

Dynamisches Simulationsmodell für Q(U)-Regler und deren Steuerung durch einen Cluster-Regler im Verteilnetz

Dynamic Simulation Model for Q(U) Controller and its Driving with a Cluster Controller in Distribution Network

Ammar Salman¹, Prof. Dr.-Ing. Peter Zacharias², Nicolas Bihler¹, Roland Singer¹, Moritz Bader¹, Sönke Rogalla¹

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Tel. 0761 4588-5843, ammar.salman@ise.fraunhofer.de

² Universität Kassel, Fachgebietsleiter Elektrische Energieversorgungssysteme und Kompetenzzentrum für Dezentrale elektrische Energieversorgungstechnik

1 Einleitung

Beim Anschluss von mehreren Erneuerbare Energien-Anlagen (EEA) als dezentrale Erzeugungsanlagen (DEA) an das Stromnetz werden Spannungsanhebungen an einem oder mehreren Knotenpunkten verursacht. Der Grund dafür besteht in einer unter bestimmten Voraussetzungen möglichen Umkehrung der Lastflussrichtung. Der Netzanschluss von EEA erfolgt i.d.R. mittels Wechselrichter. Abbildung 1 zeigt das Ersatzschaltbild eines Wechselrichter (WR), der in ein Netz mit ohmsch-induktiver Netzimpedanz einspeist [1.].

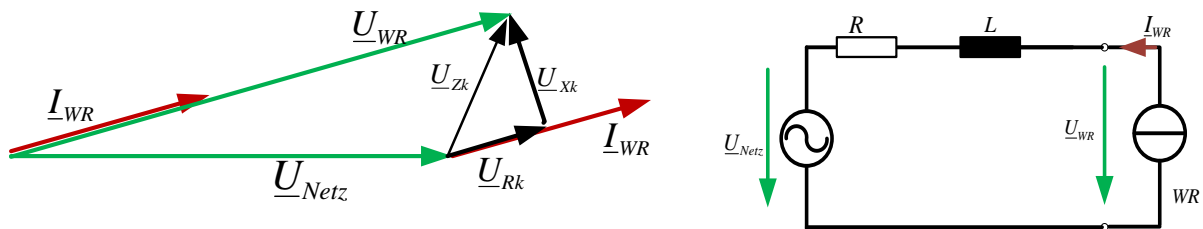


Abbildung 1: Kopplung eines Wechselrichters an das Netz und Zeigerdiagramm

Diese Herausforderungen sind durch Spannungsregelung lösbar. Die Grundidee zur Spannungshaltung bzw. -regelung am Verknüpfungspunkt des Stromnetzes besteht darin, Blindleistung vom Netz zu beziehen oder ins Netz einzuspeisen. Dieser Beitrag konzentriert sich auf das dynamische Verhalten von Q(U)-Reglern, also der spannungsabhängigen Vorgabe des Blindleistungswertes, und die Steuerung mehrerer lokaler Q(U)-Regler durch einen Cluster-Regler im Verteilnetz.

2 Konzept des Cluster-Reglers

In diesem Beitrag wird ein Cluster-Regler vorgeschlagen, der die Spannung des Netzes durch eine optimierte Einspeisung von Blindleistung regelt. Das Konzept bildet eine hybride Mischung aus dezentraler und zentraler Regelung.

Teilbereiche des Niederspannungsnetzes mit mehreren DEA und Verbrauchern bilden sogenannte Cluster. Die DEA innerhalb eines Clusters besitzen eigene Q(U)-Regler, die mit einer Q(U)-Kennlinie parametrisiert werden können. Mehrere Q(U)-Kennlinien mit unterschiedlicher Steilheit werden für jede DEA hinterlegt. Die Auswahl, welche Kennlinie für die Regelung verwendet werden soll, erfolgt durch ein Signal des zentralen Cluster-Reglers (Abbildung 2). Dieser wertet die Knotenspannungen der DEA seines Clusters aus und wählt für jeden Q(U)-Regler eine entsprechende Kennlinie, so dass die Blindleistungseinspeisung minimiert wird.

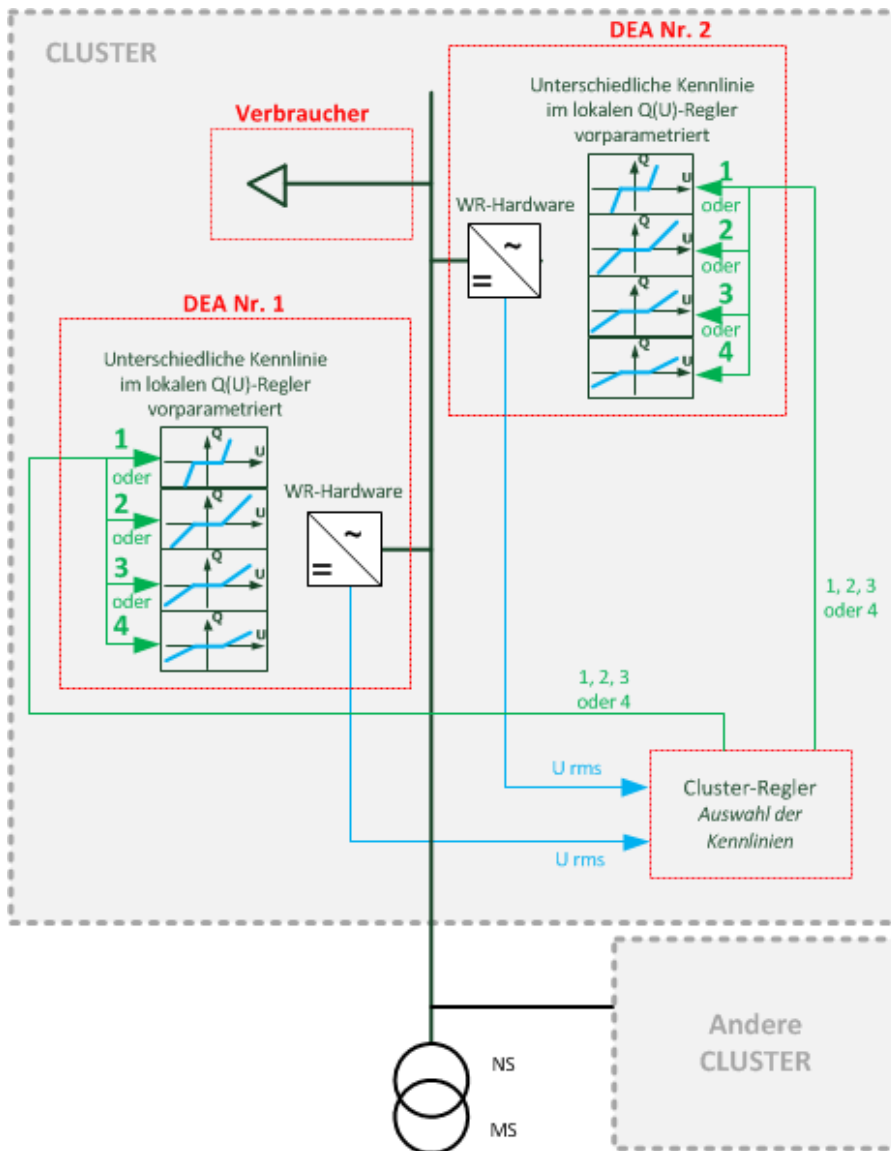


Abbildung 2: Konzept des Cluster-Reglers

Die Spannungsqualität bezeichnet die Übereinstimmung zwischen den aktuellen physikalischen Werten der Netzspannung und den von dem Netzbetreiber zugesagten Eigenschaften der Netzspannung. Bei der Spannungsqualität werden u.a. die folgende physikalischen Werte und Eigenschaften betrachtet und bewertet:

- Effektivwert der Knotenspannung
- Frequenzkonstanz
- Spannungseinbrüche (engl.: Dips)

- Flicker
- Spannungssymmetrie
- Oberschwingungsgehalt
- Transiente Überspannungen

Folgende Normen beschäftigen sich mit dem Thema Spannungsqualität aus unterschiedlichen Blickwinkeln:

- Die Normen EN 61000-3-2, EN 61000-3-3 (Rückwirkungen in Stromversorgungsnetzen, Oberschwingungen und Spannungsschwankungen) beschreiben, welcher Art ein Elektrogerät sein soll, damit sich die ins Stromnetz emittierten Störungen in Grenzen halten.
- Die Normen EN 61000-4-4, EN 61000-4-11 beschreiben, welche Spannungsqualität Elektrogerät tolerieren müsste, ohne dabei Schaden zu nehmen oder eine Funktionsstörung zu zeigen.
- EN 50160 definiert die Spannungsqualitätsmerkmale, die eine Stromkunde vom Energieversorger erwarten kann.
- EN 61000-4-7, EN 61000-4-15, EN 61000-4-30 schließlich beschreiben Messverfahren, mit denen die Einhaltung der EN 50160 gemessen und geprüft wird.

In diesem Beitrag wird das Thema der Spannungshaltung in einem Netz mit hoher Anzahl von DEA untersucht. In Betrieb führen die Spannungsabfälle über den Impedanzen der Leitungen des Verteilnetzes zu Spannungsanhebungen oder -absenkungen. Das Toleranzband der Knotenspannungen beträgt gemäß DIN 50160 $\pm 10\%$ der Nennspannung. Grenzwerte für schnelle Spannungsänderungen, d.h. die dynamische relative Änderung der Spannung, werden in der BDEW-Mittelspannungsrichtlinie [8.] und DIN 50160 wie folgt geregelt:

- Im Mittelspannungsnetz darf die Abschaltung einer DEA keine relative Spannungsänderung Δu_{max} größer als 2 % (bezogen auf U_n) verursachen. Ein solches Ereignis darf jedoch nicht häufiger als einmal in 3 Minuten auftreten. Bei einer gleichzeitigen Abschaltung einer oder mehrerer DEA ist keine relative Spannungsänderung Δu_{max} von größer als 5 % (bezogen auf U_n) erlaubt.
- Im Niederspannungsnetz darf die Abschaltung einer DEA keine relative Spannungsänderung Δu_{max} von größer als 3 % (bezogen auf U_n) verursachen. Solche Ereignisse dürfen jedoch nicht häufiger als einmal in 8 Minuten auftreten.

4 Spannungshaltung - Blindleistungsbedarf

Freileitungen sind weitere Betriebsmittel zur Energieübertragung. Kabel mit einer Kunststoffisolierung sind dabei von besonderer Bedeutung. Solche Kabel werden im Nieder-, Mittel- und Hochspannungsbereich verwendet. In Abbildung 3 ist eine vereinfachte Darstellung von Freileitung/Kabel als Impedanz dargestellt. Diese Abbildung zeigt, dass der Leitungsstrom an der Längsimpedanz der Leitung

$\underline{Z}_{Netz} = R_{Netz} + jX_{Netz} = \hat{Z} \cdot e^{j\psi}$ den komplexen Spannungsunterschied $\underline{\Delta U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$ bewirkt [3.]. Die in diesem Kapitel verwendeten Variablen werden in Abbildung 3 definiert.

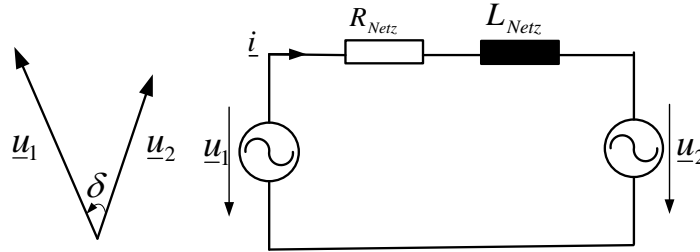


Abbildung 3 Vereinfachte Darstellung einer Leitung durch ihre Längsimpedanz

Aus den Spannungen $\underline{u}_1 = \hat{u}_1 \cdot e^{j\omega_N t}$ und $\underline{u}_2 = \hat{u}_2 \cdot e^{j\omega_N t} \cdot e^{-j\delta}$ sowie der Netzimpedanz $Z = R_{Netz} + j\omega_N L_{Netz}$ lässt sich der komplexe Strom gemäß dem 2. Kirchhoffschen Gesetz (Maschenregel) berechnen [4.], [5.]:

$$\underline{i} = \frac{\underline{\Delta u}}{R_{Netz} + j\omega_N L_{Netz}} = \frac{\underline{u}_1 - \underline{u}_2}{R_{Netz} + j\omega_N L_{Netz}} = \frac{\hat{u}_1 \cdot e^{j\omega_N t} - \hat{u}_2 \cdot e^{j\omega_N t} \cdot e^{-j\delta}}{R_{Netz} + j\omega_N L_{Netz}} = \frac{(\hat{u}_1 - \hat{u}_2 \cdot e^{-j\delta}) \cdot e^{j\omega_N t}}{R_{Netz} + j\omega_N L_{Netz}}$$

$$= \frac{[\hat{u}_1 - \hat{u}_2 \cdot (\cos \delta - j \sin \delta)] \cdot e^{j\omega_N t}}{R_{Netz} + j\omega_N L_{Netz}} \quad \text{mit} \quad X_{Netz} = \omega_N L_{Netz} \quad \text{und} \quad Z^2 = R_{Netz}^2 + X_{Netz}^2$$

⇒

$$\underline{i} = \left[\frac{\hat{u}_1 R_{Netz} - \hat{u}_2 R_{Netz} \cos \delta + \hat{u}_2 X_{Netz} \sin \delta}{Z^2} - j \left(\frac{\hat{u}_1 X_{Netz} - \hat{u}_2 R_{Netz} \sin \delta - \hat{u}_2 X_{Netz} \cos \delta}{Z^2} \right) \right] \cdot e^{j\omega_N t}$$

$$\Rightarrow \underline{i} = I_w - jI_B$$

Dann kann man aus Spannung und Strom die Scheinleistung bestimmen:

$$\underline{S} = P_1 + jQ_1 = \frac{1}{2} \underline{u}_1 \underline{i}^*$$

$$= \frac{1}{2} \hat{u}_1 \cdot \left[\frac{\hat{u}_1 R_{Netz} - \hat{u}_2 R_{Netz} \cos \delta + \hat{u}_2 X_{Netz} \sin \delta}{Z^2} + j \left(\frac{\hat{u}_1 X_{Netz} - \hat{u}_2 R_{Netz} \sin \delta - \hat{u}_2 X_{Netz} \cos \delta}{Z^2} \right) \right] \cdot e^{j\omega_N t} \cdot e^{-j\omega_N t}$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{\hat{u}_1^2 R_{Netz} - \hat{u}_1 \hat{u}_2 (R_{Netz} \cos \delta + X_{Netz} \sin \delta)}{Z^2} + j \left(\frac{\hat{u}_1^2 X_{Netz} - \hat{u}_1 \hat{u}_2 \cdot (R_{Netz} \sin \delta + X_{Netz} \cos \delta)}{Z^2} \right) \right)$$

Damit ergeben sich Wirk- und Blindleistung zu:

$$P_1 = \frac{u_{1,eff}^2 \cdot \cos \Psi - u_{1,eff} \cdot u_{2,eff} \cdot (\cos \Psi \cdot \cos \delta + \sin \Psi \cdot \sin \delta)}{Z}$$

$$Q_1 = \frac{u_{1,eff}^2 \cdot \sin \Psi - u_{1,eff} \cdot u_{2,eff} \cdot (\cos \Psi \cdot \sin \delta + \sin \Psi \cdot \cos \delta)}{Z}$$

$$Q_1 = f(\Delta u)$$

Die Anteile der Wirk- und Blindleistungen verursachen z.B. bei der Einspeisung einer DEA eine Änderung der Spannung.

Ausgehend von der Netzimpedanz nach DIN EN 61000-3-3 von $\underline{Z} = 0,4 \cdot \Omega + j\omega \cdot 0,8 \cdot \Omega$ für das Niederspannungsnetz zeigt sich, dass der Netzimpedanzwinkel $\Psi = 32^\circ$ ist. Abbildung 4 zeigt die übertragbare Blindleistung in Abhängigkeit des Netzimpedanzwinkels und der Winkeldifferenz der Spannung.

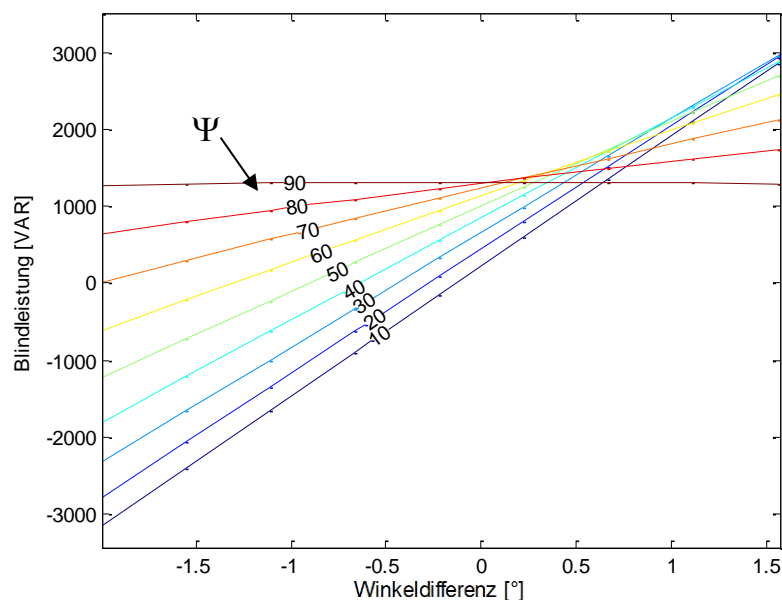


Abbildung 4: Blindleistung in Abhängigkeit des Netzimpedanzwinkels und der Winkeldifferenz

In Abbildung 5 wird anstatt der Winkeldifferenz die Spannungsdifferenz der Spannungsquellen variiert. Der Betrag der Netzimpedanz wird beispielsweise (Vorschlag aus [4.]) bei $0,5 \Omega$ konstant gehalten, die Winkeldifferenz der Spannungsquellen beträgt 2° . Der Netzimpedanzwinkel wird von 0 bis 90° verändert [4.].

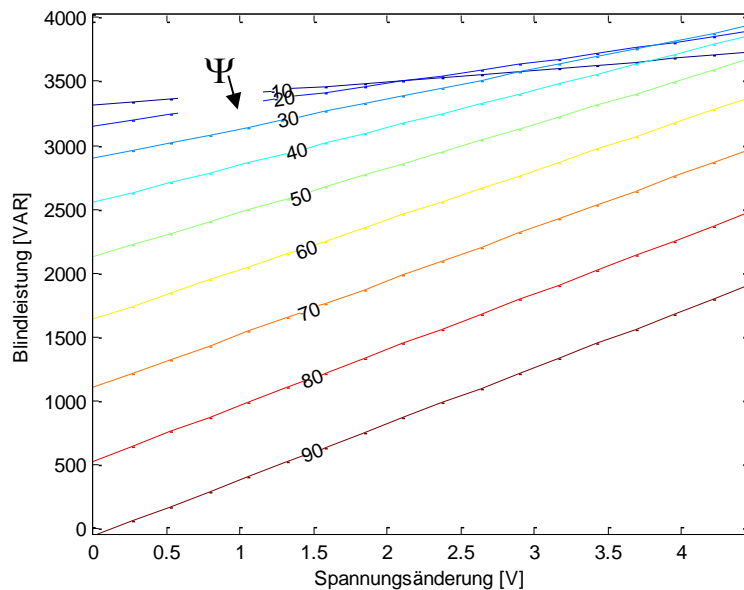


Abbildung 5: Blindleistung in Abhängigkeit des Netzimpedanzwinkels und Spannungsänderung

Die Grundidee zur Spannungshaltung am Verknüpfungspunkt des Netzes durch EEA-Regelung besteht darin, Blindleistung vom Netz zu beziehen oder ins Netz zu injizieren. Moderne Wechselrichter bieten die Möglichkeit, Blindleistung zu beziehen oder abzugeben [6.]. Die Hersteller von Wechselrichtern für die MS-Ebene haben die dafür benötigten Funktionalitäten gemäß [8.] bereits in ihre Produkte integriert. Die spannungsabhängige Vorgabe des Blindleistungswertes erfolgt hierbei durch den Q(U)-Regler.

5 Messung

Nach der BDEW-Mittelspannungsrichtlinie [8.] müssen Erzeugungseinheiten, welche an das Mittelspannungsnetz angeschlossen werden, in der Lage sein, die Blindleistung nach einer parametrierbaren Kennlinie in Abhängigkeit der Spannung zu regeln (Q(U)-Kennlinie). Die sich aus der Kennlinie ergebenden Sollwerte für die Blindleistung müssen sich automatisch, nach einer einstellbaren Zeit im Bereich zwischen 10 und 60 Sekunden, einstellen. Die unterschiedlichen Zeitkonstanten dienen dazu, Wechselwirkungen, beispielsweise mit Transformatoren mit Stufenschalter oder der Spannungsregelung anderer Erzeugungseinheiten im Netz, und dadurch verursachte Störungen, wie etwa Schwingungen, durch Anpassung der Zeitkonstante zu minimieren.

Die Eigenschaften der Q(U)-Regelung von Erzeugungseinheiten werden, im Rahmen der Zertifizierung dieser, messtechnisch nachgewiesen. Dies erfolgt auf Grundlage der TR3 [2.]. Dabei wird das Verhalten der Q(U)-Regelung mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten vermessen.

In Abbildung 6 sind beispielhaft die Ergebnisse einer Vermessung nach TR3 dargestellt. Dabei ist oben rechts zu erkennen, dass der Wechselrichter der parametrierten Kennlinie (rot) folgt, da die Messpunkte (blau) auf der Kennlinie liegen. Oben rechts ist der zeitliche Verlauf der Blindleistung (rot) in Abhängigkeit der Spannung (violett)

dargestellt, ebenfalls zu erkennen ist die Wirkleistung (blau). Unten links ist der Verlauf des Verschiebungsfaktors dargestellt, sowie unten rechts die Änderung der Blindleistung. Die im Beispiel dargestellte Vermessung wurde mit einer Einzelzeit von 10 Sekunden durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Änderung der Blindleistung von 2 % der Nennleistung pro Sekunde, bei der eingestellten Kennlinie mit einer maximalen Blindleistung von 20 % der Nennleistung. Die in der Abbildung dargestellten Werte sind alle bezogen auf die Nennwerte des Wechselrichters, Wirk- und Blindleistung auf die Nennwirkleistung, die Spannung auf Nennspannung.

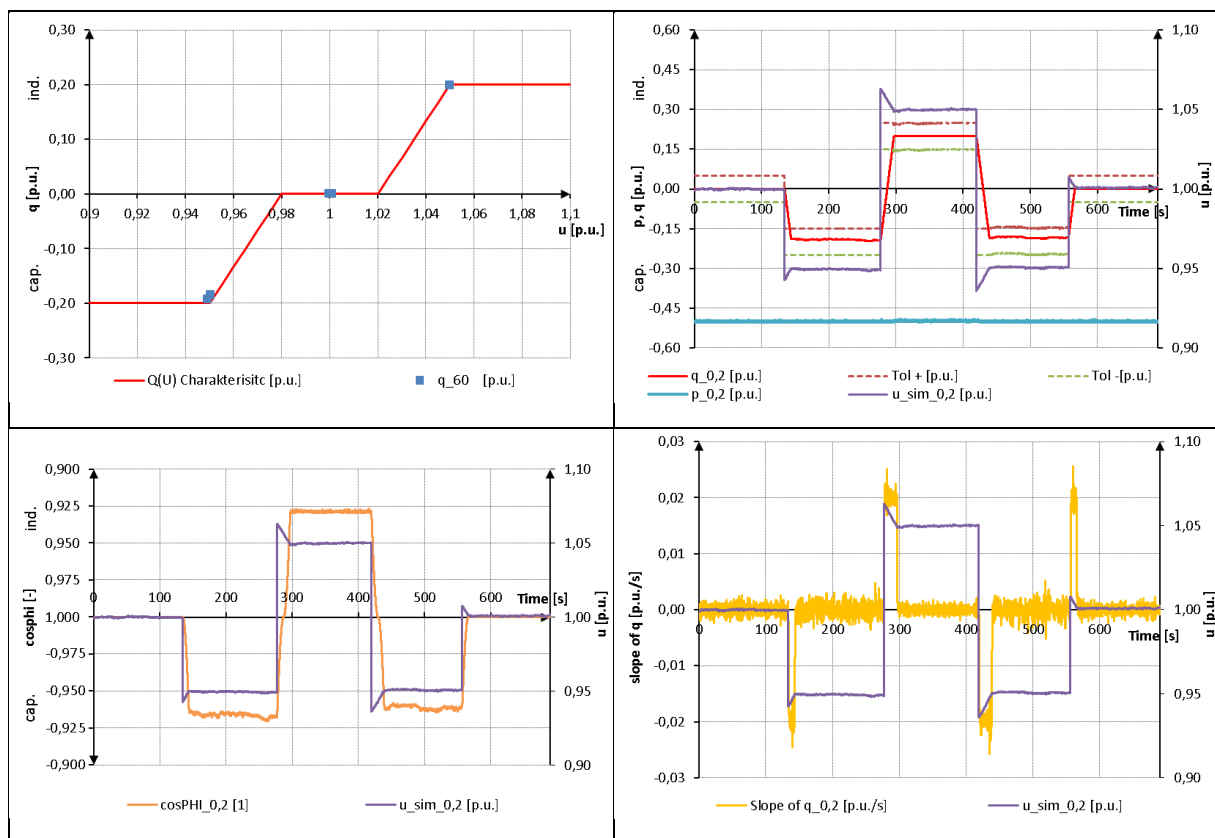


Abbildung 6: Messdaten einer Q(U) Kennlinienvermessung nach TR3

Um in dem Simulationsmodell eine realitätsnahe Q(U)-Kennlinie zu implementieren, wurden diese Q(U)-Kennlinien bei einem WR von 1 MW gemessen und der Q(U)-Regler des Simulationsmodells wurde damit parametrisiert. Im Modell sind die Punkte der Kennlinie als Parameter eingegeben und bilden die statische Kennlinie des gemessenen Wechselrichters nach. Auch die Dynamik der Blindleistungseinspeisung des gemessenen Wechselrichters wird in dem Simulationsmodell nachgebildet.

6 Q(U)-Regler Simulation-Modell

Für die Modellierung und Simulation wird die Netzberechnungssoftware DiGSILENT PowerFactory verwendet. Es kann insbesondere Folgendes nachbilden:

- Dynamisches Verhalten der Blindleistungsregelung,

- Einspeisung der Blindleistung nach dem vorgegebenen Sollwert (Q(U)-Regelung),
- Begrenzung der Ströme auf die Nennwerte.

Gemäß der BDEW-Richtlinie muss solch eine Regelung in den dezentralen Erzeugungseinheiten vorhanden sein. Der Regler kann durch eine einstellbare Kennlinie parametrisiert werden. Das Modell des Q(U)-Regler setzt die in Abbildung 6 gezeigte Q-U-Kennlinie um. Abhängig von der gemessenen Spannung wird ein entsprechender Sollwert für die Blindleistung ausgegeben. Das Q(U)-Simulationsmodell verwendet die gemessenen Spannungswerte an den Anschlusspunkten und speist die entsprechende Blindleistung in das Netz ein.

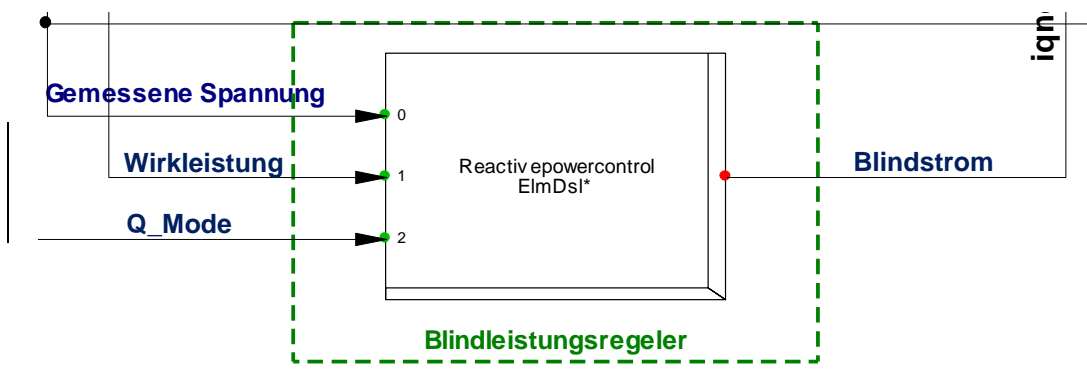


Abbildung 7: Abschnitt der Regler-Struktur

Die Abbildung 7 zeigt einen Abschnitt des Blindleistungsreglers. Die Blindleistung am Ausgang kann je nach vorgegebenem Wert von Q_Mode in Abhängigkeit der Wirkleistung ($\cos\phi(P)$), Spannung (Q(U)) oder als konstanter Wert ausgegeben werden. Für diese Arbeit wird die Q(U)-Regelung verwendet.

In dem Simulationsmodell werden die Kennlinien anhand von parametrierbaren Punkten in der Q-U-Ebene als Matrix definiert. Im Datamanager von PowerFactory können die Koordinaten der Punkte der Kennlinie eingegeben werden (siehe Abbildung 9). Das Simulationsmodell extrapoliert dann linear die Werte der Kennlinie zwischen den eingestellten Punkten. Die Dynamik der Einspeisung wird auch anhand der Messdaten (Abbildung 6) nachgebildet. Abbildung 8 zeigt die Struktur des Q(U)-Reglers, in dem die Dynamik und die statische Kennlinie modelliert werden.

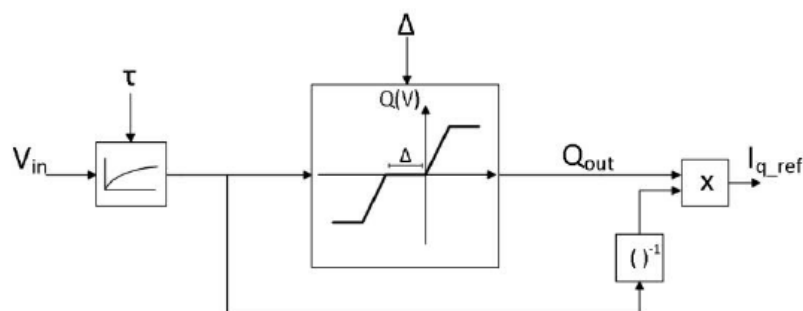


Abbildung 8: Regelung-Struktur des Q(U)-Reglers

Common Model - NS-MS\ClusterA1-Signal\PV2-A3\MS-PV2-A3\PowerCont

Basic Data		General	Advanced 1	Advanced 2	Advanced 3
Description		Characteristics:			
Size	pq_x	pq_y	qu1_x	qu1_y	
	0.	0.	12.	2.	
1	0.	0.	0,88	0,2	
2	0.	0.	0,89	0,175	
3	0.	0.	0,9	0,15	
4	0.	0.	0,925	0,075	
5	0.	0.	0,935	0,05	
6	0.	0.	0,95	0.	
7	0.	0.	1.	0.	
8	0.	0.	1,05	0.	
9	0.	0.	1,075	0,075	
10	0.	0.	1,1	-0,15	
11	0.	0.	1,11	0,175	
▶12	0.	0.	1,12	-0,2	

Abbildung 9: Q-U- Parameter

7 Cluster-Regler im Verteilnetz

Abbildung 10 zeigt die Struktur eines Nieder- und Mittelspannungsnetzes bestehend aus Energieerzeugern, Verbrauchern, Transformatoren und Leitungen.

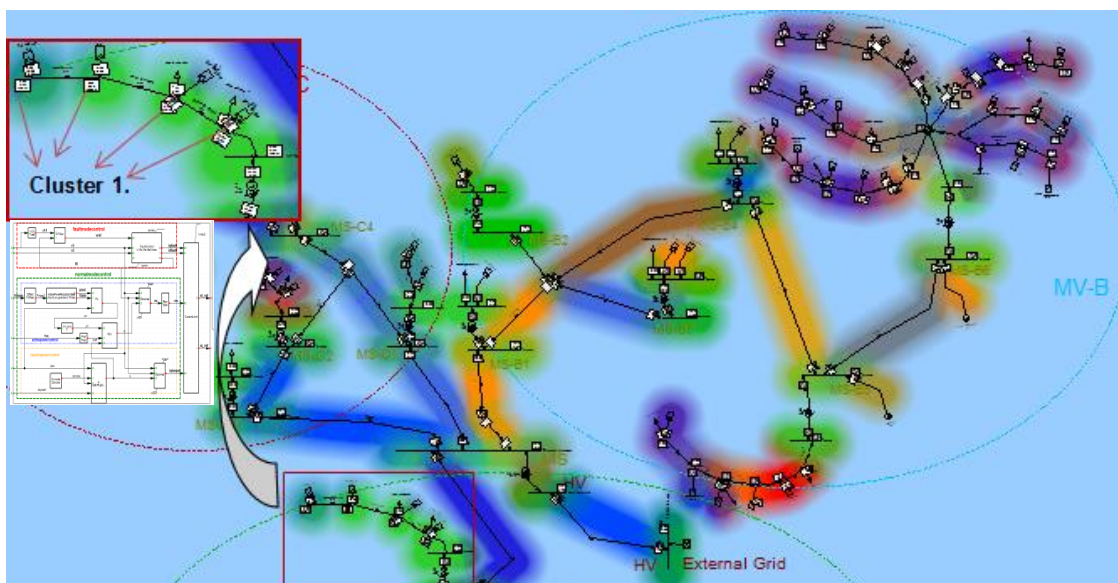


Abbildung 10: Struktur eines Nieder- und Mittelspannungsnetzes ohne Cluster-Regler – Im roten Bereich treten unzulässige Spannungen auf.

Im PowerFactory-Simulationsmodell sind für jede Erzeugungseinheit mehrere Q(U)-Kennlinien mit unterschiedlich starker Spannungsabhängigkeit hinterlegt. Eine der Kennlinien kann durch ein Befehlssignal des überlagerten Cluster-Reglers ausge-

wählt werden. Der Cluster-Regler gibt so vor, welcher lokale Regler eine Blindleistung injizieren soll.

Dazu vergleicht er die Spannungsüberhöhungen an den Anschlusspunkten der verschiedenen DEA und wählt den Q(U)-Regler am Knotenpunkt mit der größten Überhöhung. Für diesen Regler wählt er zunächst die Kennlinie mit der stärksten Spannungsabhängigkeit und somit der größten Blindleistungseinspeisung.

Liegt der neue Wert am Anschlusspunkt nun unterhalb des maximalen Spannungswertes, wird die nächste, flachere Kennlinie gewählt. Dieser Vorgang wird fortgesetzt, bis die Spannung wieder den Grenzwert überschreitet oder die letzte Kennlinie erreicht wird, ohne den maximalen Spannungswert zu verletzen. Im ersten Fall wird die vorherige Kennlinie, im zweiten Fall die aktuelle Kennlinie als optimale Q(U)-Kennlinie gewählt.

Liegt die Spannung am Anschlusspunkt für die steilste Q(U)-Kennlinie immer noch über dem Maximalwert, wird der erste Q(U)-Regler, derjenige mit der größten Spannung, deaktiviert. Dann wird eine Kennlinie für den Q(U)-Regler des Energieerzeugers mit der zweitgrößten Spannungsüberhöhung ermittelt.

Der Vorgang setzt sich fort, bis die optimale Blindleistungseinspeisung gefunden ist.

Wenn sich die Netzverhältnisse ändern und keine Spannungserhöhung mehr existiert, d.h. wenn die größte Spannung wieder unter definierte Werte fällt, sendet der Cluster-Regler der Anlage ein Signal, um die Q(U)-Kennlinie zu deaktivieren.

8 Vergleich zwischen lokaler und zentraler Blindleistungsregelung

In Abbildung 11 zeigt sich der Unterschied zwischen einer lokalen Blindleistungsregelung für eine Erzeugungsanlage und der zentralen Regelung durch einen Cluster-Regler. Dargestellt sind die Ergebnisse für Cluster 1 aus Abbildung 9. In den oberen Diagrammen sind die Spannungen an den Anschlusspunkten der vier Erzeugungsanlagen und darunter die Blindleistungseinspeisung der PV-Anlage mit dem aktivierten Q(U)-Regler zu sehen. Die beiden linken Graphen zeigen das Verhalten ohne Q(U)-Regelung, die mittleren Graphen das Verhalten bei lokaler Q(U)-Regelung und die rechten Graphen das Verhalten mit Cluster-Regler.

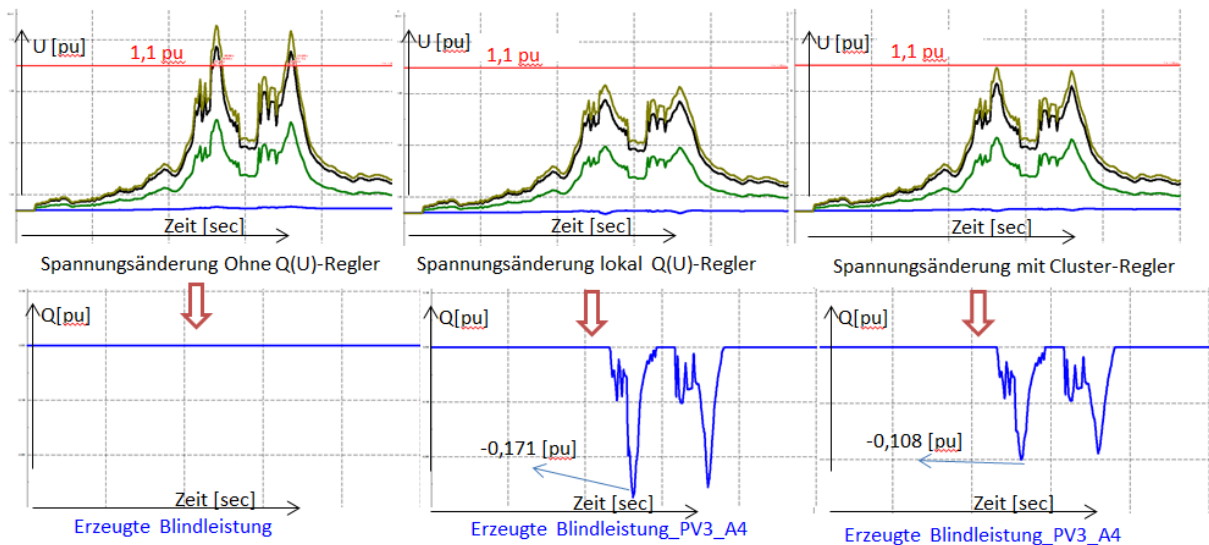


Abbildung 11: Simulationsergebnis von unterschiedlichen Szenarien: Spannungsverläufe für verschiedene Netzknotenpunkte für einen halben Tag im Winter

Der Grenzwert für die Knotenspannung am Anschlusspunkt wird ohne Q(U)-Regler verletzt. Sowohl die lokale als auch die Cluster-Regelung senken durch Blindleistungseinspeisung die Spannung unter den Maximalwert. Bei der Cluster-Regelung ist der Betrag des Maximalwertes der eingespeisten Blindleistung mit einem Wert von $0,108$ p.u. jedoch deutlich geringer als bei der lokalen Regelung mit $0,171$ p.u.

9 Vor- und Nachteile des Cluster-Reglers

Der Cluster-Regler gewährleistet die Spannungshaltung an den Netzknoten des Teilnetzes durch die Einspeisung von Blindleistung. Die zentrale Struktur dieser Lösung ermöglicht eine Optimierung der Blindleistungseinspeisung. Der Blindleistungsbedarf ist reduziert und dies hat die folgenden vorteilhaften Konsequenzen:

- Weniger Verluste in den Wechselrichtern
- Reduktion von aufgrund des Blindleistungsbedarfs abgeregelter Wirkleistung
- Weniger Verluste in den Leitungen im Netz
- Weniger Q-Kompensationsbedarf in den überlagerten Netzebenen
- Im Vergleich mit einer rein zentralen Netz-Regelung ist der Kommunikationsbedarf geringer. Es müssen weniger Informationen mit einer geringeren Übertragungsrate ausgetauscht werden.

Nachteile sind die Komplexität der Parametrierung des Cluster-Reglers bei der Einbindung von neuen Erzeugungsanlagen in dem Netzabschnitt und die notwendige Messtechnik.

Ein weiterer Nachteil des Cluster-Reglers ist der Kommunikationsbedarf zwischen den Wechselrichtern und dem zentralen Cluster-Regler. Diese Anforderung kann aber auch relativiert werden, da die Übertragungsraten gering sind.

10 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein dynamisches Simulationsmodell von Q(U)-Reglern mit einem zentralen Cluster-Regler im Verteilnetz entwickelt und untersucht. Damit wird nachgewiesen, dass diese Regelungsart zur Spannungsqualität beitragen kann.

Mit dem Cluster-Regler kann der Blindleistungsbedarf aus dem Mittelspannungsnetz minimiert werden, ohne den Maximalwert der Spannung in einem Netzabschnitt zu verletzen.

Der Cluster-Regler bietet eine neue Lösung an, die besser als eine rein lokale Regelung ist. Um den Nachteil des erhöhten Kommunikationsbedarfs, den ein zentraler Regler mit sich bringt, zu kompensieren, wurde der Cluster-Regler entwickelt. Dieser benötigt weniger Messwerte und kann mit einer geringen Kommunikationsrate arbeiten. Der in diesem Beitrag vorgeschlagene Cluster-Regler erfüllt diese Voraussetzungen, da er als Ausgangssignal nur eine Auswahl einer Kennlinie senden muss.

In der vorliegenden Arbeit wurde sowohl für die lokale Regelung als auch für die Cluster-Regelung nur auf die Blindleistungseinspeisung durch einen einzelnen PV-Wechselrichter eingegangen. Zukünftig sollen weitere Untersuchungen zu folgenden Szenarien durchgeführt werden.

- Lokale Q(U)-Regelung durch mehrere PV-Anlagen innerhalb des Clusters
- Vergleich zwischen der Blindleistungseinspeisung eines einzelnen Wechselrichters und mehrerer Wechselrichter in einem Cluster

11 Literaturverzeichnis

- [1.]Engel, B.: Möglichkeiten zur Erhöhung der dezentralen Erzeugung in Verteilnetzen, Vortrag beim Forschungsverbund Energie Niedersachsen, 25.09.2009
- [2.]Technische Richtlinie Erzeugungseinheiten, Teil 3 : Bestimmung der Elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und –anlagen am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz Revision 23 , 01.05.2013
- [3.]Schwab, A.: Elektroenergiesysteme – Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie, Springer-Verlag, 2009
- [4.]Jahn,J. : Energiekonditionierung in Niederspannungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Integration verteilter Energieerzeuger in schwachen Netzausläufern, Dissertation, Uni Kassel, 2007
- [5.]International Journal of Distributed Energy Resources, Sample 2005/2006, ISSN 1614-7138
- [6.]Esslinger, P. : Studie Q(U) Kooperationsprojekt der EnBW Regional AG, der E.ON Bayern AG, der SMA Solar Technology AG, der KACO new energy GmbH, der Siemens AG und des Fachgebiets Elektrische Energieversorgungsnetze der Technischen Universität München 31.08.2012
- [7.]Basse, H. : Spannungshaltung in Verteilnetzen bei Stützung durch dezentrale Erzeugungsanlagen mit lokaler Blindleistungsregelung, Universität Karlsruhe (TH), Diplomarbeit, 2008.
- [8.]Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Juni 2008