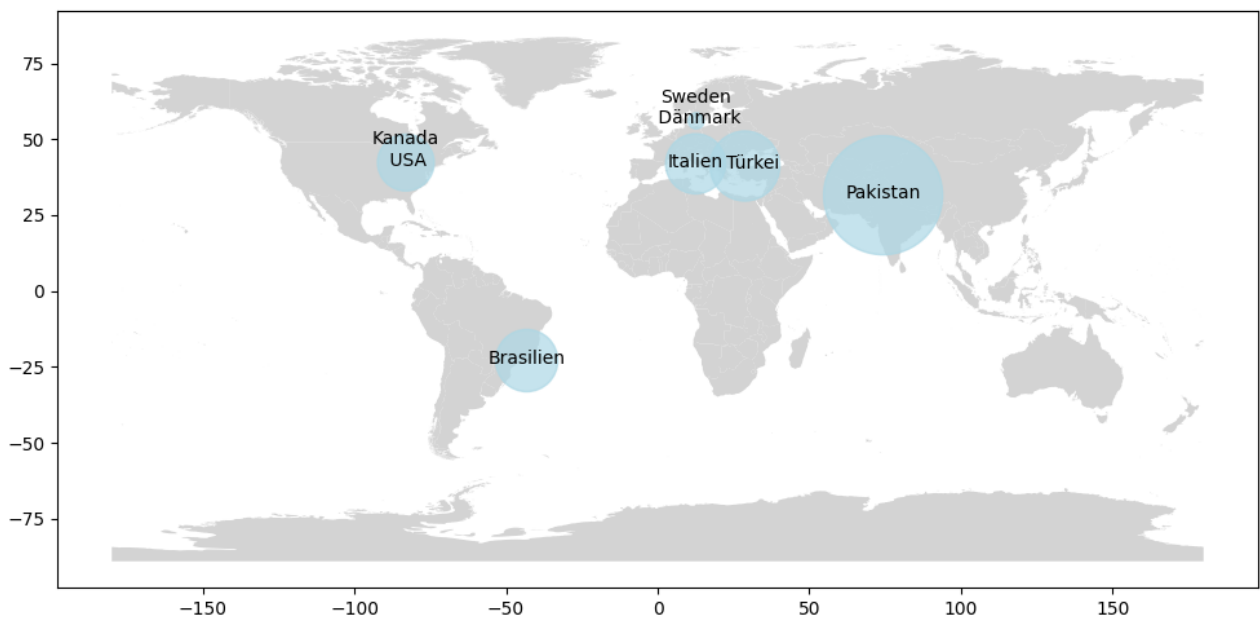


Abbildung 2: Globale Störereignisse und ihre Auswirkung auf die Bevölkerung (eigene Abbildung)

3 Ursachen für Spannungsinstabilitäten

Zu stark bzw. überlastete Netze können die Ursache für Spannungsinstabilitäten sein. Wenn hohe Leistungstransite stattfinden, wird das Netz oft nahe seiner Spannungsstabilitätsgrenze betrieben. Wird diese Grenze – auch als Kipppunkt oder Bifurkationspunkt bezeichnet – überschritten, kann dies zu einer Instabilität der Spannung führen.

Zur Aufrechterhaltung des Netzbetriebs ist eine ausreichende Blindleistungsbereitstellung erforderlich, da diese essenziell für die Regelung der Spannung im Netz ist. Ein Blindleistungsdefizit kann folglich zu Spannungsinstabilitäten führen [1].

Zudem treten in Regionen mit schwach vermaschter Netzstruktur oder einem geringen Kurzschlussleistungsverhältnis häufiger Spannungsprobleme auf. Diese sogenannten schwachen Netze sind anfälliger für Instabilitäten, was die Zuverlässigkeit der Stromversorgung beeinträchtigen kann.

4 Bedarfsbetrachtung für ein stabiles System der Zukunft

4.1 Handlungsbedarf durch Energiewendeziele

Während in der Vergangenheit konventionelle Erzeugungsanlagen mit Anschluss an das Übertragungsnetz in der Nähe von Lastzentren errichtet wurden, werden EE-Anlagen in Abhängigkeit des Dargebots an Wind (bei Windenergieanlagen) bzw. solaren Einstrahlung (bei PV-Anlagen) und aufgrund ihrer geringeren Anschlussleistung vornehmlich in der unterlagerten Verteilnetzebene angeschlossen. Die wachsende räumliche Divergenz zwischen Erzeugung und Verbrauch einhergehend mit der Integration von dezentralen Erzeugungsanlagen und einem verzögerten Netzausbau führt folgend zu erhöhten Leistungstransiten und einer volatileren Netzbelastung. Aus der Höherauslastung der Netze resultiert ein überproportionaler Anstieg der spannungshebenden Blindleistungsbedarfe, aus situativ schwach ausgelasteten Netzen in Kombination mit dem voranschreitenden Netzausbau wiederum resultiert ein spannungssenkender Blindleistungsbedarf. Neben dem erhöhten Blindleistungsbedarf im störungsfreien Betrieb ist zudem zu überprüfen, inwiefern in Fehlerfällen – insbesondere bei Kurzschlüssen – sichergestellt werden kann, dass der sich ausbreitende Spannungstrichter nicht zu einer ungewollten Trennung von Erzeugungsanlagen und Lasten vom Netz führt. Eine ausreichende Spannungsstützung im Fehlerfall ist folglich erforderlich.

4.2 Aktuelle Situation und Handhabe in Deutschland

Die deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) haben in der Vergangenheit in ihrem Begleitdokument Systemstabilität des Netzentwicklungsplans Analysen zur Spannungsstabilität durchgeführt. Diese Analysen umfassen sowohl transiente Stabilitätsanalysen anhand von Zeitbereichssimulationen als auch die stationäre Spannungshaltung bzw. Blindleistungsbilanzierung.

Blindleistung ist unerlässlich zur Spannungsregelung und Stabilität des Stromnetzes. Eine ausgewogene Blindleistungsbilanz ist notwendig, um Spannungsinstabilitäten zu vermeiden. Die Sicherstellung der Blindleistungsbilanz kann unter anderem durch die Installation und den Einsatz von statischen Kompensationsanlagen (STATCOMs), rotierenden Phasenschieberanlagen, Kompensationsspulen und Kondensatorbänken sichergestellt werden. Außerdem können dezentrale Erzeugungsanlagen über die geforderten technischen Mindestanforderungen hinaus dem jeweiligen Anschlussnetzbetreiber zusätzliche

Blindleistung über den Blindleistungsmarkt bereitstellen. Für weitere Erläuterungen dazu siehe AP6.1.

Transiente Stabilität bezieht sich auf die Fähigkeit des Systems, nach großen Störungen, wie Kurzschlüssen oder dem Ausfall großer Lasten oder Erzeugungseinheiten, synchron zu bleiben. Diese Art der Untersuchungen wird im Rahmen der gesetzlichen Prozesse durch die ÜNB auf Basis von Zeitbereichssimulationen des Mitsystems (RMS-Simulationen) durchgeführt und umfasst sowohl die Analyse der Rotorwinkel- als auch der (Kurzzeit-) Spannungsstabilität. Technische Bedarfe zur Sicherstellung der Spannungsstabilität auf Basis dieser Untersuchungen wurden bislang nicht ermittelt. In Variantenrechnungen wurde im Begleitdokument Systemstabilität des Netzentwicklungsplans 2037/2045 (Version 2023) jedoch geprüft, welche Maßnahmen zu einer verbesserten Spannungsstützung eingesetzt werden können. Dazu zählten die Erhöhung der sogenannten Blindstromstatik von Windenergieanlagen, die Anpassung der Blindstromstatik von STATCOM-Anlagen mit einer resultierenden höheren Blindstromstützung im Fehlerfall sowie die Annahme eines netzdienlichen Verhaltens in Form einer Blindstromstützung von zukünftig im System zu erwartenden Elektrolyseuranlagen.

4.3 Aktivitäten auf ENTSO-E-Ebene

Zum aktuellen Zeitpunkt wird die Spannungsstabilität bei der ENTSO-E nicht Übertragungsnetzbetreiber-übergreifend betrachtet. Dies liegt darin begründet, dass es sich bei der Untersuchung der Spannungsstabilität in der Regel um lokal betrachtete Phänomene handelt.

5 Voraussetzung für Spannungsstabilität

Die Spannungsstabilität ist gewährleistet, wenn die Spannung im gesamten Netz – auch bei Änderungen der Einspeisung und Last oder bei Störungen – durch eine ausgeglichene Blindleistungsbilanz innerhalb der festgelegten Grenzwerte stabilisiert werden kann [2]. Hier wird zwischen Langzeit- und Kurzzeit-Spannungsstabilität unterschieden. Die Langzeit-Spannungsstabilität ist die Fähigkeit eines Systems, kleine Änderungen um den Arbeitspunkt ohne Verlust der Stabilität ausgleichen zu können, wobei Die Kurzzeit-Spannungsstabilität ist die Fähigkeit eines Systems, nach einem Kurzschluss eine stabile stationäre Spannung zu erreichen [3].

5.1 Metriken zur Beurteilung der Spannungsstabilität

Zur Beurteilung der Spannungshaltung und der damit verbundenen Spannungsstabilität kommen unterschiedliche Metriken zum Einsatz. Sie werden sowohl in der Planungsphase als auch im Netzbetrieb angewendet und basieren typischerweise auf der Analyse der Trajektorien relevanter Systemgrößen, insbesondere der Knotenspannungen. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der relevanten Metriken in dieser Studie. Diese Metriken werden im AP 1.4 Metriken zur Spannungsstabilität ausführlich beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht der relevanten Metriken für Spannungsstabilität

Metrik		Anwendung
Spannungsprofil	Langzeit-Spannungsstabilität	Bewertung der Spannungshaltung.
Spannungsstabilitätsindex	Langzeit-Spannungsstabilität	Bewertung der Spannungshaltung.
Spannungsstabilitätsmarge	Langzeit-Spannungsstabilität	Bewertung der Spannungshaltung
Trajectory Violation Integral (TVI)	Kurzzeit-Spannungsstabilität	Bewertung der Spannungsstabilität
Betrachtung der Eigenwerte im Zusammenhang einer Q-V-Modalanalyse	Langzeit-Spannungsstabilität	Bewertung der Spannungshaltung
Einhaltung der LVRT-Kennlinie	Langzeit-Spannungsstabilität	Bewertung der Spannungshaltung
Blindleistungsreserve	Langzeit- und Kurzzeit-Spannungsstabilität	Ermittlung der Blindleistungsreserve in Echtzeit

5.2 Definition des betrachteten Spannungsstabilitätsaspekts in SysStab2030

Im Rahmen des Projektes SysStab2030 werden Aspekte für Spannungsstabilität wie z.B. Kurzzeit- bzw. Langzeitstabilitäten untersucht. Außerdem werden weitere Aspekte wie Blindleistungsreserve sowie Methoden zur Ermittlung des Blindleistungsbedarfs analysiert. Bei Bedarf können die bestehenden Methoden weiterentwickelt bzw. optimiert werden. Systemphänomene wie Spannungskollaps und Spannungseinbrüche werden berücksichtigt.

6 Maßnahmen zur Vermeidung von Spannungsinstabilität

Die Maßnahmen gegen Spannungsinstabilitäten sind in erster Linie während der Systemplanung vorzunehmen. Die Gegenmaßnahmen können in zwei Kategorien unterteilt, und zwar planerische Maßnahmen sowie betriebliche Maßnahmen. Für die planerischen Maßnahmen gilt zum Beispiel der Ausbau von Anlagen, die über Blindstromstützungsfähigkeit bzw. netzbildenden Eigenschaften verfügen. Die planerischen Maßnahmen werden kurz in Kapitel 7 erklärt. Die betrieblichen Maßnahmen können beispielsweise das Einschalten von Kondensatorbanken, der Einsatz von FACTS-Betriebsmitteln, die Blockierung von Transformatoren-Stufenschalter oder Lastabwurf sein. Im nächsten Abschnitt werden diese Gegenmaßnahmen erklärt.

6.1 Ein- und Ausschalten von Kondensatorbänken

Das Ein- und Ausschalten von Kondensatorbanken dient zur Spannungsstabilisierung und Verbesserung der Spannungsqualität. Bei induktiven Lasten können Kondensatorbanken kapazitive Blindleistung liefern, die die Spannung auf einem stabilen Niveau halten kann. Die Kondensatorbanken sind in mehreren Stufen aufgeführt und bei Bedarf werden die Stufen ein- und ausgeschaltet. Heutzutage werden Kondensatorbanken am meisten bei Industrieunternehmen eingesetzt, um die reaktive Blindleistung der motorischen Lasten zu kompensieren [4].

6.2 Ein- und Ausschalten von Kompensationsspulen

Das Ein- und Ausschalten von Kompensationsspulen dient der Regelung der Spannung im Netz. Sie kompensieren überschüssige kapazitive Blindleistung und stabilisieren die Spannung, insbesondere bei schwankenden Lasten. Durch die stufenweise Schaltung der Drosseln wird eine flexible Anpassung an Netzbedingungen ermöglicht, um die Spannungsqualität und Betriebseffizienz zu verbessern.

6.3 Blockierung von automatischen Transformator-Stufenschalter

Automatische Stufenschalter von HS/MS Transformatoren werden bei einem drohenden Spannungskollaps blockiert, um dem weiteren Absinken der Spannung im Höchstspannungsnetz entgegenzuwirken. Die Blockierung erfolgt manuell oder

automatisch durch eine Steuerungseinheit und ist besonders notwendig bei geringeren Lastveränderungen, wenn die Lasten relativ stabil sind. Sonst kann Über- oder Unterkompensation auftreten.

6.4 Lastabwurf

Lastabwurf ist eine wichtige Schutzmaßnahme zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität bei Spannungsinstabilitäten in elektrischen Energieversorgungssystemen. Durch die gezielte Reduktion der Last wird das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch wiederhergestellt, um kritische Spannungsabfälle, Netzüberlastungen und potenzielle Kaskadenausfälle zu verhindern. Diese Maßnahme kann automatisch oder manuell erfolgen. Lastabwurf dient somit der Sicherstellung der Systemstabilität und dem Schutz der verbleibenden Netzinfrastruktur vor weitergehenden Störungen oder einem großflächigen Netzausfall. Nachdem die Netzstabilität wiederhergestellt wurde, erfolgt eine schrittweise Wiederschaltung der abgeworfenen Lasten, um eine erneute Instabilität zu vermeiden. Dies geschieht in der Regel kontrolliert und koordiniert durch Netzleitsysteme.

7 Beitrag heutiger und zukünftiger Anlagen zur Spannungsstabilität

Der Beitrag heutiger und zukünftiger Anlagen zur Spannungsstabilität umfasst dabei nicht nur die klassischen Stromerzeuger, sondern auch innovative Lösungen und intelligente Technologien. Die Integration von Echtzeit-Wetterdaten in die Betriebsführung von Netzbetreibern wie TransnetBW bietet wesentliche Vorteile für die Spannungsstabilität im Stromnetz. Durch die Berücksichtigung von Wetterparametern wie Wind, Temperatur und Solarstrahlung können Laständerungen und Spannungsabfälle präziser vorhergesagt werden. Diese Informationen ermöglichen eine optimierte Steuerung des Leitungsbetriebs und eine schnellere Reaktion auf wetterbedingte Schwankungen, was zu einer verbesserten Netzstabilität beiträgt [5]. In den nächsten Unterkapitel werden klassische und moderne Kompensationsanlagen kurz beschrieben.

7.1 Passive Blindleistungskompensationsanlagen

Passive Blindleistungskompensationsanlagen bestehen aus passiven Netzelementen wie Kondensatoren und Spulen. Sie sind entweder dauerhaft an einem Netzknoten angeschlossen oder sie können durch elektromechanische Schalter ein- und ausgeschaltet werden [4]. Außerdem lässt sich ihre Blindleistung in Stufen verändern.

7.1.1 Shunt (Parallel)-Kondensatoren

Shunt-Kondensatoren sind entweder direkt an eine Sammelschiene oder an die tertiäre Wicklung eines Haupttransformators angeschlossen und werden entlang der Leitung platziert, um Verluste und Spannungsabfälle zu minimieren. Die Hauptvorteile der Shunt-Kondensatoren sind die geringen Kosten sowie die Flexibilität bei der Installation und dem Betrieb. In Übertragungssystemen werden Shunt-Kondensatoren eingesetzt, um die Blindleistungsverluste auszugleichen und unter Bedingungen hoher Last eine Spannungsqualität sicherzustellen.

7.1.2 Shunt (Parallel)-Reaktoren

Shunt-Reaktoren werden eingesetzt, um die Auswirkungen der Leitungskapazität auszugleichen, indem sie den Spannungsanstieg bei Leerlauf oder geringer Last begrenzen. Sie werden häufig bei Höchstspannungs-Freileitungen, die länger als 150-200 km, verwendet.

7.2 Dynamische Blindleistungskompensationsanlagen

Dynamische Kompensationsanlagen sind Anlagen, die ihre Blindleistung kontinuierlich regeln können, um die Spannung stabil zu halten. Diese Anlagen spielen insbesondere eine entscheidende Rolle zur Spannungshaltung nach einer kurzzeitigen Störung, wie z.B. nach Kurzschlüsse.

7.2.1 Synchrongenerator

Synchrongeneratoren sind wichtige Komponenten im Stromnetz, die in der Lage sind, erhebliche Mengen an Blindleistung zu liefern oder zu absorbieren. Sie dienen als primäre Spannungsregelvorrichtungen und wichtige Quellen für die rotierende Blindleistungsreserve. Der automatische Spannungsregler (engl. Automatic Voltage Regulator AVR) steuert die Erregung des Generators, um die Spannung an den Sator auf den festgelegten Sollwert zu halten. Um den Bedarf an Blindleistung zu decken, können Generatoren innerhalb ihrer Über- und Untererregungsgrenzen betrieben werden. Da die Generatorfähigkeitskurven spannungsabhängig sind, ändern sich die Übererregungsgrenze (engl. Overexcitation Limit OEL) und die Untererregungsgrenze (engl. Underexcitation limit UEL) dynamisch.

7.2.2 Synchronkompensator

Ein Synchronkompensator (oder Synchronkondensator) ist eine Maschine, die ohne mechanische Last läuft. Je nach Wert des Erregerstroms kann er Blindleistung absorbieren oder erzeugen, ähnlich wie ein synchroner Generator. Obwohl seine Verluste im Vergleich zu statischen Kondensatoren relativ hoch sind, liegt sein Leistungsfaktor nahe null, was bedeutet, dass er mit maximaler Kapazität für die Lieferung oder Aufnahme von Blindleistung arbeiten kann, innerhalb seiner Betriebsgrenzen. Wenn der Kompensator im Übererregungsbereich arbeitet, gibt er Blindleistung in das Netz ab, und wenn er im Untererregungsbereich arbeitet, absorbiert er Blindleistung aus dem Netz. In Kombination mit einem Spannungsregler kann der Kompensator automatisch übererregt bei hohen Lasten und untererregt bei niedrigen Lasten betrieben werden. Die Menge an gelieferte oder absorbierte Blindleistung hängt jedoch stark vom eingestellten Betriebs-Spannungswert ab.

7.2.3 Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS)

Equipment

FACTS Betriebsmittel sind leistungselektronik-basierende Netzelemente, die die Netzstabilität bzw. Steuerbarkeit verbessern und die übertragbare Leistung erhöhen können. Es ist zwischen zwei Generationen von FACTS Betriebsmitteln

basierend auf deren Komponenten, Steuerung und Arbeitsweise zu unterscheiden. Die erste Generation ist als stromeinprägender Konverter (engl. Current Sourced Converter) und die zweite als spannungseinprägender Konverter (engl. Voltage Sourced Converter VSC) bekannt [6].

Static VAR Compensator (SVC)

Dieser Typ gehört zu den stromeinprägenden Konvertern der FACTS-Geräten. Die Hauptbauteile einer SVC-Anlage sind die parallel-geschalteten Kondensatoren und Spulen, die über Thyristoren gesteuert werden. SVCs werden im Nebenschluss an den spannungsinstabilen Netzknoten angeschlossen und bieten die Möglichkeit die Spannung aktiv und dynamisch zu regeln. Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung einer SVC-Anlage.

Static Synchronous Compensator (STATCOM)

STATCOM-Anlagen gehören ebenfalls zu den FACTS-Betriebsmitteln. Sie bestehen aus Kondensatoren, Spulen und Thyristoren. Bei modernen STACOMs kommen IGBTs im Einsatz. Sie können Blindleistung aufnehmen oder abgeben und damit die Knotenspannung aktiv innerhalb eines definierten Bands halten. Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung einer STATCOM-Anlage.

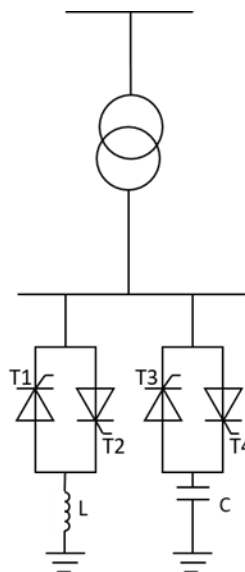


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer SVC-Anlage

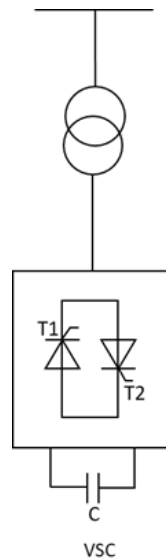


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer STATCOM-Anlage

7.2.4 Hochspannungsgleichstromübertragungs-Kopfstationen (HGÜ-Kopfstation)

Typische HGÜ-Systeme bestehen aus zwei Hauptteilen und zwar, die Konverterstationen, die den Wechselstrom (AC) in Gleichstrom (DC) umwandeln und umgekehrt sowie die Übertragungsleitung, die den Gleichstrom übertragen. Neben ihren wirtschaftlichen Vorteilen über AC-Übertragung über lange Strecken können HGÜ-Konverterstation zusätzlich dank ihrer Steuerbarkeit den Blindleistungsfluss aktiv und schnell beeinflussen und damit die Spannung aktiv zu regeln.

7.2.5 Erneuerbare Energie

Erneuerbare Energieanlagen in lokalen Netzen führen bei ihrer Einspeisung zu einer Erhöhung der Spannung. Um die zulässigen Spannungsgrenzen nicht zu überschreiten, sind Erzeugungsanlagen seit 2011 verpflichtet, einen Teil der erzeugten Energie als Blindleistung einzuspeisen [7].

8 Literaturverzeichnis

- [1] N. Hatziaargyriou, J. Milanovic, C. Rahmann, V. Ajjarapu, C. Canizares, I. Erlich, D. Hill, I. Hiskens, I. Kamwa, B. Pal, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, A. Stankovic, T. Van Cutsem, V. Vittal und C. Vournas, „Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended,“ *IEEE Transactions on Power Systems*, Bd. VOL. 36, Nr. NO. 4, 07 2021.
- [2] „Netzentwicklungsplan 2035/2045,“ Deutsche Übertragungsnetzbetreiber, 2023.
- [3] „Deutsche Grenzwertkonzept – Regeln zur Ermittlung und Überwachung von Grenzwerten für die Systemführung des Deutschen Übertragungsnetzes,“ 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, 2021.
- [4] S. Corsi und M. Eremia, Handbook of electrical power system dynamics, John Wiley & Sons, Inc..
- [5] TransnetBW, „INNOVATION – Overhead Line Monitoring for a Flexible Grid,“ [Online]. Available: <https://www.transnetbw.de/en/company/portrait/innovations/overhead-line-monitoring>. [Zugriff am 10 12 2024].
- [6] B. H. Alajrash, M. Salem, M. Swadi, T. Senju, M. Kamarol und S. Motahhir, A comprehensive review of FACTS devices in modern power systems, ElSevier Ltd., 2024.
- [7] Systemdienstleistungen, „VDE FNN – Forum Netztechnik/ Netzbetrieb im VDE,“ [Online]. Available: <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/vom-netz-zum-system/systemdienstleistungen>. [Zugriff am 17 02 2025].