

Herausforderungen bei der dezentralen Regelung von MSCDN während volatiler Übertragungsaufgaben

Moritz Maercks, Albert Moser

Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, RWTH Aachen, Schinkelstraße 6,
52062 Aachen, moritz.maercks@iaew.rwth-aachen.de, www.iaew.rwth-aachen.de

Kurzfassung:

Seit Jahren steigt die Bedeutung von MSCDN-Anlagen zur Spannungshaltung im deutschen Übertragungsnetz [1]. Während sich allerdings viele Veröffentlichungen mit dem Komponentendesign von MSCDN beschäftigen, gibt es kaum Veröffentlichungen, die sich mit Regelungsstrategien für den Einsatz von MSCDN¹ im Netzbetrieb auseinandersetzen. Aufgrund der weiter zunehmenden Bedeutung dezentraler, volatil einspeisender Erzeugungsanlagen auf Basis Erneuerbarer Energien, die meist in die Verteilnetze einspeisen und zentrale Kraftwerke mit der zugehörigen Spannungsregelung vermehrt ablösen, steigt die Bedeutung der Spannungshaltung und -regelung im Netzbetrieb. Daher wird in diesem Paper untersucht, inwiefern MSCDN-Anlagen bei volatilen Übertragungsaufgaben und Ausfällen sowie verschiedenen dezentralen Regelungen belastbar der Spannungshaltung dienen.

Keywords: Volatile Einspeisung, Integration von EE-Anlagen, Spannungshaltung, Netzbetrieb, Dezentrale Regelung

1 Einleitung

Der weiterhin steigende Anteil erneuerbar erzeugter elektrischer Leistung führt vermehrt zu Situationen mit hohen und volatilen Einspeisegradierten. Steile positive Gradienten wechseln sich vermehrt mit negativen Gradienten innerhalb einiger Minuten ab [2]. Die Geschwindigkeit derartiger Änderungen der Ein-/Auspeisesituation und somit der Übertragungsaufgabe des Netzes erfordert zur adäquaten Spannungshaltung neben der Blindleistungsbereitstellung aus Synchrongeneratoren auch die dynamische Schaltung bzw. Stufung von MSCDN. Diese dienen der Spannungsstützung an Orten mit hohen Lasten, stark ausgelasteten Leitungen und/oder lokalem Blindleistungsbedarf aus unterlagerten Verteilnetzen. Die Volatilität der Einspeisung aus EE-Anlagen erhöht die Bedeutung dezentraler Regelungsstrategien für MSCDN. In diesem Paper wird ein Zeitbereich von 15 min betrachtet. Üblicherweise werden im Rahmen des Netzbetriebs alle 15 min Spannungsblindleistungsoptimierungen mit ggf. anzupassenden Schaltpositionen von MSCDN durchgeführt. Kurzzeiteffekte im Zeitbereich $\ll 1$ s werden im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen vernachlässigt. [3] schlägt eine Regelungsstrategie für MSCDN basierend auf Grenzen für Spannungen sowie Totbändern vor, in diesem Paper wird ein ähnliches Vorgehen gewählt. Um starke Spannungsänderungen durch häufige Schaltvorgänge zu vermeiden, aber auch die

¹ Mechanically Switched Capacitors with Damping Network

Lebensdauer der Komponenten zu erhöhen, versuchen Netzbetreiber die Anzahl von Schaltvorgängen zu reduzieren, dabei aber gleichzeitig dem Ziel der Spannungshaltung adäquat zu genügen. Vor diesem Hintergrund wird in diesem Paper untersucht, inwiefern dezentral geregelte MSCDN-Anlagen bei volatilen Übertragungsaufgaben und Ausfällen auch bei zukünftig volatiler werdenden, sich aufgrund der Einspeise- und Lastbedingungen ergebenden, Übertragungsaufgaben belastbar der Spannungshaltung dienen.

2 Methodische Vorgehensweise

In diesem Paper werden verschiedene dezentrale Regelungs- und Designstrategien für MSCDN zur Spannungsstützung in Elektrizitätsversorgungssystemen mit volatilen Übertragungsaufgaben vorgestellt und verglichen. Hierzu werden Simulationen anhand des im folgenden vorgestellten Untersuchungsszenarios durchgeführt. Dabei werden verschiedene Parameter die Regelungsstrategie und das MSCDN-Design betreffend variiert und die Untersuchungsergebnisse dargestellt.

2.1 Untersuchungsszenario

Zur Darstellung grundsätzlicher Zusammenhänge wird in diesem Paper von Berechnungen in ausgedehnten Netzen abgesehen. Stattdessen wird eine vereinfachte Anordnung betrachtet, anhand der wesentliche Zusammenhänge verdeutlicht werden können. Betrachtet dazu wird das in Abbildung 1 dargestellte Untersuchungsszenario. Hierbei wird ein vereinfacht als spannungsunabhängige Last angenommenes Verteilnetz mit Leistungsaufnahme P_L und Leistungsfaktor $\cos\varphi_L$ über zwei Parallelleitungen aus den Netzbereichen A und B versorgt. Die Netzbereiche sind vereinfacht als ideale Spannungsquellen und Ersatzimpedanz abgebildet. Hierbei dient diese Modellierung der Berücksichtigung der elektrischen Distanz zu Netzbereichen mit hinreichend vielen Synchrongeneratoren zur adäquaten Spannungshaltung sowie der elektrischen Distanz zur Wirkleistungseinspeisung bzw. zum Wirkleistungsbezug.

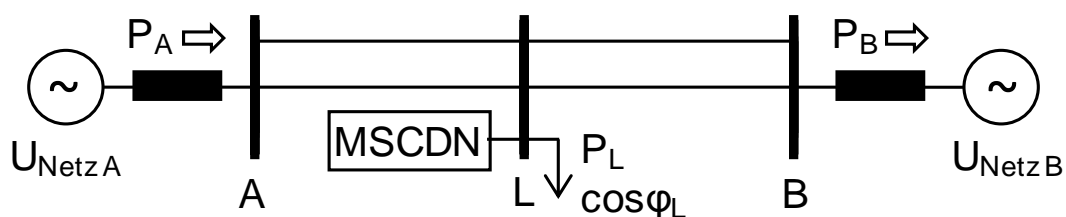


Abbildung 1: Betrachtetes Untersuchungsszenario mit volatiler Übertragungsaufgabe zwischen zwei Netzbereichen A und B, unterlagertem Verteilnetz und MSCDN-Anlage.

Für die Spannungsquellen gilt $U_{\text{Netz A}} = U_{\text{Netz B}} = 405 \text{ kV}$. Die Freileitungen sind jeweils 100 km lang und die Ersatzimpedanzen der Netzbereiche sind zu 10Ω angenommen. Für die Untersuchung der Auswirkungen erhöhter elektrischer Distanzen, etwa aufgrund eines erhöhten Anteils der eingespeisten Leistung aus Verteilnetzen, sind die Ersatzimpedanzen der Netzbereiche zu 28Ω angenommen. Simuliert werden verschiedene volatile Übertragungssituationen, wobei die volatile Last aus Netzbereich A versorgt wird und gleichzeitig Leistung in Netzbereich B übertragen wird. In der folgenden Abbildung 2 ist die Übertragungsaufgabe im Basisszenario dargestellt.

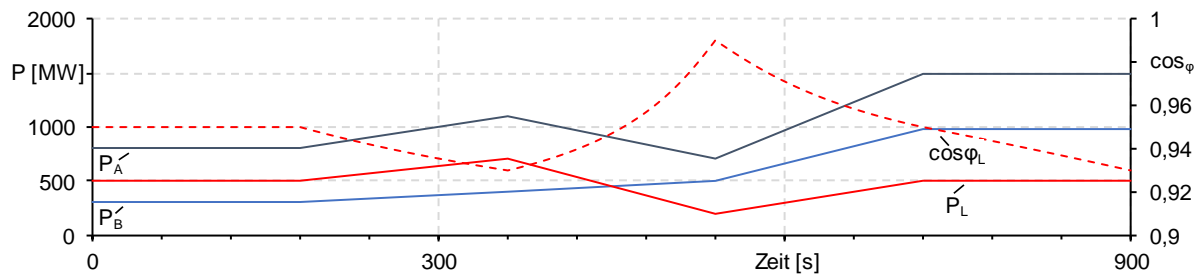


Abbildung 2: Basisszenario der volatilen Übertragungsaufgabe. Dargestellt sind die aus dem Netzbereich A eingespeiste Wirkleistung P_A , die aus dem unterlagerten Netz bezogene Wirkleistung P_L mit zugehörigem induktivem Leistungsfaktor $\cos\varphi_L$ und die in Netzbereich B gespeiste Wirkleistung P_B .

Vorgegeben wurden jeweils Stützpunkte im Abstand von 3 min für die Wirkleistungen, zwischen denen linear interpoliert wurde. Da auch Stützpunkte für den induktiven Blindleistungsbezug der Last vorgegeben wurden, ergibt sich ein nichtlinearer Verlauf des Leistungsfaktors. In Abbildung 3 ist die Übertragungsaufgabe des volatilen Szenarios dargestellt.

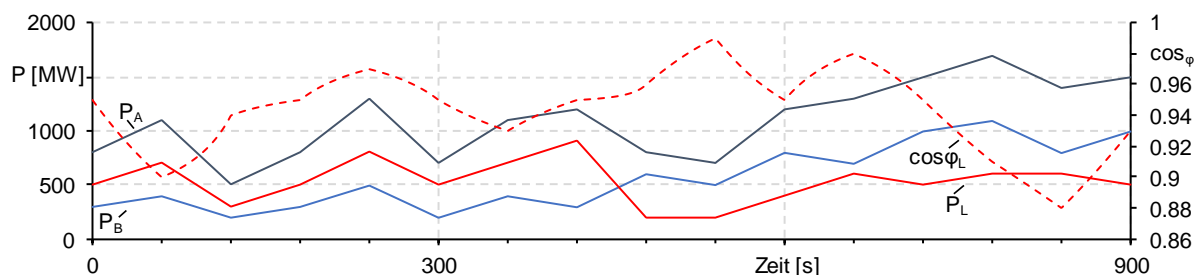


Abbildung 3: Volatiles Szenario der Übertragungsaufgabe mit gegenüber dem Basisszenario erhöhter Volatilität. Dargestellt sind die aus dem Netzbereich A eingespeiste Wirkleistung P_A , die aus dem unterlagerten Netz bezogene Wirkleistung P_L mit zugehörigem induktivem Leistungsfaktor $\cos\varphi_L$ sowie die in Netzbereich B gespeiste Wirkleistung P_B .

Im volatilen Szenario wurde die Volatilität der Übertragungsaufgabe gegenüber dem Basisszenario erhöht, bei der Last ergibt sich so eine Steigerung der Standardabweichung um 63 %. Hierzu wurden weitere Stützpunkte im Abstand von 1 min ergänzt. Es ist allerdings zu beachten, dass die für das Basisszenario vorgegebenen Stützpunkte (mit 3 min Abstand) auch für das volatile Szenario gelten.

2.2 Modellierung von MSCDN

Die spannungsstützenden MSCDN werden in diesem Paper als in einer vorgegebenen Anzahl stufbare Kondensatoren abgebildet. Hierbei wird pro Stufe die gleiche Kapazität zu- bzw. abgeschaltet. Die dezentrale Stufung erfolgt bei Überschreiten eines vorgegebenen Totbandes um die gewünschte Sollspannung U_{Soll} . Hierbei erfolgt eine Stufung nur dann, wenn die Spannung U bereits T_{Totband} außerhalb des Totbandes $U \pm \Delta U_{\text{Totband}}$ lag und außerdem mindestens $T_{\text{Schaltabstand}}$ seit dem letzten Stufungsvorgang vergangen sind. Die Anzahl der zu schaltenden Stufen wird unmittelbar vor der Stufung anhand der aktuellen Spannung und der Sensitivität $\frac{dU}{dQ}$ bestimmt. Untersucht werden folgende Designs mit jeweils maximal 300 Mvar Blindleistungsbereitstellung bei Bemessungsspannung $U_r = 400$ kV:

- D1: 300 Mvar in 1 Stufe
- D2: 300 Mvar in 2 Stufen mit jeweils 150 Mvar
- D3: 300 Mvar in 5 Stufen mit jeweils 60 Mvar

Diese Designs werden kombiniert mit folgenden Regelungsparametersets mit jeweils identischer Sollspannung $U_{\text{Soll}} = 405 \text{ kV}$:

- R1: $U_{\text{Totband}} = 5 \text{ kV}$, $T_{\text{Totband}} = 60 \text{ s}$, $T_{\text{Schaltabstand}} = 300 \text{ s}$
- R2: $U_{\text{Totband}} = 2 \text{ kV}$, $T_{\text{Totband}} = 60 \text{ s}$, $T_{\text{Schaltabstand}} = 300 \text{ s}$
- R3: $U_{\text{Totband}} = 5 \text{ kV}$, $T_{\text{Totband}} = 60 \text{ s}$, $T_{\text{Schaltabstand}} = 120 \text{ s}$
- R4: $U_{\text{Totband}} = 2 \text{ kV}$, $T_{\text{Totband}} = 60 \text{ s}$, $T_{\text{Schaltabstand}} = 120 \text{ s}$
- R5: $U_{\text{Totband}} = 5 \text{ kV}$, $T_{\text{Totband}} = 30 \text{ s}$, $T_{\text{Schaltabstand}} = 300 \text{ s}$
- R6: $U_{\text{Totband}} = 2 \text{ kV}$, $T_{\text{Totband}} = 30 \text{ s}$, $T_{\text{Schaltabstand}} = 300 \text{ s}$
- R7: $U_{\text{Totband}} = 5 \text{ kV}$, $T_{\text{Totband}} = 30 \text{ s}$, $T_{\text{Schaltabstand}} = 120 \text{ s}$
- R8: $U_{\text{Totband}} = 2 \text{ kV}$, $T_{\text{Totband}} = 30 \text{ s}$, $T_{\text{Schaltabstand}} = 120 \text{ s}$

Jede Kombination der Designs D1 – D3 mit den Regelungsparametersets R1 – R8 stellt eine der im folgenden betrachteten MSCDN-Konfigurationen dar.

2.3 Verfahren

Die Kombination der die Systemkomponenten beschreibenden Gleichungen sowie die Leistungsflussgleichungen ergeben ein differential-algebraisches Gleichungssystem. Dieses Gleichungssystem wird mit einem impliziten Integrationsalgorithmus gelöst, wobei Ereignisse, wie sie die Stufungen von MSCDN darstellen, berücksichtigt werden. Das in diesem Paper angewandte Verfahren zur Simulation des vorgestellten Untersuchungsszenarios im Zeitbereich wurde in [4] vorgestellt.

3 Untersuchungsergebnisse

Untersucht werden die sich ergebenden Spannungsverläufe für die vorgestellten Szenarien. Hierbei wird jeweils der Spannungsverlauf am MSCDN im Zeitbereich für die unterschiedlichen Übertragungsaufgaben bei unterschiedlichen MSCDN-Konfigurationen dargestellt.

3.1 Basisszenario

Die Darstellung des Spannungsverlaufs im Basisszenario soll insbesondere der Plausibilisierung des Untersuchungsszenarios dienen. Weiterhin soll durch die Auswertung unterschiedlicher Kenngrößen der Spannungsverläufe bei variierten MSCDN-Konfigurationen die Einschränkung der im Anschluss detaillierter betrachteten MSCDN-Konfigurationen motiviert werden.

3.1.1 Spannungsverlauf mit dauerhaft ein- bzw. ausgeschaltetem MSCDN

In Abbildung 4 sind die Spannungsverläufe an Sammelschiene L mit dauerhaft zugeschaltetem sowie dauerhaft abgeschaltetem MSCDN (Design D1) dargestellt.

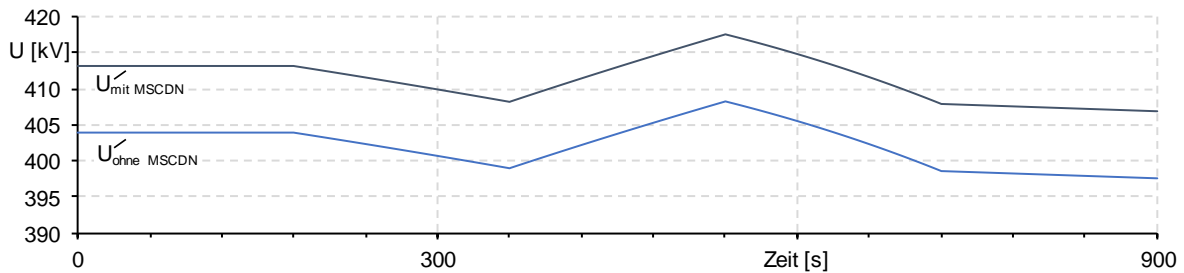


Abbildung 4: Spannungen an Sammelschiene L im Basisszenario mit dauerhaft zugeschaltetem ($U_{mit\ MSCDN}$) bzw. dauerhaft abgeschaltetem ($U_{ohne\ MSCDN}$) MSCDN.

Es ist zu erkennen, dass sich die Spannungen sowohl mit dauerhaft zugeschaltetem, als auch mit dauerhaft abgeschaltetem MSCDN im Basisszenario innerhalb des betrieblich gewünschten Spannungsbandes von 390 kV – 420 kV befinden [5]. Vor dem Hintergrund, dass im Betrieb möglichst hohe Spannungen innerhalb des zulässigen Spannungsbandes eingehalten werden sollen, ist in dem Basisszenario der Einsatz des MSCDN somit als vorteilhaft anzusehen.

3.1.2 Auswirkung von Leitungsausfällen

In Abbildung 5 sind die Spannungsverläufe an Sammelschiene L mit dauerhaft zugeschaltetem sowie dauerhaft abgeschaltetem MSCDN (Design D1) für den Ausfall einer Leitung zwischen A und L bzw. einer Leitung zwischen B und L dargestellt.

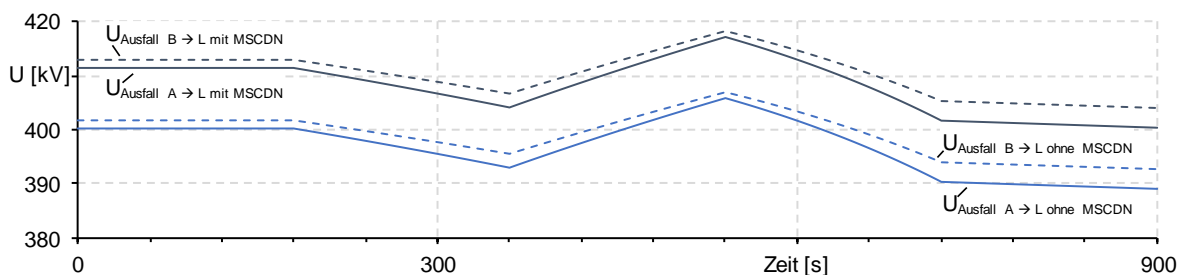


Abbildung 5: Spannungen an Sammelschiene L im Basisszenario mit dauerhaft zugeschaltetem (mit MSCDN) bzw. dauerhaft abgeschaltetem (ohne MSCDN) MSCDN für Ausfall einer Leitung zwischen A und L (Ausfall $A \rightarrow L$) bzw. einer Leitung zwischen B und L (Ausfall $B \rightarrow L$).

Der Ausfall einer Leitung zwischen A und L ist hinsichtlich der Auswirkungen auf die Spannungen an Sammelschiene L kritischer als der Ausfall einer Leitung zwischen B und L. Dies liegt daran, dass in dem betrachteten Szenario zusätzlich zum Leistungsfluss von A nach L Leistung aus dem Netzbereich A in den Netzbereich B transportiert wird. Entsprechend fließt mehr Leistung von A nach L als von L nach B, weshalb der Blindleistungsbedarf der Leitung entsprechend höher ist. Entsprechend führt dies bei Ausfall einer Leitung zwischen A und L zu geringeren Spannungen an Sammelschiene L als bei Ausfall einer Leitung zwischen B und L. Bei beiden betrachteten Ausfällen bleibt die Spannung in dem einzuhaltenden Spannungsband von 380 kV – 420 kV [5]. Beim weniger kritischen Ausfall bleiben die Spannungen sogar ohne MSCDN innerhalb des im Grundfall zulässigen Spannungsbandes oberhalb von 390 kV.

3.1.3 Spannungsverläufe bei variierten MSCDN-Konfigurationen

Nachdem in den vorigen Abschnitten das Basisszenario durch Betrachtung der sich ergebenden Spannungsverläufe mit und ohne dauerhaft zu-/abgeschalteten MSCDN plausibilisiert wurden, sollen im Folgenden verschiedene MSCDN-Konfigurationen betrachtet werden. Dazu wurden sämtliche Kombinationen der Designs D1 – D3 sowie der Regelungsparametersets R1 – R8 simuliert und die sich ergebenden Spannungsverläufe an Sammelschiene L ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

	D1	D2	D3		D1	D2	D3		D1	D2	D3
R1	403,67	403,67	403,37	R1	398,29	398,29	398,29	R1	2,78	2,78	2,46
R2	404,17	403,96	403,61	R2	398,91	397,62	397,62	R2	2,64	3,96	3,65
R3	403,67	403,67	403,37	R3	398,29	398,29	398,29	R3	2,78	2,78	2,46
R4	404,17	404,60	404,29	R4	398,91	399,22	399,22	R4	2,64	2,11	1,95
R5	405,27	404,97	405,54	R5	397,48	399,09	399,09	R5	6,41	3,41	3,66
R6	402,20	404,26	403,85	R6	397,48	397,78	397,78	R6	2,96	3,60	3,29
R7	405,21	403,88	404,47	R7	398,46	398,46	398,46	R7	3,46	2,72	2,70
R8	404,46	404,91	404,43	R8	398,05	401,12	401,12	R8	4,06	1,70	1,66

Tabelle 1: Mittelwert (links), Minimum (mitte) und Standardabweichungen (rechts) der Spannungen an Sammelschiene L in kV bei verschiedenen MSCDN-Konfigurationen im Basisszenario.

Bei Betrachtung lediglich der Mittelwerte der sich innerhalb des Simulationszeitraums von 15 min ergebenden Spannungsbeträge an Sammelschiene L ist nicht erkennbar, dass ein Design oder ein Regelungsparameterset einem anderen grundsätzlich überlegen ist. So hat etwa die Verkleinerung des Totbandes bei R1 – R4 einen erhöhenden Einfluss auf die mittlere Spannung, bei R5/R6 führt das verkleinerte Totband in Verbindung mit dem hohen Mindestschaltabstand und einer verkürzten Zeit T_{Totband} allerdings zu niedrigeren mittleren Spannungen. Beim Vergleich von R7 und R8 ist keine eindeutige Auswirkung erkennbar. Insgesamt ist zu erkennen, dass sowohl die unterschiedlichen Designs als auch die unterschiedlichen Regelungsparametersets teilweise deutliche Auswirkungen nicht nur im Detail, sondern auch auf die mittleren Spannungen haben.

Hinsichtlich der Spannungshaltung sind insbesondere auch die minimal auftretenden Spannungen von Interesse. Der Vergleich dieser im Hinblick auf die untersuchten Designs zeigt, dass bereits eine leichte Erhöhung der Stufenzahl eine deutliche Auswirkung auf die Minimalspannungen hat, eine weitere Erhöhung der Stufenzahl in dem hier betrachteten Szenario allerdings keine Auswirkung auf jene hat. Im Hinblick auf die simulierten Regelungsparametersets führt R8 zu den höchsten Minimalspannungen und R4 zu den zweithöchsten. Hierbei ist der Unterschied zu R5 außer bei Design D1 allerdings sehr gering.

Als Volatilitätsmaß der Spannungsverläufe sind ebenfalls die Standardabweichungen der Spannungsverläufe dargestellt. Hier ist erkennbar, dass sowohl die Regelungsparametersets als auch das Design die Volatilität der Spannungen stark beeinflussen. Parameterset R5 führt bei nur einer Stufe (D1) zu einer fast viermal so großen Standardabweichung wie Parameterset R8 mit zwei oder fünf Stufen (D2, D3). Insgesamt erscheinen für das betrachtete Szenario die Kombinationen von Design D2/D3 mit dem Parameterset R8 als den anderen Kombinationen gegenüber vorzuziehen.

In Abbildung 6 ist exemplarisch der Spannungsverlauf für die Kombination des Designs D2 mit Parameterset R1 (D2R1) dem Design D3 mit Parameterset R8 (D3R8) gegenübergestellt.

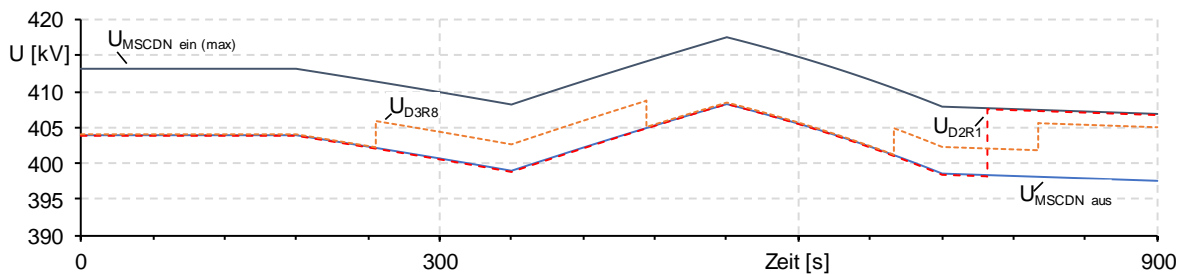


Abbildung 6: Spannungen an Sammelschiene L im Basisszenario mit dezentral geregelter MSCDN mit Design D2 und Parameterset R1 (U_{D2R1}) sowie Design D3 und Parameterset R8 (U_{D3R8}). Zum Vergleich sind außerdem die Spannungen bei dauerhaft maximal gestuftem ($U_{MSCDN\ ein\ (max)}$) bzw. dauerhaft abgeschaltetem ($U_{MSCDN\ aus}$) MSCDN dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass das verkleinerte Totband sowie geringere Verzögerungszeiten erwartungsgemäß mit einer erhöhten Schalthäufigkeit aber auch einer verbesserten Spannungshaltung einhergehen. So wird bei Verwendung der Konfiguration D3R8 vier Mal gestuft, während bei Konfiguration D2R1 nur ein Stufungsvorgang stattfindet. Bei der Konfiguration D2R1 ist zu erkennen, dass die Spannung nach etwa 5 min das Totband überschreitet, da der Zeitraum allerdings kleiner als die vorgegebene Mindestzeit von 1 min ist, wird kein Stufungsvorgang ausgelöst.

3.2 Volatiles Szenario

Im Folgenden werden die Auswirkungen der erhöhten Volatilität der Übertragungsaufgabe im volatilen Szenario anhand unterschiedlicher MSCDN-Konfigurationen dargestellt. Dazu wird wie bei der Simulation des Basisszenarios zunächst die Situation ohne Ausfall und im Anschluss eine Ausfallsituation dargestellt.

3.2.1 Spannungsverläufe bei variierten MSCDN-Konfigurationen

In Abbildung 7 sind die Spannungsverläufe an Sammelschiene L im volatilen Szenario, wie sie sich bei unterschiedlichen MSCDN-Konfigurationen ergeben, dargestellt.

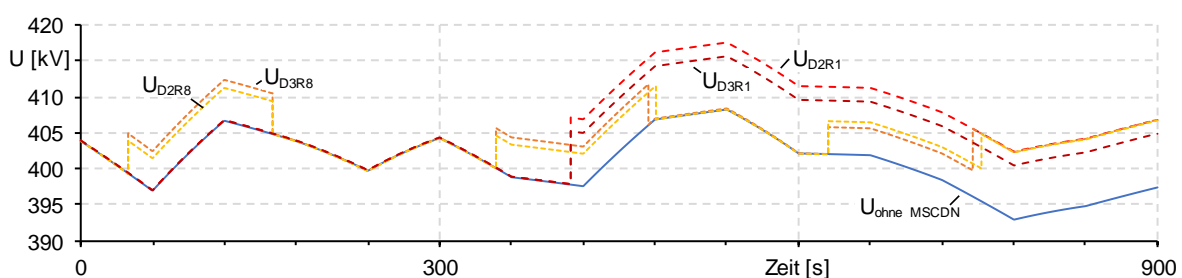


Abbildung 7: Spannungen an Sammelschiene L im volatilen Szenario mit dezentral geregelter MSCDN mit Design D2 bzw. D3 und Parameterset R1 bzw. R8 sowie ohne MSCDN.

Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Stufungsvorgänge durch die erhöhte Volatilität bei Parameterset R1 erhöht ist. Weiterhin wird deutlich, dass die Wahl des Regelungsparameterset einen deutlich höheren Einfluss auf den sich ergebenden

Spannungsverlauf hat, als die gewählte Stufenzahl. Bei Parameterset R1 findet die Stufung nun deutlich früher statt als im Basisszenario. Bei Parameterset R1 führt der hohe Mindestschaltabstand dazu, dass sich teilweise Spannungen deutlich oberhalb des Totbandes einstellen.

3.2.2 Spannungsverläufe bei variierten MSCDN-Konfigurationen und Leitungsausfall

Da der Ausfalls einer Leitung zwischen A und L als kritischer zu bewerten ist als der Ausfall einer Leitung zwischen B und L, ist in der folgenden Abbildung 8 der Spannungsverlauf lediglich bei Ausfall einer Leitung zwischen A und L im volatilen Szenario dargestellt.

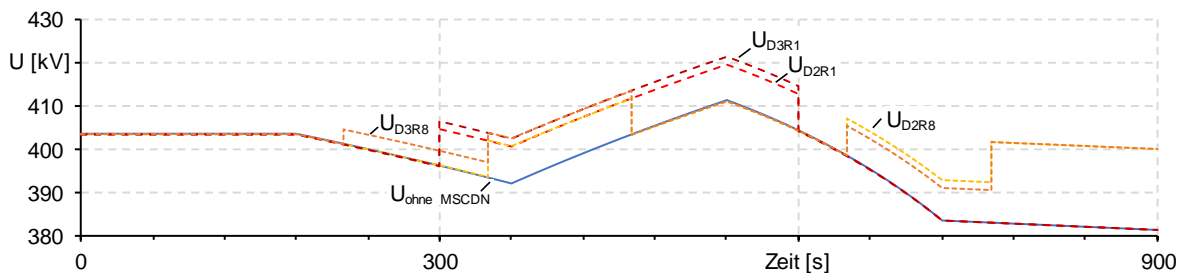


Abbildung 8: Spannungen an Sammelschiene L bei Ausfall einer Leitung zwischen A und L im volatilen Szenario mit dezentral geregelt MSCDN mit Design D2 bzw. D3 und Parameterset R1 bzw. R8 sowie ohne MSCDN.

Hier ist zu erkennen, dass bei Verwendung von Parameterset R8 die Spannung sogar in dem Spannungsband zwischen 390 kV und 420 kV gehalten werden kann. Auch bei Verwendung des Parametersets R1 bleibt die Spannung oberhalb der unteren Grenze des erweiterten Spannungsbandes von 380 kV, allerdings wird die obere Grenze von 420 kV kurzzeitig überschritten. Es ist erneut zu erkennen, dass das gewählte Parameterset einen deutlich größeren Einfluss auf den sich ergebenden Spannungsverlauf hat, als die gewählte Anzahl der Stufen. Am Ende des Simulationszeitraums kann auch mit Parameterset R8 die Sollspannung von 405 kV nicht mehr erreicht werden, da der MSCDN bereits maximal gestuft ist. Bei Verwendung von Parameterset R1 führt der Mindestschaltabstand in Verbindung mit dem Stufungsvorgang bei 10 min sowie den sich im Anschluss ergebenden relativ steilen Spannungsgradienten dazu, dass die Spannung bis an die Grenze des erweiterten Spannungsbandes fährt. Es ist allerdings zu beachten, dass unmittelbar nach Ende des Simulationszeitraums ein neuer Stufungsvorgang ausgelöst werden würde, und sich damit dieselben Spannungen wie bei Verwendung des Parametersets R1 einstellen würden.

3.3 Erhöhte elektrische Distanz

Im Folgenden soll untersucht werden, welche Auswirkungen erhöhte elektrische Distanzen zu Netzbereichen mit hinreichend vielen Synchrongeneratoren bzw. zu Wirkleistungseinspeisung und -bezug auf den sich ergebenden Spannungsverlauf haben. Dazu werden die Ersatzimpedanzen der Netzbereiche A und B auf 28Ω erhöht.

3.3.1 Spannungsverläufe im Basisszenario

In Abbildung 9 sind die sich ergebenden Spannungsverläufe im Basisszenario bei erhöhten elektrischen Distanzen und unterschiedlichen MSCDN-Konfigurationen dargestellt.

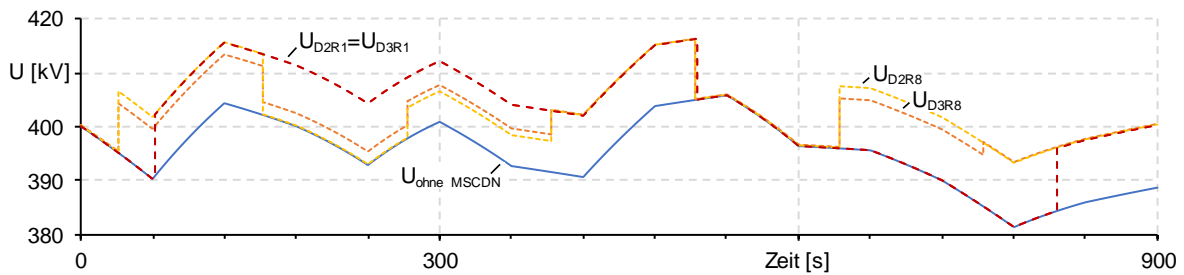


Abbildung 9: Spannungen an Sammelschiene L im Basisszenario bei erhöhten elektrischen Distanzen mit dezentral geregelt MSCDN mit Design D2 bzw. D3 und Parameterset R1 bzw. R8 sowie ohne MSCDN.

Es ist erkennbar, dass bei Verwendung des Parametersets R1 die Anzahl der Stufungsvorgänge durch Erhöhen der elektrischen Distanzen zunimmt. Die Stufung nach 10 min bei Parameterset R1 führt bei erhöhten elektrischen Distanzen in Verbindung mit dem vorgegebenen Mindestschaltabstand sowie dem relativ steilen Spannungsgradienten zu einer deutlichen Verletzung des Spannungsbandes. Obwohl das Spannungsband weniger als zwei Minuten verletzt ist, sinkt die minimale Spannung auf fast 380 kV. Bei Verwendung des Parametersets R8 mit geringeren Verzögerungszeiten kann das Spannungsband auch bei nur zwei Stufen eingehalten werden.

3.3.2 Spannungsverläufe im volatilen Szenario

Auch für das volatile Szenario wurden die elektrischen Distanzen erhöht und die sich ergebenden Spannungsverläufe für unterschiedliche MSCDN-Konfigurationen ermittelt und in Abbildung 10 dargestellt.

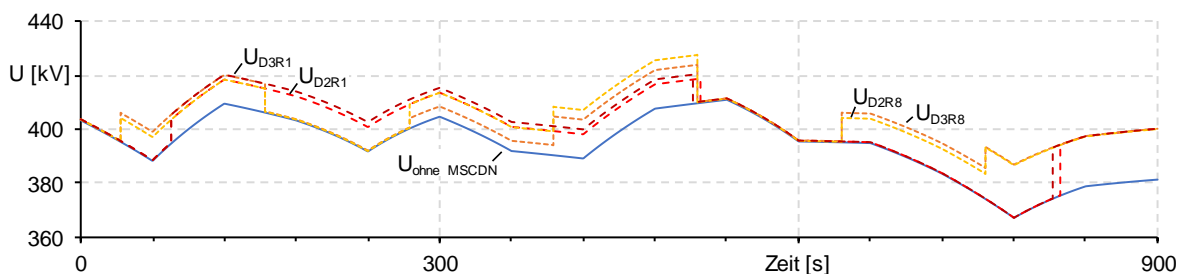


Abbildung 10: Spannungen an Sammelschiene L im volatilen Szenario bei erhöhten elektrischen Distanzen mit dezentral geregelt MSCDN mit Design D2 bzw. D3 und Parameterset R1 bzw. R8 sowie ohne MSCDN.

Es ist zu erkennen, dass die Erhöhung der elektrischen Distanzen im volatilen Szenario dazu führt, dass mit keinem der hier betrachteten Parametersets das Spannungsband durchgehend eingehalten werden kann. Bei Anwendung des Parametersets R1 sinkt die Spannung kurzzeitig unter 370 kV. Bei Anwendung des Parametersets R8 wird das Spannungsband nur knapp verletzt, doch auch hier wären verringerte Verzögerungszeiten und/oder verkleinerte Totbänder erforderlich, um das Spannungsband durchgehend einzuhalten. Abermals sind die Unterschiede insbesondere hinsichtlich der angewandten Parametersets und weniger bzgl. der Stufenzahl erkennbar. Gegen Ende des Simulationszeitraums sind bei allen dargestellten MSCDN-Konfigurationen die Spannungen wieder identisch. Insgesamt ist somit erkennbar,

dass sich bei Erhöhung der elektrischen Distanzen insbesondere im volatilen Szenario erhöhte Anforderungen an die Reaktionsgeschwindigkeit dezentraler MSCDN-Regelungen ergeben.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der hier vorgestellten exemplarischen Untersuchungen wurde die Fragestellung betrachtet, inwiefern einfache dezentrale Regelungen für den Einsatz stufbarer MSCDN der adäquaten Spannungshaltung auch bei volatiler Netzbelastung dienen. Hierzu wurden verschiedene MSCDN-Konfigurationen bei unterschiedlichen volatilen Übertragungsaufgaben simuliert. Die MSCDN-Konfigurationen unterschieden sich hierbei hinsichtlich der parametrisierten Verzögerungszeiten und Totbänder. Die exemplarischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich bei den hier betrachteten Szenarien einfache dezentrale Regelungen grundsätzlich zur Verbesserung der Spannungshaltung eignen. Es wurde allerdings auch deutlich, dass eine erhöhte Volatilität der Übertragungsaufgabe, Ausfälle sowie erhöhte elektrische Distanzen die Anforderungen an die Auslegung und Reaktionszeiten dezentraler Regelungen erhöhen. Nachfolgende Untersuchungen erfordern die Betrachtung weiterer dynamischer Wechselwirkungen, etwa mit Transformatorstufungen, spannungsabhängigen Lasten inkl. Lasterholung sowie zukünftig vermehrt dem Verteilnetzbetrieb.

Literatur

- [1] F. Martin, T. Sybel, J. Gärtner, Operation and Monitoring of MSCDN-Systems, ew 11/2012.
- [2] Y.-H. Wan, Wind Power Plant Behaviors: Analyses of Long-Term Wind Power Data, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, 2004.
- [3] D. Kamenschikow, M. Lösing, K. Vennemann, Spannungshaltung und Blindleistungsbereitstellung in hochausgelasteten 380-kV-Netzen, Netzregelung und Systemführung, München, Deutschland, 2013.
- [4] M. Maercks, S. Porada, A. Moser, Diskussion dynamischer und stationärer Spannungsstabilitätsuntersuchungen bei volatilen Übertragungsaufgaben, 15. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2018.
- [5] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, Tennet TSO GmbH, TransnetBW GmbH, Grundsätze für die Ausbauplanung des deutschen Übertragungsnetzes, Deutschland, 2018.