

Bastian Maucher

Exposé zur Dissertation: „Kommunikationsbasierte Spannungsregelung in Niederspannungsnetzen“

Motivation und Alleinstellungsmerkmal der Arbeit:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Konzeptionierung und Entwicklung eines neuartigen Spannungshaltungsverfahrens für Niederspannungsnetze mit hoher Durchdringung dezentraler Erzeugungsanlagen (DEA).

In der Verteilnetzebene wird von der DIN EN 50160 ein einzuhaltender Spannungsbereich von $U_n = (1,0 \pm 0,1)$ pu vorgegeben. Insbesondere durch die steigende Einspeisung aus DEA kommt es auf der Niederspannungsebene zu Verletzungen des oberen Spannungsbandes. Dem wird derzeit vorwiegend mittels dezentraler Blindleistungsbereitstellung oder teurem konventionellen Netzausbau entgegengewirkt. Spannungslängsregelung mittels Strangreglern oder regelbaren Ortsnetztransformatoren (rONT) ist ebenfalls ein probates, aber im Vergleich zur Blindleistungsregelung seltener verwendetes Verfahren zur Begrenzung von Spannungsanhebungen. Auch der Einsatz von Batteriespeichern kann der Netzentlastung dienen.

Somit stellte sich zu Beginn der Forschungsarbeiten folgende *Ausgangssituation* dar:

- Auf der Niederspannungsebene wurden und werden immer mehr leistungselektronische Systeme verbaut, deren primäre Aufgabe die Erzeugung regenerativer Wirkleistung ist.
- Die dadurch verursachten Probleme (Spannungsbandsverletzungen) können von den Umrichtern selbst abgemildert werden, z. B. durch Blindleistungseinspeisung.
- Diese schon lange bekannte Tatsache führte zur Implementierung dezentraler Spannungsregelverfahren (z. B. der $Q(U)$ -Regelung bei PV-Wechselrichtern), deren Regelgrößen sich allerdings immer nur aus den eigenen Messwerten des jeweiligen Netzknotens ableiten.

Insbesondere aus letzterem Punkt leiten sich die *Forschungsfragen* der Arbeit ab:

- Wird mit den etablierten dezentralen Regelverfahren die in einem Netz installierte Umrichter-Scheinleistung vollständig zur Spannungshaltung verwendet oder besteht vielmehr ein großes, ungenutztes Leistungspotential?
- Kann eine intelligente, zentrale Regeleinheit (zentraler Controller), welche über alle relevanten Informationen bezüglich Knotenspannungen oder Betriebsmittelbelastungen verfügt, die Spannungsregelung möglicherweise zielgerichteter und unter Ausnutzung des gesamten Scheinleistungsdargebots der regelbaren Betriebsmittel ausführen (übergeordnete Spannungsregelung)?
- Ist der Ansatz einer übergeordneten Spannungsregelung, selbst wenn er theoretisch umgesetzt werden kann, in einem realen Niederspannungsnetz realisierbar?

Das *Alleinstellungsmerkmal* der entwickelten neuartigen Spannungsregelung ist dabei, im Vergleich zu vorhergehenden Arbeiten, vor allem die praktische Implementierung und Erprobung des Konzepts in einem umfassenden Labor- und Feldtest (proof of concept). Das Konzept der übergeordneten Spannungsregelung berücksichtigt außerdem einen autonomen Betrieb (keine Grenzwertverletzungen) sowie einen geregelten Betrieb (Eingriffe des zentralen Controllers im Falle von Grenzwertverletzungen)

Konzeption und Modellierung (Hauptabschnitt I):

Zu Beginn der Arbeit werden die derzeit gängigen Verfahren zur Spannungshaltung sowie die grundlegenden elektrischen Eigenschaften eines typischen Niederspannungsnetzes erläutert. Aus diesen technischen Voraussetzungen leiten sich die Rahmenbedingungen einer hierarchisch aufgebauten, übergeordneten Spannungsregelung ab (*Kapitel 2*).

Der erste Hauptabschnitt beschreibt die Konzeption der übergeordneten Spannungsregelung sowie die Auswahl eines geeigneten realen Niederspannungsnetzes. Dieses dient als Grundlage der Untersuchungen in Simulation und Feldtest. Darüber hinaus erfolgt die Beschreibung des Feldtest- und Laboraufbaus.

Konzeptionierung der übergeordneten Spannungsregelung (Kapitel 3):

Das Konzept der neuartigen Spannungsregelung berücksichtigt folgende zentralen Vorgaben:

- Es werden nur Standard-Netzbetriebsmittel verwendet (lediglich geringfügige Softwareanpassungen werden durchgeführt), die derzeit in Niederspannungsnetzen bereits häufig zum Einsatz kommen und somit kostengünstig für die übergeordnete Spannungsregelung eingesetzt werden können (PV-/ Batteriewechselrichter, Strangregler).
- Diese Betriebsmittel werden über Powerline-Kommunikation an einen zentralen Controller angebunden (alternativ ist aber auch z. B. Mobilfunk denkbar) und liefern dem Controller in sekundlicher Auflösung die wichtigsten Parameter zur Bewertung der Netzsituation (Knotenspannungen, Leistungen).

Treten keine Grenzwertverletzungen auf, arbeiten die Betriebsmittel im *autonomen Modus* nach den voreingestellten dezentralen Regelverfahren (z. B. $Q(U)$).

Im Falle detektierter Spannungsgrenzwertverletzungen wechselt der Controller in den *geregelteten Betrieb*. Dort sind die Betriebsmittel, entsprechend ihres zuvor ermittelten Spannungssenkungspotentials, in eine hierarchische Struktur eingegliedert. Außerdem wird immer zuerst das Betriebsmittel mit der höchsten Sensitivität auf den zu regelnden Netzknoten aktiviert. Es ergibt sich folgende Aktivierungsreihenfolge:

1. Strangregler (Spannungslängsregelung)
2. PV-Wechselrichter / Batterie-Umrichter (Blindleistungsbereitstellung)
3. Batteriespeicher (Anpassung der Lade-Wirkleistung)

Aufbau des Feldtests (Kapitel 4)

Als Feldtestgebiet, welches die geforderten Rahmenbedingungen (hoher PV-Durchdringungsgrad, erwartbare Spannungsbandprobleme aufgrund Netztopologie) erfüllt, wird das Netz *Unterfarnbach* (Netzbetreiber: infra Fürth GmbH) gewählt.

- Rund 1 MWp installierter PV-Leistung steht eine Spitzenlast von rund 500 kW gegenüber (hauptsächlich Haushaltsverbraucher).
- Hohe Einspeiseleistungen am Ende eines Netzausläufers führen bereits jetzt zu Spannungsproblemen. Dort wurde ein elektronischer Strangregler installiert.
- An 11 PV-Anlagen wurden die vorhandenen Wechselrichter durch aktuelle Geräte ersetzt. Insgesamt wurden rund 550 kVA Umrichterleistung getauscht.
- An drei PV-Standorten wurde der Einbau von Batteriespeichern vorgesehen.

- Eine Breitband-Powerline-Kommunikationsinfrastruktur (BPL), optimiert auf den störungsfreien Betrieb im Umfeld von Umrichtern, wurde realisiert.

Aufbau des Simulationsmodells (Kapitel 5):

- Das gewählte Netzgebiet wird in der Simulationsumgebung PSS Sincal nachgebildet.
- Ebenso werden sowohl die benötigten Funktionalitäten aller Betriebsmittel als auch die Reglerstruktur des zentralen Controllers nachgebildet.
- Besonderes Augenmerk liegt bei der Modellierung auf dem modularen Aufbau, um eine spätere Skalierbarkeit bzw. Flexibilität des Simulationsmodells zu gewährleisten.

Laboraufbau (Kapitel 6)

Der Laboraufbau erfolgt im Labor der Professur für Elektrische Energieversorgungsnetze.

- Die Nachbildung der Leitungsparameter (R , L , C) realer Niederspannungsleitungen (230/400 V), die zu verschiedenen Netztopologien verschaltet werden können, erfolgte mittels konzentrierter Elemente.
- Handelsübliche PV-Wechselrichter dienen der Blindleistungsbereitstellung.
- Die Funktionalität des Strangreglers emuliert eine regelbare Wechselspannungsquelle.
- Der zentrale Controller wird im Labor unter Berücksichtigung der im Feld auftretenden Latenzen der BPL-Kommunikation sowie den Zeitkonstanten der Betriebsmittelregler aufgebaut  Vergleichbarkeit der Regler-Performance im Labor- und Feldtest.

Ergebnisteil (Hauptabschnitt II.)

Der Ergebnisteil ist untergliedert in die Simulations-, Labor- sowie Feldtestergebnisse. Berücksichtigt wurde bei allen drei Ergebnissteilen der Einfluss einer unterschiedlichen Einspeisecharakteristik der PV-Anlagen (Clear-Sky oder wechselhafte Einspeisung).

Simulationsergebnisse – technisches und wirtschaftliches Potential (Kapitel 7):

Ziele: Mithilfe der Erkenntnisse aus den Simulationen kann sowohl das technische als auch das wirtschaftliche Potential der übergeordneten Regelung abgeschätzt werden.

Ergebnisse:

- Das Spannungssenkungspotential der übergeordneten Regelung gegenüber dem effektivsten dezentralen Spannungshaltungsverfahren (Kombination aus $Q(U)$ und Strangregler) beträgt 0,005 pu bis 0,04 pu (2 bis 10 V).
- Verletzungen des vordefinierten Grenzwertes von 1,07 pu treten bei Verwendung der übergeordneten Spannungsregelung – im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Verfahren – nicht auf.
- Die übergeordnete Spannungsregelung erfordert einen finanziellen Mehraufwand, z. B. für die Installation und den Betrieb der Kommunikations- und Leittechnik, welcher die Wirtschaftlichkeit der übergeordneten Spannungsregelung im Vergleich zu den etablierten dezentralen Verfahren verschlechtert.
- Für den kommenden Smart-Meter-Rollout muss jedoch ohnehin eine Kommunikationsinfrastruktur aufgebaut werden, welche auch für die Funktionalität der übergeordneten Spannungsregelung mit verwendet werden kann. Auch können mithilfe der neuartigen Spannungsregelung sekundäre Regelziele vorgegeben und als Netzdienstleistungen vermarktet werden (z. B. die Bereitstellung von Regel-Blindleistung).

- Unter Ausnutzung dieser finanziellen Anreize ist die übergeordnete Spannungsregelung wirtschaftlich als auch technisch effektiver als dezentrale Spannungshaltungsverfahren.

Umsetzung im Labor (Kapitel 8):

Ziele: Im Labor wird das Spannungssenkungspotential der übergeordneten Spannungsregelung mit dem Referenzszenario (keine Spannungsregelung) bzw. dezentralen Spannungshaltungskonzepten verglichen. Im Referenzszenario werden die einzuhaltenden Spannungsgrenzen durch die gewählte Netztopologie in Kombination mit der eingespeisten Wirkleistung bewusst deutlich überschritten, um die Effektivität der übergeordneten Spannungsregelung hinsichtlich *Nutzung von Leistungsreserven* und der *Spannungssenkung* zeigen zu können.

Ergebnisse:

- Verglichen mit dem Spannungsniveau des Referenzszenarios wurde die Spannung bei der übergeordneten Spannungsregelung, unter Ausschöpfung aller Leistungsreserven der PV-Umrichter und des Strangreglers, um bis zu 0,08 pu (18 V) abgesenkt. Die derart hohe Spannungsabsenkung ist aber stets im Kontext der Freiheitsgrade eines Laborversuchs zu sehen – im realen Netzbetrieb ist diese hohe Absenkung nicht zu erwarten.
- Im Vergleich zum effektivsten dezentralen Spannungshaltungsverfahren ($Q(U)$ kombiniert mit Strangregler) konnte ein Sicherheitspuffer von 0,03 pu (7 V) bis zum Erreichen der absoluten Spannungsgrenzwerte nach DIN EN 50160 geschaffen werden.
- Die Auslegung der Regler-Dynamik des als PI-Regler ausgeführten zentralen Controllers berücksichtigt die auftretenden Latenzen der Kommunikation sowie der Leittechnik im Feld, wodurch sich im Worst-Case Totzeiten von bis zu 5 Sekunden ergeben. Die dementsprechend gewählten Reglerparameter gewährleisten ein stabiles PT1- Verhalten der Regelgröße (Knotenspannung).
- Auch bei hoher Einspeisedynamik (Leistungsgradienten von bis zu 0,8 pu/10 s) ist kein Schwingen der Regelung zu beobachten.

Feldtest (Kapitel 9):

Ziele: Im Feldtest wird die übergeordnete Spannungsregelung mit einem Referenzszenario sowie einem dezentralen Spannungshaltungsverfahren ($Q(U)$ -Regelung) verglichen. Die unterschiedlichen Verfahren werden jeweils durch eine Neuparametrierung der Anlagen aktiviert. Lediglich für Schönwettertage mit dementsprechend gleichmäßiger PV-Einspeisung (Clear-Sky-Verlauf) ist ein aussagekräftiger Vergleich der Spannungshaltungsverfahren möglich.

Ergebnisse.

- Die übergeordneten Spannungsregelung zeigt im realen Netzbetrieb ein stabiles Reglerverhalten, die bewusst träge eingestellte Reglerdynamik sowie Abtastraten von 1000 ms sind ausreichend für die Ausregelung von Grenzwertverletzungen.
- Fall-Back-Lösungen für den Fall möglicher Kommunikationsausfälle sind im Regler implementiert und erfolgreich getestet.
- Das Spannungssenkungspotential der übergeordneten Spannungsregelung kann mit bis zu 0,02 pu (4,5 V) bezogen auf das Referenzszenario angegeben werden.
- Verglichen mit der $Q(U)$ -Regelung ist die Spannungsabsenkung zwar gering (rund 2 V), allerdings ist im Netz derzeit noch nicht der hohe PV-Durchdringungsgrad erreicht, weshalb die Vorteile der übergeordneten Spannungsregelung nicht so deutlich werden.

- Die Leistungsreserven der PV-Wechselrichter werden wie gewünscht vollständig ausgeschöpft und die bereitgestellte Blindleistung nahezu verdoppelt (ca. 100 kVAr bei $Q(U)$, 200 kVAr bei der übergeordneten Spannungsregelung).

Persönliche Einschätzung zum Mehrwert der Arbeit:

Wie im Ergebnisteil geschildert, konnte das Alleinstellungsmerkmal, also die Umsetzung der übergeordneten Spannungsregelung als proof-of-concept in der Praxis, erbracht werden. Bereits laufende oder zukünftig geplante Arbeiten mit ähnlichem Forschungsschwerpunkt können auf diesen Erkenntnissen aufbauen.

Mithilfe des im Labor geschaffenen physikalischen Aufbaus der Netznachbildung realer Niederspannungsleitungen sowie der Software-Anbindung aller relevanten Betriebsmittel erfolgen bereits weitergehende Untersuchungen auf dem Gebiet der Spannungshaltung/Regelleistungsbereitstellung mithilfe zentrale Regelansätze.

Insbesondere die realisierte Feldtest-Infrastruktur dient als Grundlage weiterer Forschungstätigkeiten.

Für eine Überführung der entwickelten Regelung in den regulären Netzbetrieb ist jedoch der monetäre Mehrwert ausschlaggebend. Die Arbeit erläutert mögliche finanzielle Anreize für die Umsetzung zentraler Regelverfahren. Die Diskussion mit Netzbetreibern zeigt jedoch, dass aufgrund der Komplexität oder des möglicherweise bestehenden Wartungsaufwandes ein herkömmliches Spannungshaltungsverfahren (z. B. $Q(U)$ oder Netzausbau) zumindest derzeit bevorzugt wird.