

Spannungsregelung im Niederspannungsnetz auf Basis eines Spannungsbeobachters

Simon Tugend
HTWG Konstanz
ABB AG Deutschland
Mannheim, Germany
S.Tugend@gmx.de

Kurzfassung—Ziel der Arbeit ist es ein Verfahren zur Spannungsregelung auf Basis eines Spannungsbeobachters im Niederspannungsnetz zu entwickeln und zu implementieren. Die Anforderungen an das Verfahren resultieren aus unterschiedlichen Schnittpunkten. Für das Ortsnetz gilt die Einhaltung des Spannungsbandes (nach DIN EN 50160), von $\pm 10\%$ bezogen auf die Nennspannung, an allen Stellen im Netz. Ebenso stellt die regelnde Einheit in der Ortsnetzstation Anforderungen an die Sollwertvorgabe. Hier werden elektromechanische und rein elektrische Ausführungen unterschieden. Ausgehend hiervon werden zwei unterschiedliche Verfahren implementiert. Die dritte Komponente stellt das Ergebnis des Beobachters dar. Hier müssen je nach Topologie bis zu 12 Maschen im Spannungsband geführt werden. Weiter können Zustände auftreten, in welchen der beobachtete Wert nicht korrekt vorliegt, auch hier ist ein reibungsloser Betrieb zu gewährleisten.

Index Terms—Smart Grid, Sollwertermittlung, regelbarer Ortsnetztransformator, Spannungsregelung, Verteilnetz Automatisierung

I. EINLEITUNG

Aufgrund der Entscheidung zur Energiewende hat die Bundesregierung eine grundlegende Transformation des heutigen Energiesystems eingeleitet. Der Ausbau der erneuerbaren Energien so wie der Ausstieg aus der Kernenergie wird vorangetrieben. [1] Dies erfordert jedoch die Integration von dezentralen Energieerzeugungsanlagen in das bestehende Stromnetz. In den Bereichen der Photovoltaik so wie Wind- und Bioenergie sind die größten Zuwächse zu verzeichnen. Dieser Zubau findet vorwiegend in den Verteilnetzen statt und bedeutet teilweise heute schon, aber auch in den kommenden Jahren eine Herausforderung für diese. In der Vergangenheit waren die Verteilnetze nur auf Energieflüsse in eine Richtung hin optimiert, da diese lastgeprägt waren. Durch die fluktuierende Einspeisung dezentraler Erzeuger kommt es heute zu sich ständig ändernden Abnahme- und Einspeisesituationen.

Die Herausforderung besteht darin, auch unter diesen Bedingungen eine effiziente Energieversorgung zu gewährleisten. Es müssen alle technischen Randbedingungen wie Kapazitätsbegrenzungen und Spannungsqualität erfüllt werden. Hierfür wird die DIN-EN-50160 als wesentliches Kriterium herangezogen. Laut dieser ist unter anderem im Normalbetrieb die Betriebsspannung in den Grenzen $\pm 10\%$

bezogen auf die vereinbarte Nennspannung einzuhalten. Genauer sind über den Jahreszeitraum 95 % der 10 Minutenmittelwerte innerhalb der Grenzen zu halten. [2]

Aufgrund des Spannungsfalls an der Leitungsimpedanz kommt es in der Regel früher zu Spannungsbandverletzungen als zu Überlastung der Betriebsmittel. Wegen der guten Standort Bedingungen für Erzeugeranlagen sowie der geringen Vermaschung der Netze in ländlichen Gebieten und den langen Leitungen kommt es dort vermehrt zu Verletzungen.

Es besteht jedoch, bis zu einem gewissen Grad, Vorrang bei der Abnahme des Stroms aus erneuerbaren Quellen. Aus diesem Grund müssen die Netzbetreiber kapitalintensive Netzausbaumaßnahmen durchführen oder eine alternative Lösung realisieren. Hier kann ein automatisierter Betrieb des Niederspannungsnetzes (NS-Netz) helfen die vorhandenen Betriebsmittel besser auszunutzen. Ein wichtiger Bestandteil ist die spannungsführende Regelung in der Ortsnetzstation (ONS). [3]

Das Ziel der Bachelorarbeit war die Implementierung einer Spannungsregelung für das Niederspannungsnetz auf Basis eines Spannungsbeobachters. Zielplattform ist eine Kompaktfernwirktechnik (RTU), zur Ansteuerung eines regelbaren Ortsnetztransformators (rONT) oder Automatic Voltage Regulators (AVR) in einer ONS. Das Forschungsprojekt „Smart Area Aachen“ bildet den Rahmen in dem sich diese Arbeit bewegt.

Bei der Vorgabe des Sollwertes für das Niederspannungsnetz ist die Einhaltung des Spannungsbandes (nach DIN EN 50160) an allen Stellen im Netz zu beachten. Hierzu werden bestimmte Spannungsgrenzen bzw. Kontrollmechanismen eingearbeitet.

Zu große Spannungsänderungen/-sprünge im Niederspannungsnetz sind aufgrund der Anforderungen an die Spannungsqualität u.a. bezüglich Flickern zu vermeiden. Anforderungen an die Stellgröße sind zu definieren. Im Falle der Veränderung der Spannung über einen AVR kann ein ermittelter Sollwert vorgeben werden. Bei Verwendung eines rONTs, der die Spannung über einen Stufenschalter einstellt sind weitere Überlegungen z.B. bezüglich vorzugebender Totbänder oder der Minimierung von Schaltspielen notwendig.

A. Spannungsbeobachter

Um Ortsnetze in denen kritische Spannungsanhebungen nach VDE-AR-N 4105 auftreten können besser zu beurteilen, ist von ABB, im Vorfeld der Arbeit, das Verfahren zur Spannungsbeobachtung entwickelt worden. Dies ermöglicht eine Beobachtung der Werte im Netz ohne eine Messung in selbigem vornehmen zu müssen.

Anhand der in Abbildung 1 beschriebenen Parameter wird die kritische Spannung ($U_{NS,prog}$) im Ortsnetz (ON) beobachtet. Der Beobachter bestimmt immer die Phase mit der kritischsten Spannung. Dargestellt ist ein vereinfachtes Modell eines Ortsnetzes, welches aus dem Mittelspannungsnetz über einen ON-Trafo gespeist wird. Grundsätzlich gilt es zwei Typen von Parametern zu unterscheiden. Zum einen eingetragene Werte die durch Nachbilden des Netzes in einem Netzberechnungsprogramm ermittelt werden und zum anderen Messwerte in der ONS.

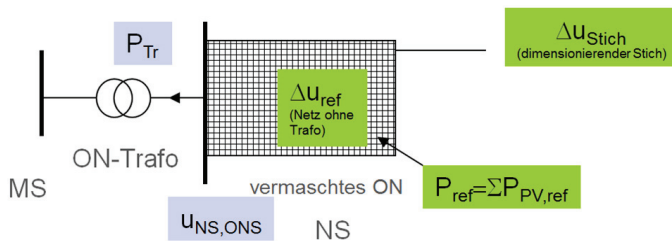


Abbildung 1: Vereinfachtes Modell mit Werten für Spannungsbeobachtung. [4]

Hierbei entsprechen die grün eingefärbten Daten dem „Fingerabdruck“ und die hellblauen den Messwerten. ΔU_{ref} entspricht der Spannungsanhebung im ON, P_{ref} ist die Summenleistung der Einspeisung und ΔU_{stich} die Spannungsanhebung in einem Stich. Die benötigten Messwerte sind $U_{NS,ONS}$ welches der Spannung auf der Niederspannungsseite an den Sammelschienen in der ONS entspricht, sowie P_{Tr} der Leistungsfluss. Anhand dieser Größen kann die kritische Spannung ermittelt werden. [4]

II. ENTWICKLUNG UND SIMULATION VON LÖSUNGSANSÄTZEN

A. Analyse Gesamtsystem und Schnittstellen

Das Gesamtsystem lässt sich in fünf Blöcke einteilen. Wie in Abbildung 2 zu erkennen besteht dieses aus der Niederspannungsverteilung (NS-Verteilung) und dem hinter lagerten Netz. Diese zwei Blöcke können als Regelstrecke angesehen werden. Weiter zu erkennen ist die spannungsregelnde Einheit. Diese erhält ihre Rückführung aus der NS-Verteilung in Form der Spannung (U_{ONS}). In dem für diese Arbeit betrachteten Fall kommt der Spannungsbeobachter und die dynamische Sollwertermittlung, in rot dargestellt, hinzu. Der Spannungsbeobachter erhält die Leistungen der Abgänge ($P_{Abgänge}$) und des Transformators (P_{Trafo}) sowie U_{ONS} . Andererseits wird der ermittelte Fingerabdruck eingetragen, dieser ist statisch was durch den gestrichelten Pfeil gekennzeichnet ist. Die Sollwertermittlung benötigt die beobachtete kritische Spannung ($U_{NS,prog}$) und U_{ONS} an den Sammelschienen.

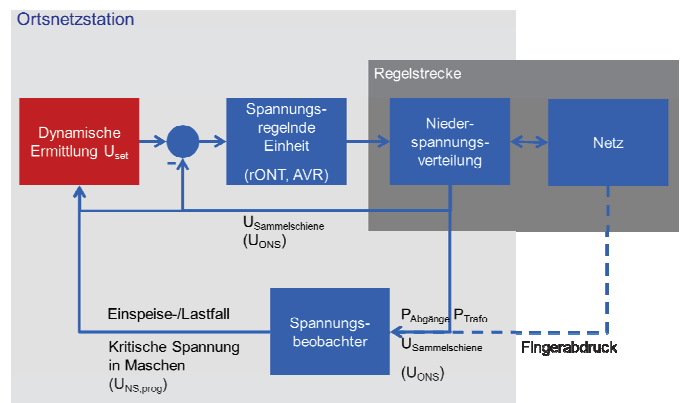


Abbildung 2: Übersicht über die gesamte Wirkungskette.

Von dieser Analyse ausgehend lassen sich die Schnittstellen für die Ermittlung der Sollwertvorgabe ableiten. Als Input, wie bereits beschrieben, $U_{NS,prog}$ und U_{ONS} . Als Output, die Sollwertvorgabe (U_{set}) für die Spannungsregelung in der ONS. Es fällt auf, dass das Verhalten der regelnden Einheit auch Auswirkung auf die Anforderungen an die Sollwertvorgabe hat.

B. Simulation

Für die Bewertung von entwickelten Konzepten zur Regelung werden Simulationen durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Simulation anhand von aufgenommenen Messreihen umgesetzt. Realisiert ist diese mit MATLAB®.

Die Messreihen entstammen einer ONS, die Bestandteil eines Forschungsprojektes ist. Dieses Netz ist teilvermascht und an kritischen Netzknoten sind Smart Meter eingebracht. Abbildung 3 zeigt die verwendeten Messdaten des ausgewählten Tages. In der oberen Grafik die Spannung in der ONS und in der unteren die der Smart Meter welche als $U_{NS,prog}$ verwendet werden.

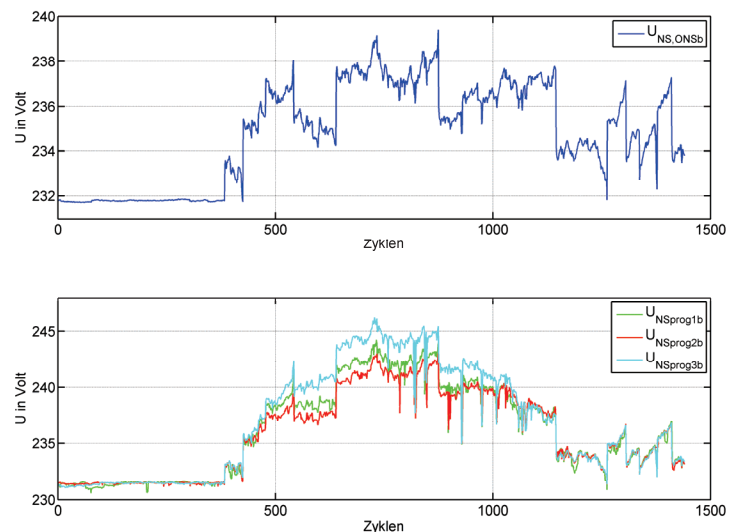


Abbildung 3: Messdaten des ausgesuchten Tages in der ONS (oben) und an den kritischen Netzknoten aus drei Maschen (unten).

C. Regelkonzepte

Da der Beobachter die kritische Spannung einer Phase ausgibt, aber nur die Spannung aller drei Phasen verändert werden kann. Erfolgt die Sollwertermittlung auf Basis des Mittelwertes aus den drei Phasen. Da $U_{NS,prog}$ der Phase mit der kritischsten Spannung entspricht ist eine Führung aller drei Phasen im Spannungsband gewährleistet.

Es wurden vier Konzepte entwickelt, eine lineare Regelung, eine erweiterte lineare Regelung, sowie die Regelung mit interpoliertem Polynom und die Spannungsband Regelung. Diese vier untersuchten Konzepte sind Grundlage der Entscheidung für das Endgültig zu Implementierende Verfahren. Im Folgenden sind die zwei letztendlich implementierten Verfahren vorgestellt.

a) Lineare Regelung

Eine zugleich simple aber wirksame Lösung zur Ermittlung des Sollwertes, stellt die Absenkung der Spannung mittels eines linearen Zusammenhangs dar. Dieser kann anhand dem in Abbildung 4 festgelegten Koordinatensystem und den darin eingetragenen Parametern aufgestellt werden.

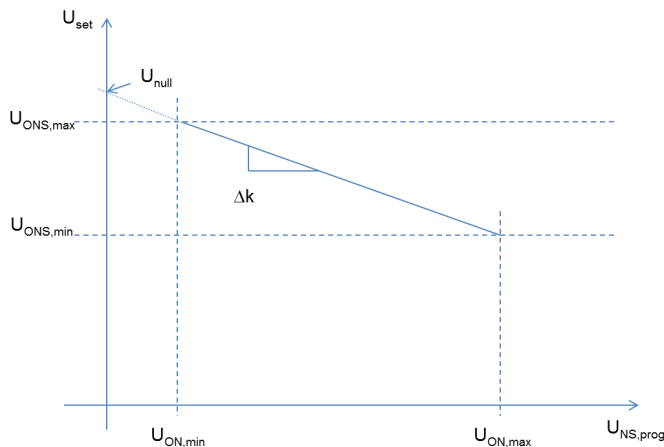


Abbildung 4: Veranschaulichung des Ansatzes zur linearen Regelung, anhand einer Geraden.

$U_{NS,prog}$ befindet sich auf der Abszisse und U_{set} auf der Ordinate. Die Geradengleichung wird durch die vorgegebenen Parameter für die minimal und maximal erlaubte Spannung im Ortsnetz ($U_{ON,min}$ & $U_{ON,max}$) und den vorgegebenen Grenzen in der Ortsnetzstation ($U_{ONS,max}$ bzw. $U_{ONS,min}$) bestimmt. Hierbei muss immer die aktuell maximale Spannung $U_{NS,prog,max}$ aus den beobachteten Spannungen $U_{NS,prog}$ ermittelt werden, da lediglich diese für die Sollwertermittlung verwendet wird.

Mit Hilfe der Simulation kann sich ein erstes Bild über das Verfahren verschafft werden (Abbildung 5).

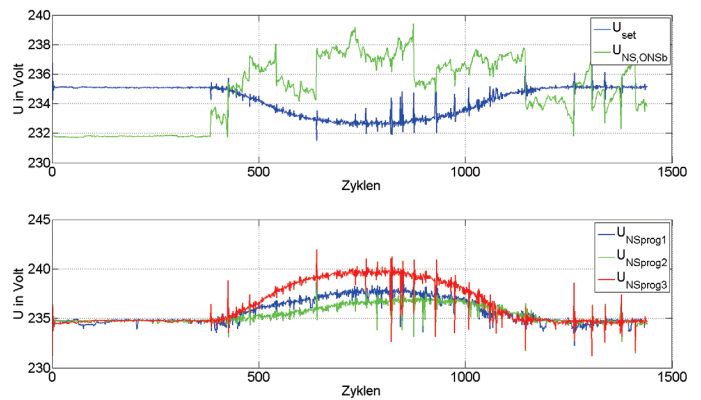


Abbildung 5: Oben, der Verlauf der Ursprünglichen Spannung (U_{ons}) und der Ermittelten Sollspannung (U_{set}) in der ONS. Unten, der Verlauf der beobachteten Spannungen im ON mit Regelung ($U_{NS,prog1}$; $U_{NS,prog2}$; $U_{NS,prog3}$). (Parameter: $U_{ONS,max}=231,15V$; $U_{ONS,min}=220V$; $U_{ON,max}=245V$; $U_{ON,min}=232V$)

Es gelingt hier den Anstieg der Spannung im ON zu begrenzen. Die Anwendung des Verfahrens mit einem rONT gestaltet sich jedoch schwierig, da im vorliegenden Fall ständig eine Spannungsänderung in der ONS durch U_{set} veranlasst wird. Der rONT hat aber nur eine begrenzte Anzahl an Schaltzyklen. Denkbar wäre der Einsatz im Zusammenspiel mit einem AVR, da dieser kontinuierlich arbeitet.

b) Spannungsband Regelung

Eine weitere Möglichkeit zur Sollwertbestimmung stellt die Differenzermittlung der Verletzung des Spannungsbandes dar. Grundsätzlich wird die einzustellende Spannung in der ONS (U_{ONS}) durch die Differenz der Verletzung im ON ermittelt.

Die Ermittlung der Differenzspannung (Δu) ist in Abbildung 6 dargestellt. Es sind von links nach rechts die drei möglichen Fälle beschrieben. Im ersten Fall besteht keine Verletzung des Spannungsbandes, im zweiten Fall wird das Band nach oben hin verlassen und im dritten Fall ist eine Unterschreitung dargestellt. Das eingezeichnete Δu wird anhand der nebenstehenden Gleichung ermittelt. Die Pfeile zeigen die resultierende Spannung der Korrektur an, unter der Bedingung, dass keine Spannungsänderung durch Änderung der Last oder Einspeisung im Netz geschieht.

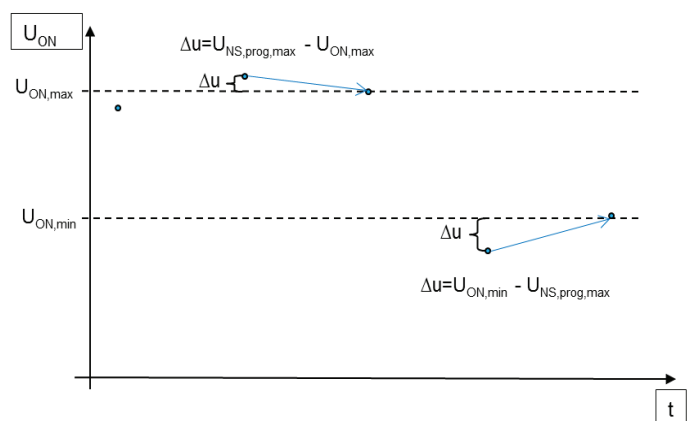


Abbildung 6: Ermittlung der Differenzspannung bei Verletzung der Grenzen im Ortsnetz.

Um einen vollständigen Ansatz zu erhalten ist weiter festzulegen wie mit dem Großteil der Fälle (erster Fall Abbildung 6) umgegangen wird, in denen die Spannung innerhalb der Grenzen liegt.

$$\Delta U_{\text{krit}} = U_{\text{ON, max}} - U_{\text{ON, min}} \quad (1)$$

Hier kann entweder ein feststehender Sollwert ausgegeben werden, eine anderweitige Optimierung stattfinden oder der aktuelle Spannungswert in der ONS übernommen werden. In Bezug auf die Reduzierung der Schaltungen und des Flickers bei Einsatz eines rONT bietet sich eine Übernahme der aktuell herrschenden Spannung in der ONS an. Somit wird keine Änderung der Spannung vorgenommen.

$$\Delta U_{\text{cur}} = U_{\text{NS, prog, max}} - U_{\text{NS, prog, min}} \quad (2)$$

Bei diesem Verfahren muss immer die aktuell höchste Spannung $U_{\text{NS, prog, max}}$ und ebenfalls die aktuell niedrigste Spannung $U_{\text{NS, prog, min}}$ aus den beobachteten Spannungen $U_{\text{NS, prog}}$ ermittelt werden. In diesem Beispiel wird lediglich die Situation mit einer Masche dargestellt.

Das ermittelte Δu aus den beobachteten Ortsnetzspannungen wird also angepasst an die Situation auf die aktuelle Spannung in der ONS angewendet.

Hierfür wird ebenfalls eine Simulation durchgeführt in der neben der Auswirkung der Regelung auf die zukünftigen Spannungswerte auch das Verhalten des rONT mit einbezogen wird. Wie aus den Ergebnissen in Abbildung 7 ersichtlich, erfolgt erst eine Stufung des Transformators, wenn das Toleranzband des rONT überschritten wird.

Ist ΔU_{cur} größer oder gleich ΔU_{krit} kann durch die Regelung der Spannung keine Verbesserung stattfinden. Eine Korrektur der Spannung hätte zur Folge, den jeweils anderen Wert außerhalb des Spannungsbandes zu drücken.

Aus diesem Grund muss eine andere Sollwertermittlung angewendet werden, hierfür werden zwei Möglichkeiten erläutert. Erstens kann das U_{set} so gelegt werden, dass die Verletzung oben und unten (in Bezug auf die eingetragenen Grenzen) Betragsmäßig gleich ist (Symmetrierung).

Zweitens wird das U_{set} so berechnet, dass keine Verletzung nach unten (in Bezug auf die eingetragene Grenze $U_{\text{ON, min}}$) stattfindet (3) (Berechnung).

$$U_{\text{set}} = U_{\text{ONS}} + (U_{\text{ON, min}} - U_{\text{NS, prog, min}}) \quad (3)$$

Um das Verhalten verständlich zu machen, sind Simulationen durchgeführt worden. Die bisherigen Messdaten können jedoch nicht so verwendet werden, da hier die Differenzen zwischen den einzelnen Maschen zu klein ist. Aus diesem Grund wird der bisherige Messwert $U_{\text{NS, prog2}}$ mit einem anderen Verlauf ersetzt. Die restlichen Spannungen bleiben unverändert.

Das Verhalten bei großen Abweichungen der beobachteten Maschen oder durch Eintragen zu enger Grenzen im Ortsnetz, wird anhand der Spannungsband Regelung analysiert.

In Abbildung 8 fällt besonders die unruhige Sollwertvorgabe im mittleren Teil auf. Bei Einbeziehung der Berechnung ist diese Unruhe eliminiert, wie aus Abbildung 9 hervorgeht. Durch den Vergleich der beiden Kurven kann die merkliche Beruhigung der Spannung erkannt werden. Somit kann auch für diesen kritischen Betriebsfall eine annehmbare Sollwertvorgabe ausgegeben werden. Die Übernahme der Spannung durch den rONT hängt jedoch vor allem von den Einstellungen, wie z.B. der Verzögerungszeit ab.

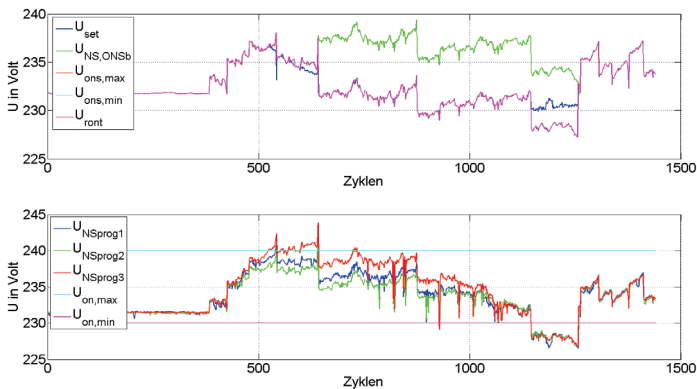


Abbildung 7: Spannungsverlauf bei Simulation mit Rückrechnung und rONT. (Parameter: $U_{\text{ONS, max}}=240\text{V}$; $U_{\text{ONS, min}}=225\text{V}$; $U_{\text{ON, max}}=240\text{V}$; $U_{\text{ON, min}}=230\text{V}$, Parameter rONT: $dU_{\text{stepPr}}=2,5\%$; $dU_{\text{tolPr}}=60\%$; $U_n=230\text{V}$)

D. Kontrollmechanismen

Liegen bei Teilvermaschung mehrere beobachtete Spannungswerte vor, kann die Differenz zwischen dem Maximal- und Minimalwert das vorgegebene Spannungsband überschreiten. Des Weiteren kann die Korrektur des Spannungssollwertes basierend auf dem erlaubten Maximal- oder Minimalwert zu einer Verletzung des im Ortsnetz erlaubten Spannungsbandes führen. Beide Fälle sind zu berücksichtigen. Diese Fälle können durch die Betrachtung der Differenz ΔU_{cur} der aktuellen Werte mit der Differenz ΔU_{krit} der eingetragenen Werte für das ON erfasst werden (siehe hierzu (1) und (2)).

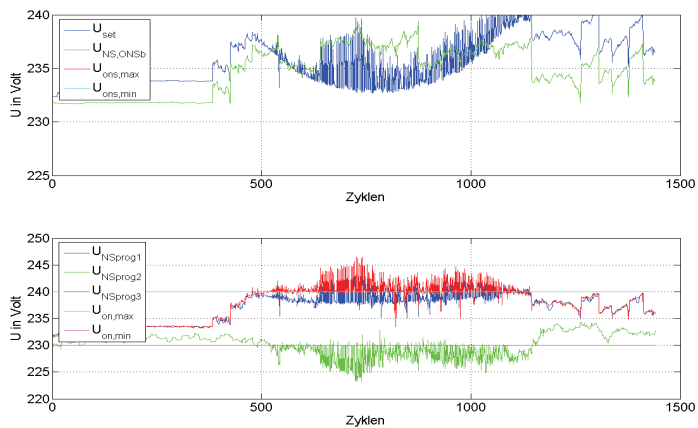


Abbildung 8: Verhalten der Regelung ohne Kontrolle. (Parameter: $U_{ONS,max}=240V$; $U_{ONS,min}=225V$; $U_{ON,max}=240V$; $U_{ON,min}=230V$, ohne rONT)

Bei der Variante der „Berechnung“ wird das vorgegebene Spannungsband nach oben hin stärker verletzt, dafür wird aber die minimale Spannung im Band gehalten. Ist dies nicht erwünscht, kann die Korrektur mittels der „Symmetrierung“ eingeführt werden, hierbei wird das Spannungsband in beide Richtungen gleichermaßen verletzt.

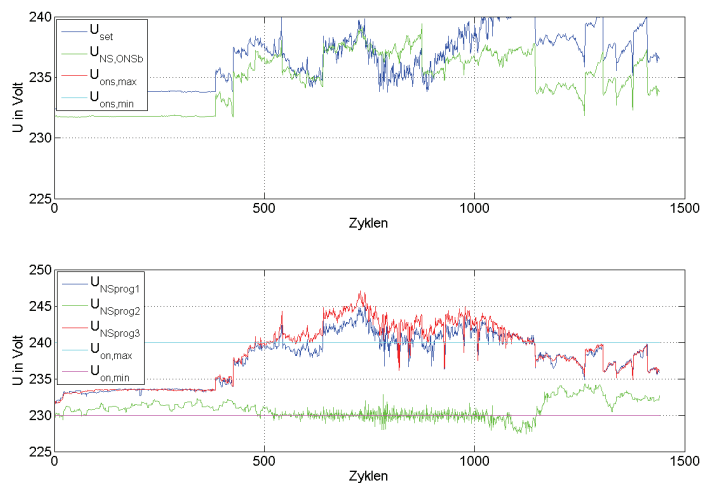


Abbildung 9: Spannungsverlauf durch Kontrolle der Differenzen und Anwendung der Berechnung. (Parameter: $U_{ONS,max}=240V$; $U_{ONS,min}=220V$; $U_{ON,max}=235V$; $U_{ON,min}=225V$, ohne rONT)

Die Prüfung der Differenz funktioniert jedoch nur bei der „Spannungsband Regelung“. Für die Regelung anhand von Geradengleichungen ist ebenfalls eine weitere Prüfung entstanden. Bei dieser Art Regelung wird in die Geradengleichung die maximale Spannung aus dem ON eingesetzt. Durch die resultierende Absenkung kann der minimal erlaubte Spannungswert im Ortsnetz unterschritten werden. Aus diesem Grund kann auch nicht die oben beschriebene Überprüfung verwendet werden. Sondern es erfolgt eine Kontrolle vor Ausgabe. Hierzu wird mit (4) die zu erwartende Spannung ($U_{NS,prog,min,neu}$) im Ortsnetz ermittelt, auf Basis des vorher ermittelten U_{set} . Falls $U_{NS,prog,min,neu}$ kleiner als $U_{ON,min}$ ist wird mit (5) U_{set} entsprechend korrigiert.

$$U_{NS,prog,min,neu} = U_{NS,prog,min} - (U_{ONS} - U_{set}) \quad (4)$$

$$U_{set} = U_{set} + (U_{ON,min} - U_{NS,prog,min,neu}) \quad (5)$$

Zur Verifizierung ist hier ebenfalls mit den oben verwendeten Messdaten eine Simulation durchgeführt worden. Das beschriebene Problem der Absenkung unter die Grenze und die aus der Kontrolle resultierende Verbesserung können aus Simulationsergebnissen abgelesen werden.

III. REALISIERUNG

A. Regelverfahren

Auf Grund der unterschiedlichen Verfügbarkeit von Beobachtungswerten sowie den unterschiedlichen Ansprüchen der anzusteuernenden Regelinstanzen ist eine möglichst allgemeine Umsetzung notwendig. Aus diesem Grund werden zwei Funktionsblöcke implementiert. Einer für die Ansteuerung eines rONT („Spannungsband Regelung“) und der andere für die Ansteuerung eines AVR („lineare Regelung“).

B. Kontrollmechanismen

1) In der Station

Vor Ausgabe an die regelnde Instanz wird in beiden Verfahren sichergestellt, dass der ermittelte Spannungswert in den erlaubten Regelgrenzen liegt.

2) Im Ortsnetz

Liegen mehrere beobachtete Spannungswerte vor, kann es wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben zu Problemen bei zu großen Abweichungen der einzelnen Maschen voneinander kommen. Aus diesem Grund ist beim FB für den rONT die Überprüfung der Differenz nach (1) und (2) vorzusehen.

Ist die Abweichung zu groß, wird U_{set} so berechnet, dass keine Verletzung nach unten (in Bezug auf die vorgegebene Grenze $U_{ON,min}$) stattfindet (vgl. hierzu die Korrekturformel (3)).

Aus derselben Intention ist ebenso die Kontrolle für die lineare Absenkung für den AVR integriert.

C. Verhalten bei Zuständen außerhalb des Normalbetriebs

Folgende Fälle müssen bei Ermittlung und Ausgabe des Spannungswertes U_{set} berücksichtigt werden:

- Zustände außerhalb des Normalbetriebes, die bei der Implementierung des Spannungsbeobachters durch die Ausgabe eines ungültigen Beobachtungswertes bereits berücksichtigt sind.
- Ungültige Eingangswerte der zu verwendenden Messwerte.

Je nach angesteuerter Regelinstanz variieren die Anforderungen beim Auftreten der beschriebenen Zustände.

1) rONT

Bei der Vorgabe für den rONT sollte nicht direkt auf einen festen Sollwert gesprungen werden, da hierdurch ein abruptes Schalten des Laststufenschalters hervorgerufen wird. Entsprechend (6) und (7) wird daher der Sollwert über einen Gradienten angepasst. Hierzu sind eine Referenzspannung (U_{ref}) und die Zeitdauer (t_{end}) zum Erreichen der Referenzspannung vorzugeben.

$$\Delta k = \frac{U_{ref} - U_{set, start}}{t_{end}} \quad (6)$$

$$U_{set} = \Delta k \times t + U_{set, start} \quad (7)$$

Dafür wird das U_{set} zum Zeitpunkt des Eintritts des Fehlers gesetzt ($U_{set, start}$) und die aktuell abgelaufene Zeit nach Eintritt des Ereignisses ermittelt.

2) AVR

Auf Grund der kontinuierlichen Regelung und der Veränderung der Regelgröße basierend auf einer „Ramp rate“ auf den vorgegebenen Sollwert beim AVR, kann ein vorgegebener Sollwert direkt eingestellt werden.

IV. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel dieser Arbeit war es eine Spannungsregelung auf der Basis eines Spannungsbeobachters zu entwickeln und auf der Zielplattform zu integrieren.

In diesem Kontext sind Lösungsansätze zur Spannungsregelung entstanden. Insgesamt wurden vier Ansätze erarbeitet von diesen wurden zwei auf der Zielplattform umgesetzt. Für die Bewertung der Ansätze wurden Kriterien entwickelt und eine Simulation aufgebaut.

Auf Basis der analytischen Betrachtungen der Verfahren sind die ebenfalls erläuterten Kontrollmechanismen entstanden. Bei diesen wird gewährleistet, dass bei Führung von zwei oder mehr Maschen gleichzeitig keine Verschiebung der jeweils anderen Masche außerhalb des Spannungsbandes stattfindet. In diesem Zusammenhang muss zur Detektion dieses Zustandes zwischen den beiden implementierten Verfahren unterschieden werden. Im Rahmen der Entwicklung sind zwei Möglichkeiten zur Sollwertermittlung in diesen kritischen Fällen entstanden. Eine „Symmetrierung“, bei dieser das Band nach oben und unten gleichermaßen verletzt wird und eine „Berechnung“ der Sollspannung, so dass eine Verletzung nach unten hin vermieden wird. Aufgrund der Anforderungen des Netzbetreibers ist die Gewährleistung der Einhaltung der unteren Grenze implementiert worden. Bewähren sich diese in der Praxis ist ein Einsatz in zukünftigen und aktuellen Entwicklungen in Regelungen auf Basis von Spannungen denkbar.

Bei der linearen Regelung kann über eine Erweiterung des Verfahrens unter Einbeziehung der minimalen Spannung im Ortsnetz nachgedacht werden. Hierbei könnte bei Unterschreitung eines Grenzwertes die Ermittlung der

Sollspannung durch Einsetzen des minimalen Spannungswertes in die Geradengleichung geschehen. Hierdurch müsste aber eine erneute Betrachtung der Kontrollmechanismen vorgenommen werden.

Die Spannungsband Regelung für einen rONT könnte dahingehend verändert werden, dass die Anwendung mit einem AVR denkbar wird. Durch Schalten des AVR in den Bypass-Modus, solange sich die Spannung im vorgegebenen Spannungsband befindet, wäre eine Reduktion der Verluste möglich. Hierzu sind aber weitere Betrachtungen des Betriebsmittels AVR notwendig. Ebenfalls ist die Erweiterung der Regelung unter Einbeziehung der Trafodaten wie der Stufenbreite, das Toleranzband und die Verzögerungszeit möglich. Weiter könnten direkt Schaltbefehle an den Trafo gesendet werden, was eine eigene Regelung am rONT überflüssig macht. So könnte eine weiter optimierte Sollwertausgabe erfolgen und die Betrachtung des Regelverhaltens des rONT würde entfallen.

Die weiteren Tests der Methoden könnten in einem „Hardware in the Loop Systems“ (HIL) stattfinden.

Eine weitere Möglichkeit stellt das Testen in der Realität dar. Das Pilotprojekt („Smart Area Aachen“), in welchem die Arbeit angesiedelt ist, stellt die nötigen Rahmenbedingungen zur Verfügung. Hier kann im Verbundprojekt zur Entwicklung einer „Intelligenten Ortsnetzstation“ die Funktionsweise beurteilt werden. Beim Test im Feld muss jedoch unter allen Umständen ein Ausfall der Stromversorgung aufgrund des regelnden Eingriffs vermieden werden. Ebenso kann es in der Realität vorkommen, dass keine kritischen Zustände auftreten und diese somit auch nicht getestet werden können.

DANKSAGUNG

Ich möchte mich für die Ermöglichung der Arbeit durch die Übernahme der Betreuung seitens der Hochschule Konstanz bei Herrn Prof. Dr. Wilhelm Fromm bedanken. Weiter geht ein sehr großer Dank an Stefan Kämpfer der meine Betreuung bei der ABB AG übernahm und dort mein erster Ansprechpartner für Fragen aller Art war. Ebenso stand mir Adam Slupinski mit seinem Fachwissen stets hilfreich zur Seite.

LITERATUR

- [1] Agentur für Erneuerbare Energien e.V., 9 April 2014 [Online], Available: <http://www.unendlich-viel-energie.de>.
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN 50160 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen“, 2011.
- [3] A. Abart, M. Stifter, B. Bletterie, H. Brunner, D. Burnier, R. Pointner, A. Schenk, R. Pit und H. Taus, „Augen im Netz: Neue Wege der Analyse elektrischer Niederspannungsnetze“, e&i Elektrotechnik & Informationstechnik, 2011.
- [4] A. Slupinski, U. Prause, M. Maximini, S. Kämpfer, T. Abay, „Neue Werkzeuge zur Abschätzung der maximalen Spannung im Niederspannungsnetz“, ETG-Kongress 2013.
- [5] VDE Verlag GmbH, „VDE-ARN-N 4105 Anschluss von Erzeugungsanlagen an der Niederspannungsnetz“, 2011.
- [6] ABB AG, „PCS100 AVC Active Voltage Conditioner Technical Catalogue“, 2013
- [7] Maschinenfabrik Rheinhausen GmbH, „GRIDCON® iTAP®“, Regensburg 2012
- [8] STAWAG AG, 11 April 2014 [Online], Available: <http://smartarea.de/>.