

Blindleistungskompensation auf der 500-kV-Ebene in Tadschikistan im Projekt „CASA-1000“

Munira Halimjanova* und Detlef Schulz
Elektrische Energiesysteme

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

D-22043 Hamburg, Holstenhofweg 85

*E-Mail: munira.halimjanova@hsu-hh.de

Kurzfassung—Die Verbesserung der Spannungsstabilität und die Suche nach einer optimalen technisch-wirtschaftlichen Lösung für die Verbindung von vier zentralasiatischen Ländern (Kirgisistan, Tadschikistan, Afghanistan, Pakistan) wurde zu einer wesentlichen Frage für alle angeschlossenen Nachbarländer. Dieser Artikel beschreibt die Notwendigkeit der Verwendung von statischen Blindleistungskompensatoren auf den Hochspannungsleitungen des Beispielprojekts CASA-1000, um die Spannungsstabilität im Übertragungsnetz zu gewährleisten. Eine Spannungsinstabilität tritt in tadschikischen Höchstspannungsnetzen mit langen Übertragungsleitungen auf. Zur Analyse dieser Probleme wurden die von der Republik Tadschikistan bereitgestellten maßgeblichen Daten herangezogen. Daher basieren die vorgestellten Simulationen mit der Software DigSILENT PowerFactory 2017 auf den tatsächlichen Parametern des tadschikischen Energiesystems. Das Ziel dieses Artikels ist es, die Quellen von Überspannungen im Übertragungsnetz zu ermitteln und eine optimale Lösung für Spannungsstabilität und minimale Verluste vorzuschlagen. Der Hauptfokus liegt auf der Suche nach optimalen Standorten für die statischen Blindleistungskompensatoren, um die Spannungsstabilität aufgrund der langen Übertragungsleitungen zwischen den Nachbarländern in Zentralasien zu verbessern.

Stichworte—Spannungsstabilität, Statische Var-Kompensatoren, Thyristor-Schaltkondensator, Thyristorgesteuerte Drossel, flexibles AC-Übertragungssystem, Hochspannungsleitungen, Blindleistungskompensation.

I. EINLEITUNG.

Das tadschikische Energieunternehmen "Barki Tojik" muss in jeden Sommer eine sehr große überschüssige Energiemenge, 2015 waren dies beispielsweise 3,3 TWh [1], in Nachbarländer exportieren. Um diese Situation zu verbessern, wurde ein neues Projekt namens „CASA-1000“ gestartet. Dieses Projekt hat das Ziel, eine zufriedenstellende Lösung für die Probleme des Stromüberschusses im Sommer zu schaffen. Im ersten Schritt wird eine neue AC-DC-Spannungswandlerstation gebaut. Abb. 1 zeigt eine Übersicht über das gesamte Bauvorhaben im Projekt „CASA-1000“ [5].

Jeden Sommer verfügen die beiden Länder Tadschikistan und Kirgisistan über einen Überschuss an elektrischer Energie in Höhe von ca. 6 TWh. Dieser soll künftig in die Nachbarländer Afghanistan und Pakistan exportiert werden.

Dieser Energieüberschuss soll bis zum Jahr 2035 auf unter 900 GWh reduziert werden.

Das Projekt „CASA-1000“ umfasst folgende Bauvorhaben, siehe Abb. 1:

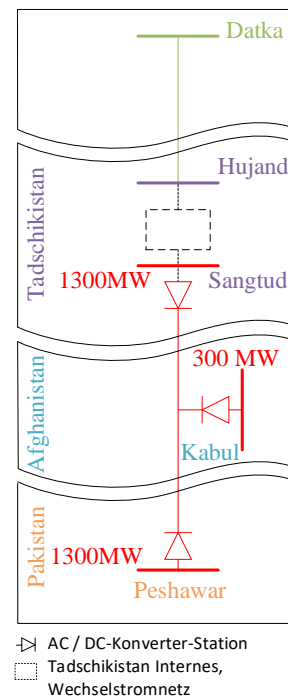


Abbildung 1: Übersicht Bauvorhaben im Projekt „CASA-1000“ [1].

1. 500-kV-Wechselstromleitung von Datka (Kirgisistan) nach Hujand (Tadschikistan) mit einer Gesamtlänge von 477 km (Energieexport ca. 300-550 MW);
2. AC-DC-Konverterstation mit einer Nennleistung von 1300 MW in Sangtuda (Tadschikistan);
3. Hochspannungsgleichstromleitung (HVDC-Leitung) von Sangtuda nach Kabul (Afghanistan) und Peshawar (Pakistan) mit einer Gesamtlänge von 750 km.

Dies ist ein bedeutendes Projekt, da die Möglichkeit, Energie zu exportieren, den tadschikischen Kraftwerken ermöglicht, mit höherer Effizienz zu arbeiten. Die Einnahmen aus dem exportierten Strom können zur Erneuerung des Energiesystems beitragen [2]. Die Zuverlässigkeit und Sicherheit des tadschikischen Energiesystems wird dadurch erhöht.

II. PROBLEMBESCHREIBUNG

Aufgrund zunehmender Leitungslängen sowie einer erheblichen Menge von unterlasteten Hochspannung Leitungen sind Probleme mit der Spannungsinstabilität durchzunehmende Blindleistungen Zeugung, sowie eine erhebliche Menge an Wirkleistungsverlusten unvermeidlich. Um diese Probleme zu vermeiden, ist es grundsätzlich notwendig, eine große Menge an Blindleistung zu erzeugen. z.B. mit flexiblen Wechselstromübertragungssystemen (engl. flexible alternating current transmission systems, FACTS) im Übertragungssystem. Diese Systeme können auch nachts verwendet werden, wenn die Systemlast abnimmt und die Leistung der Generatoren nicht ausreicht, um die von den Leitungen erzeugte Blindleistung zu kompensieren.

Ein statischer Blindleistungskompensator (engl.: static VAR compensator, SVC) - ist eine mögliche Realisierung eines FACTS und besteht aus einem spannungsgesteuerten Shunt-Kompensator. SVC kommen typischerweise an der Unterspannungssammelschiene von Umspannwerken zwischen Mittel- und Hochspannungsnetzen zum Einsatz. Die Blindleistungsaufnahme und damit die Spannung am Anschlusspunkt von SVC wird über Thyristoren geregelt. Es gibt zwei verschiedene Arten von SVC zur Spannung Steuerung:

1. Thyristorgesteuerter Kondensator (engl. thyristor switched capacitor, TSC);
2. Thyristorgesteuerte Spule (engl. thyristor controlled reactor, TCR).

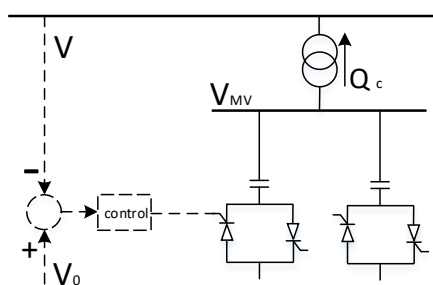


Abbildung 2a: Schematische Darstellung von SVCs; a) Thyristor-Schaltkondensator (TSC).

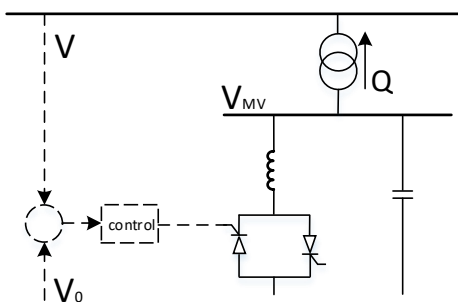


Abbildung 2b. Thyristorgesteuerter Reaktor (TCR).

Die Unterschiede zwischen diesen beiden Arten sind:

1. TSC - erzeugt kapazitive Blindleistung zum Erhöhen der Spannung (siehe Abb. 2a);
2. TSR - erzeugt induktive sowie kapazitive Blindleistung zur Spannungsstabilisierung (siehe Abb. 2b).

Weitere Informationen zu SVCs sind in [3] zu finden.

Das Diagramm in Abb. 3 zeigt die Beziehung zwischen Spannung und Last sowie die Abhängigkeit davon, wo Kompensationsgeräte für die Blindleistungskompensation angeschlossen sind. Die Kurve „a“ zeigt, dass die Spannung am Ende der Leitung steigt, wenn die Leitung nicht belastet ist und die Blindleistung nicht kompensiert wird. Dies geschieht, weil in leerlaufenden Leitungen eine große Menge Blindleistung erzeugt wird. Die Kurve „b“ zeigt die Spannung entlang einer Leitung ohne Last, jedoch mit Kompensator am Ende der Leitung. Die Spannung am Ende der Leitung ist dank TCR ungefähr gleich der Spannung am Anfang der Leitung. Leider hat dieses Beispiel einen erheblichen Nachteil, die Spannung in der Mitte der Leitung steigt an und führt zu Leistungsverlusten. Die Kurve „c“ ist eine nicht belastete Leitung mit drei TCR (Anfang, Mitte und Ende). Diese Variante ist vorteilhaft, da die Spannung der nicht belasteten Leitung auf der gesamten Leitungslänge ungefähr gleich ist. Die letzte Kurve zeigt eine natürlich belastete Leitung mit Kompensator in der Mitte und an den Enden der Leitung. Die Verwendung von TCR bietet zwar einen großen Vorteil, jedoch können sie die Ursache dafür sein, dass die Spannung im System drastisch abnimmt. Daher sollte vor dem Anschluss dieses Geräts an die Leitung der Betrieb gesichert werden.

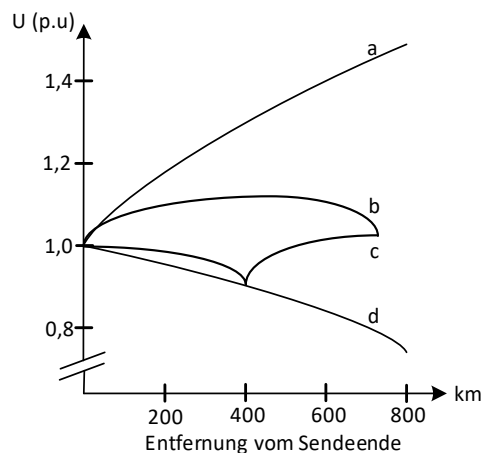


Abbildung 3: Spannungsänderung entlang einer Leitung, nach [4]; a) keine Last ohne Kompensator b) keine Last mit Kompensation an den Enden; c) keine Belastung mit Kompensator an den Enden und in der Mitte; d) Übertragen der Eigenlast, Kompensator an den Enden und in der Mitte.

Wie in Abb. 3 gezeigt, kann eine Verbesserung des Spannungsprofils durch Verwendung von FACTS-Vorrichtungen an Zwischenpunkten sowie an den Enden der Leitung erzielt werden.

Wie in [5] beschrieben ist die Spannung entlang der Leitung konstant, wenn die Lastimpedanz dem Leitungswellenwiderstand entspricht, d.h. die „natürliche Leistung“ wird übertragen. Wenn jedoch die Lastimpedanz höher oder niedriger ist, kann in diesem Übertragungssystem eine Spannungsinstabilität auftreten.

Die vom SVC erzeugte Blindleistung ist gegeben durch:

$$Q = BV_{MV}^2 \quad (1)$$

wobei V_{MV} die Spannung an der Mittelspannungssammelschiene und B die variable Suszeptanz ist. Be lässt sich auch als:

$$B = K(V_0 - V) \quad (2)$$

beschreiben, wobei

$$B^{\min} \leq B \leq B^{\max} \quad (3)$$

gilt. K ist die SVC-Verstärkung, V_0 die Spannungsreferenz und B^{\min} bzw. B^{\max} entsprechen der extremen Thyristorleitungsbedingung.

Wenn B minimal ist, produziert der SVC induktive Blindleistung ($-Q$), wenn B maximal ist, kapazitive Blindleistung ($+Q$), siehe [6].

III. ANALYSE DES PROBLEMS

Um diesen Effekt zu analysieren, wurde das Energiesystem Tadschikistans simuliert. Alle wesentlichen Parameter wurden eingeschlossen. Das tadschikische Höchstspannungsnetz besteht aus 4 Unterstationen, 490 km Freileitungen und einem Kraftwerk auf der 500-kV-Ebene sowie 26 Unterstationen, 1327 km Freileitungen und 7 Kraftwerke auf der 220-kV-Ebene (Abb. 4). Das Höchstspannungsnetz versorgt ein großes 110-kV-Netz mit 29.997 km Freileitungen, 156 Unterstationen und 3 Kraftwerken [2], [5].

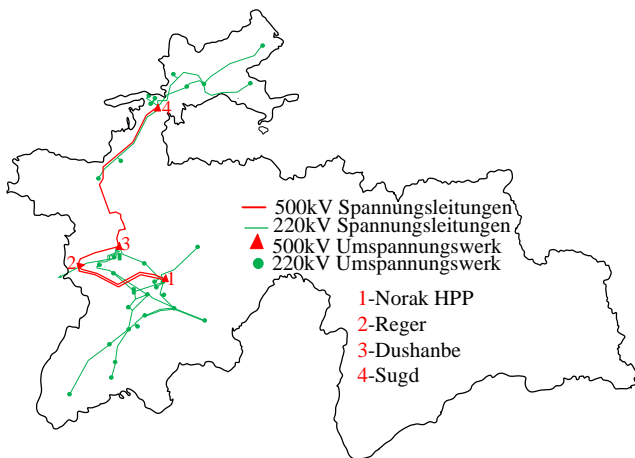


Abbildung 4: Übertragungsleitungen und Unterstationen im tadschikischen Höchstspannungsnetz.

Im Projekt CASA-1000 ist geplant, die Umspannstation Kirgisistan "Datka-500 kV" mit der Umspannwerk "Sugd-500 kV" der Republik Tadschikistan mit einer Oberleitung mit einem Querschnitt von 400 mm² und 477 km Länge zu verbinden. Die Projektexterten halten es für notwendig, eine neue 500-kV-Leitung parallel zu der vorhandenen Leitung mit einem Querschnitt von 400 mm² und einer Länge von 213 km zu bauen. Diese Leitung verbindet die Unterstation Sugd und die Unterstation Dushanbe. Drei neue Oberleitungen mit einem Querschnitt von 400 mm² und einer Länge von 477 km verbinden die Unterstation Regar-500kV mit der Unterstation Sangtuda-1-500kV. In der Unterstation Sangtuda-1 ist geplant, eine 500-kV-Unterstation mit vier Transformatoren

(167MVA / 500/220 / 35kV) zu errichten, von denen einer in Reserve ist. Hochspannungsseitig ist Sangtuda-1-500kV an den AC/DC-Wandler angeschlossen. Die Gesamtlänge der DC-Freileitung beträgt 750 km, von denen 117 km durch Tadschikistan, 562 km Afghanistan und 71 km Pakistan verlaufen. In Pakistan wird auf dem Umspannwerk Nowshera -500 kV der zweite DC/AC-Wandler mit einer Kapazität von 1300 MW gebaut. Abbildung 5 stellt das CASA-1000-Projekt dar, in der roten Farbe ist ein Konstruktionsplan dargestellt, und das vorhandene elektrische System ist in Schwarz gehalten.

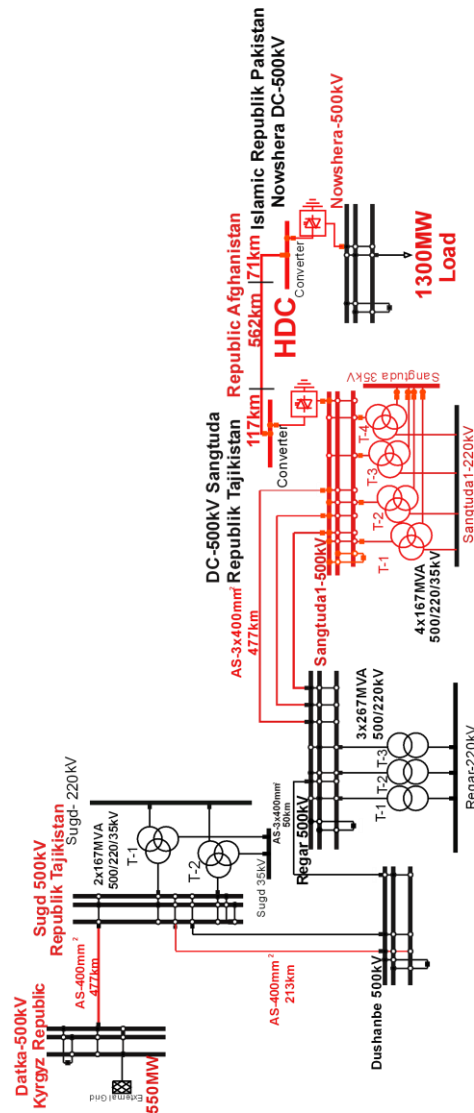


Abbildung 5: Plan der Hochspannungsverbindung zwischen vier zentralasiatischen Ländern durch das tadschikische Energiesystem, Projekt CASA-1000.

Es sei darauf hingewiesen, dass in der Simulation die Last CASA-1000 (1300 MW nach Pakistan) angeschlossen wurde und das tadschikische Energiesystem eine für die Sommermonate typische Last aufwies. Das bedeutet, dass unsere Simulation unter Maximallast durchgeführt wurde. Außerdem wird deutlich, dass das Problem der Spannungsinstabilität in einer 500-kV-Wechselspannungsleitung auftritt, da die Länge dieser Leitung sehr lang ist, was die Ursache für die Erzeugung der

enormen Blindleistung ist. Infolgedessen führt die Blindleistung in den beiden Nachbarländern zu einer Erhöhung der Spannung.

Gemäß dem Vorschlag von „TASK-II: Verstärkung der Übertragung in Tadschikistan für das CASA-1000-Projekt“, Detaillierter Machbarkeitsbericht „Weltbank“ vom Mai 2013

Quelle für die Erzeugung von Blindleistung. Die Leitung wird mit 35% Wirklast und 45% Blindleistung belastet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Umspannstation Sugd eine Last von etwa 500 MW hat und wenn der nördliche Landesteil (Umspannstation Sugd) mit der Umspannungsstation Datka verbunden wird, wird der Stromfluss in das nördliche Teilland und die Stromversorgung der Unterstation Dushanbe ermöglicht. Dadurch wird die bestehende Linie Dushanbe-Sugd zudem bei 45% Unterlast betrieben. Auf diese Weise ist der Bau einer zweiten Hochspannungsleitung zwischen den Unterwerken Sugar und Dushanbe keine erfolgreiche Lösung und erschwert die Spannungshandhabung. In der Literatur wird beschrieben, dass eine 500 km lange Leitung innerhalb von ± 10% Spannungsschwankung ohne Shunt-Reaktoren arbeiten kann. Shunt-Reaktoren werden ab Leitungslängen von 800 km verwendet und das System in Abschnitte von 800 km mit Kompensationsanlagen am Ende jedes Abschnittes aufgeteilt [4]. Wenn die Spannung von 500 kV-Leitungen jedoch auf + 10% ansteigt, beträgt sie 550 kV. Nach DIN VDE 0175-1 / IEC-60038 beträgt die maximale Spannung für 500 kV-Leitungen lediglich 525 kV.

Um zu zeigen, dass die Last manchmal nicht der Grund für Spannungsinstabilitäten ist, wurde eine Simulation durchgeführt. Sie zeigt, wenn die Gleichstrom-Hochspannungsleitung zwischen Tadschikistan und Pakistan aufgetrennt wird und dadurch Lastverluste auftreten, wird die Spannung in allen 500-kV-Unterstationen etwas höher, vergleiche Abb. 6 und Abb. 7. Wie aus den Abbildungen ersichtlich wird, tritt die höchste Spannungsinstabilität bei den beiden Unterstationen Datka und Sugd auf. So kann bestimmt werden, wo die Ausrüstung zur Spannungsstabilisierung aufgestellt werden sollte.

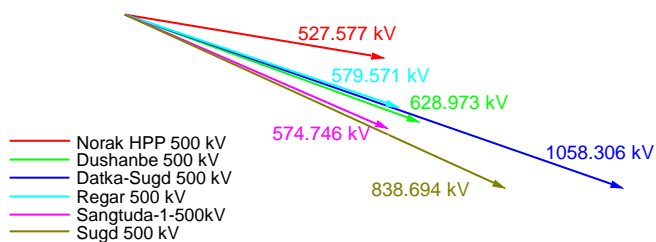


Abbildung 6: Spannungsinstabilitätsproblem im tadschikischen und kirgisischen Übertragungssystem nach dem Anschluss des Umspannwerkes Datka - 500kV Kirgisische Republik an das Umspannwerk Sugd - 500kV Republic Tadschikistan Projekt CASA-1000.

Das erste Szenario bildet das tadschikische System ohne Drosselspulen ab, siehe Abb. 6. Die Bedeutung und Notwendigkeit der Verwendung von Drosselspulen ist ausführlich in [6] beschrieben. Im zweiten Szenario sind die Drosselspulen an die Unterstationen Sugd-500 kV und Dushanbe-500 kV angeschlossen und die DC-Last (CASA-1000) ist abgetrennt, siehe Abb. 8.

[7], wird eine weitere zusätzliche Leitung zwischen den Unterstationen Sugd und Dushanbe parallel zur bestehenden Leitung installiert. Die Simulation mit der Software DIgSILENT PowerFactory 2018 hat gezeigt, dass diese Verbindung nicht zur Steigerung der Energieeffizienz beiträgt. Diese Verbindung wird dagegen zu einer zweiten

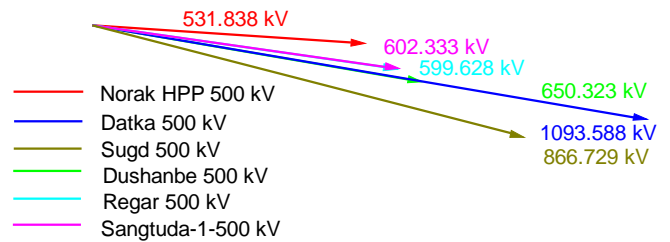


Abbildung 7: Projekt CASA-1000, Spannungsinstabilität während eines Fehlers in der Gleichspannungsleitung in den Hochspannungsstationen Tadschikisch und Pakistan.

IV. VORGESCHLAGENE LÖSUNG

Nach der Simulation mit den Projektdaten „CASA-1000“ wird deutlich, dass der Einsatz von SVC im hier untersuchten Übertragungssystem wesentlich ist. Wie und wo er platziert werden muss, wird in diesem Abschnitt erläutert. Es sollte beachtet werden, dass zur Ermittlung des besten Verbindungspunktes oder der besten Stelle drei Beispiele mit einer gleichen Menge an Blindleistung (360 Mvar) erstellt wurden. Die Unterschiede bestanden darin, einen optimalen Platz für die SVC-Anlage zu finden und die Kapazität unter den einzelnen SVC aufzuteilen. Im ersten Beispiel wird der Verbindungspunkt mit zwei SVCs, die an den Eingang und das Ende der Leitung Datka-Hujand mit einer Kapazität von 2x180 Mvar angeschlossen sind, definiert, siehe Abb. 8.

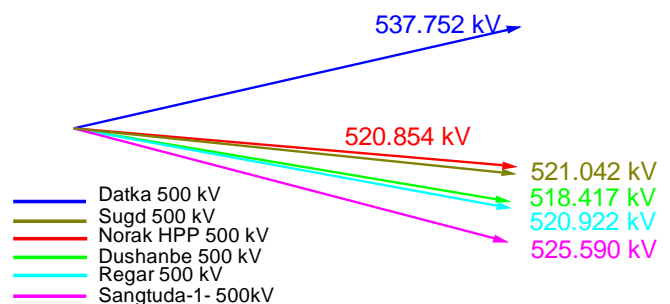


Abbildung 8: Zwei-System-Var-Kompensationsgeräte, die an den Eingang und das Ende der Leitung Datka-Sugd angeschlossen sind, mit einer Gesamtkapazität von 360 Mvar und der Last aus dem Projekt CASA-1000.

Im zweiten Beispiel sind drei SVC 3x120 Mvar (zwei am Eingang und Ende der Leitung und einer in der Mitte) auf der Leitung Datka-Sugd installiert, siehe Abb. 9.

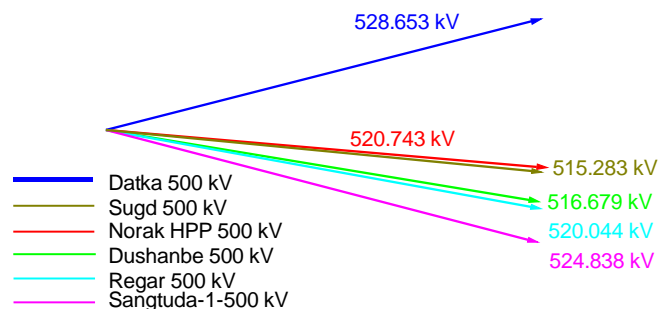


Abbildung 9: Drei-System-Var-Kompensationsgeräte, die an den Eingang, das Ende und die Mitte der Linie Datka-Hujand angeschlossen sind, mit einer Gesamtkapazität von 360 Mvar und einer Last aus dem CASA-1000-Projekt.

Diese Verbindung ist vorteilhafter, da bei gleicher Blindleistungserzeugung aus dem SVC die Spannung in jeder Unterstation stärker als im ersten Beispiel abnimmt, vergleiche Fig. 8 und Fig. 9.

Das dritte Beispiel ist unser Vorschlag mit dem Anschluss von vier statischen Var-Kompensatoren, drei mit 100 Mvar-Kapazität. Zwei in der Mitte der Leitung, einer in der Unterstation Datka und einer in der Unterstation Sugd mit einer Kapazität von 60 Mvar, siehe Abb.11.

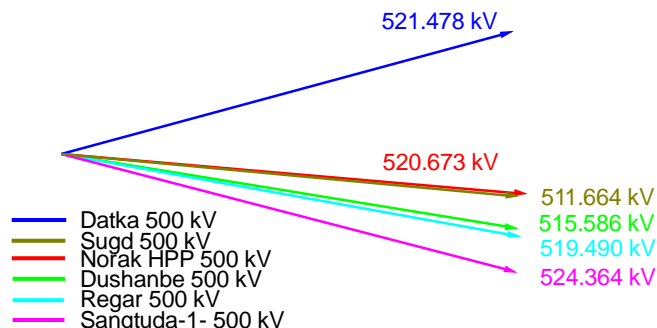


Abbildung 10: Vier-System-Var-Kompensationsgeräte, die an den Eingang, das Ende und die Mitte der Leitung Datka-Hujand angeschlossen ist, mit einer Gesamtkapazität von 360 Mvar und einer Last aus dem CASA-1000- Projekt.

Nachfolgend ist das Schema des Projekts CASA-1000 dargestellt, das nach dem Anschluss von vier statischen Var-Kompensatoren zwischen der Unterstation Datka und der Unterstation Hujand untersucht wurde.

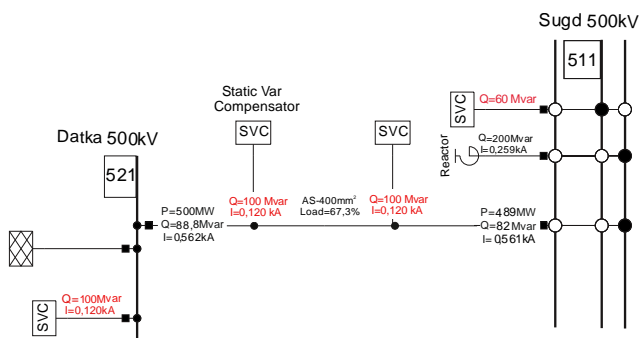


Abbildung 11: Projekt CASA-1000, Untersuchung nach dem Anschluss von vier statischen Var-Kompensatoren zwischen zwei Unterstationen.

Diese Verbindung hat einen positiven Einfluss auf das gesamte Übertragungssystem, weil:

- Spannungsstabilität;
- Kein Spannungsstoß;
- Verringerung der Blindleistungserzeugung in den Oberleitungen;
- Abnehmender Kurzschlussstrom I_{sc} ;
- Weniger überlastete Leitungen;
- Verringerung des Wirkleistungsverlusts;
- Erleichterung der Kommutierung für elektrische Geräte;
- Verwendung des Static Var Kompensator (SVC).

Obwohl die Gesamtmenge der aus dem SVC erzeugten Blindleistung nicht anstieg, stieg durch die Aufteilung der Blindleistung zwischen den Geräten die Spannungsstabilität bei allen Systemen.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Exportieren und Importieren einer unterschiedlichen Menge elektrischer Energie stellt für alle hier betroffenen Länder ein sehr kritisches Problem dar, da der Abstand zwischen den Nachbarn des Übertragungssystems enorm ist. Diese langen Leitungen haben erhebliche Kapazitäten, die aufgrund der sehr hohen Spannung eine hohe Blindleistung erzeugen. Die Untersuchung ergab, dass manchmal auch eine große Last nicht zur Kompensation der Blindleistung beitragen kann. Die Verbindung von SVC ist jedoch eine erfolgreiche Lösung, um die Spannungsstabilität zu verbessern und diese Verbindung für alle angeschlossenen Länder sicher zu machen. Diese Spannungsprobleme bleiben auch dann bestehen, wenn die großen Kraftwerke, die für die Steuerung der Blindleistungsbilanz des Netzes verantwortlich sind, negative Blindleistung einspeisen, um eine Blindleistungsbilanz herzustellen.

Um Spannungsstabilitätsprobleme zu lösen, müssen SVC-Kompensatoren auf der Höchstspannungsstufe installiert werden. Der SVC sollte sich in der Nähe der Übertragungsleitungen befinden, die an beiden Enden die höchste Blindleistungsleistung haben und zwei in der Mitte. Um diese Standorte zu finden, muss der Blindleistungsfluss im Netz analysiert werden. Auf diese Weise können auch große Wasserkraftwerke, die weit von den Verbrauchern entfernt sind, ihre Energie problemlos übertragen.

DANKSAGUNG

Dieses Projekt wurde vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) gefördert.

REFERENZ

- [1] D. Schulz.: A. D. Ahrorova.: M. K. Halimjanova.: und K. H. Kholov.: "The energy supply for mountain settlements in Tajikistan based on renewable energy sources," WIT Press. Southampton/bost., Band. 190, no. ISBN: 978-1-84564-816-9, S. 971–978, 2014.
- [2] M. Halimjanova, K.-D. Dettmann, D. Schulz, und A. Akhrorova, "Energy efficiency in the context of energy availability in the Republic of Tajikistan," WIT Press. Southampton/bost., Band. 205, no. ISBN 978-1-78466-107-6, S. 115–123, 2016.
- [3] Heuck, K.; Dettmann, K.-D. und, Schulz, D.: Elektrische Energieversorgung, ed. 9, Springer Vieweg, Wiesbaden 2013.
- [4] B. Weedy and B. Cory, Electric Power System, 4th ed. West Sussex, England: British Library, 2004.
- [5] M. Halimjanova, G. Kaatz, M. F. Meyer, K.-D. Dettmann, D. Schulz "Problems with voltage stability due to long-distance transmission of hydropower in the Tajik extra-high voltage grid," Beltz, Bad Langensalza., Band. 323, no. ISBN 978-3-8007-4445-9, S. 225–258. 2017.
- [6] Thierry van Cutsem, Costas Vournas. Voltage Stability of Electric Power Systems. 1–st ed. Springer science+bussiness media, B.V., 1998. doi:10.1007/978-8-387-75536-6.
- [7] W. Bank, "Detailed Feasibility Report Transmission Strengthening in Tajikistan Grid For CASA-1000 Project," in World, THE WORLD BANK 1818 H Street, N.W. Washington, 2001, S. 11.