

Anwendung von Predictive Functional Control zur spannungsorientierten Einspeiseregulung von Windkraftanlagen

Alexander Schöley, Universität Rostock
alexander.schoeley@uni-rostock.de

Magdalena Gierschner, Universität Rostock
Torsten Jeinsch, Universität Rostock

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden prädiktive Regler nach Predictive Functional Control (PFC) für die spannungsorientierte Einspeiseregulung (Voltage Oriented Control, VOC) einer Windkraftanlage verwendet. Der Vorteil von PFC-Reglern gegenüber den sonst bei VOC üblichen PI-Reglern ist die anschauliche Parametrierung. Die vorgeschlagene Einspeiseregulung mit PFC wird in einer Simulationsumgebung realisiert und getestet. Anschließend wird der Einfluss der PFC-Reglerparameter auf die Regelgüte in verschiedenen Konfigurationen demonstriert.

Die finanziellen Mittel für diese Arbeit wurden im Rahmen des Projektes *Netz-Stabil* vom Europäischen Sozialfonds in Mecklenburg-Vorpommern bereitgestellt (Kennzeichen: ESF/14-BM-A55-0018/16).

1 Einleitung

Der Bedarf an elektrischer Energie wird in immer größeren Anteilen von erneuerbaren Erzeugern wie Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen gedeckt [1]. Konventionelle Großkraftwerke werden in Zukunft von diesen kleinen und dezentralen Erzeugern abgelöst. Mit dieser Entwicklung unterliegt das Energieangebot der fluktuierenden Verfügbarkeit von Energie aus regenerativen Quellen. Weiterhin können die Trägheiten der Synchrongeneratoren in den Großkraftwerken nicht mehr zur Stabilisierung des Netzes beitragen. Es ergibt sich die Herausforderung, den Energiebedarf aus erneuerbaren Quellen zu jedem Zeitpunkt zu erfüllen. Außerdem müssen die Stabilisierungsaufgaben langfristig von den erneuerbaren Erzeugern übernommen werden.

Die elektrische Energie aus erneuerbaren Erzeugern wird über Frequenzumrichter in das Versorgungsnetz eingespeist. In den *TransmissionCodes* der Übertragungsnetzbetreiber [2] ist definiert, welche Anforderungen dabei erfüllt werden müssen. Dieses Regelwerk wurde in der Vergangenheit auch für Erzeuger kleiner Leistungen angepasst und aufgrund

von weiteren Verschärfungen der Auflagen in zukünftigen Revisionen ergibt sich die Motivation, die Steuerung und Regelung der Umrichter beständig zu verbessern.

Die spannungsorientierte Einspeiseregulung (Voltage Oriented Control, VOC) ist ein übliches Regelungskonzept zum Anschluss eines Umrichters an das Versorgungsnetz. Es kommen dabei häufig PI-Regler zum Einsatz, die basierend auf Erfahrungswerten oder heuristisch eingestellt werden. Eine individuelle Parametrierung der Regler ist mit hohem Aufwand verbunden und erfordert ein hohes Maß an Expertenwissen. Es ist daher wünschenswert, die Parametrierung anhand intuitiver Parameter vornehmen zu können.

Predictive Functional Control (PFC) ist ein prädiktiver Regelungsansatz, der auf lineare Prozesse erster Ordnung angewandt werden kann. Im Gegensatz zu alternativen prädiktiven Regelungen erfolgt im Regelalgorithmus keine Optimierung, daher ist nur ein geringer Rechenaufwand notwendig. Als Vorteil von PFC gilt, dass die Reglerparametrierung auf einfache Weise möglich ist: Es kann die gewünschte Ausregelzeit sowie ein Maß für die Robustheit der Regelung angegeben werden.

Im vorliegenden Beitrag wird die Einspeiseregulung einer Windkraftanlage mit VOC und PFC realisiert und das Tuning der PFC-Regler an verschiedenen Parametern demonstriert. Die Arbeit ist wie folgt gegliedert. In den Abschnitten zwei und drei werden die Grundlagen von VOC beschrieben sowie das PFC-Konzept vorgestellt. Im vierten Abschnitt werden Modelle des Windkraftanlagen-Umrichters abgeleitet, um sie im Rahmen von PFC zu verwenden. Danach werden Simulationsergebnisse der Einspeiseregulung gezeigt und dabei der Einfluss der PFC-Parameter dargelegt. Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung des Beitrags.

2 Voltage Oriented Control

Um die elektrische Energie einer Windkraftanlage in das Energienetz einzuspeisen, werden in heutigen Anlagen leistungselektronische Umrichter verwendet. Der sogenannte Back-to-Back-Converter besteht aus dem generatorseitigen AC/DC-Umrichter, der über einen Zwischenkreiskondensator mit dem netzseitigen DC/AC-Umrichter verbunden ist. Beide Umrichter sind aus Leistungsschaltern in Form einer dreiphasigen H-Brücke aufgebaut. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

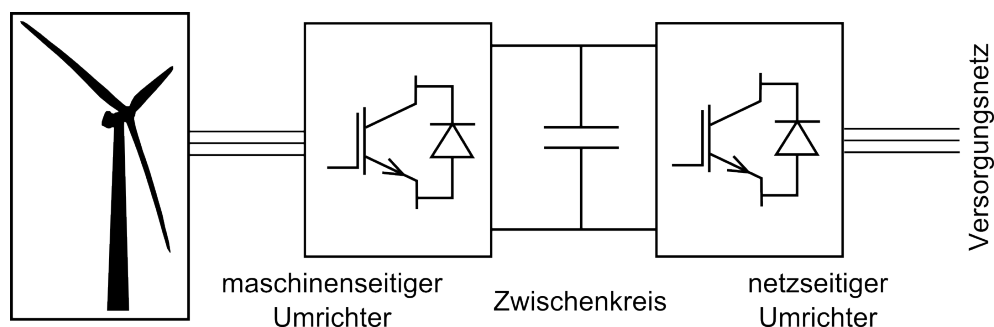


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Back-to-Back-Converters an einer Windkraftanlage

Die vom Generator der Windkraftanlage induzierte dreiphasige Wechselspannung wird vom generatorseitigen Umrichter gleichgerichtet und die Energie im Zwischenkreiskondensator gespeichert. Der netzseitige Umrichter erzeugt aus der Gleichspannung dann ein Dreiphasenwechelsystem mit zum Netz passender Frequenz und einer Phasenlage, die sich aus der gefordertern einzuspeisenden Wirk- und Blindleistung ergibt.

VOC ist ein Regelungskonzept für den netzseitigen Umrichter. Die Regelungsziele sind das Konstanthalten der Spannung am Zwischenkreiskondensators und das Einspeisen eines vorgegebenen Blindstroms. Das Halten der Zwischenkreisspannung stellt dabei ein Maß für die ins Energienetz eingespeiste Wirkleistung dar: Der Umrichter muss stets soviel Wirkleistung in das Netz abgeben, wie der Generator erzeugt und in den Kondensator einträgt. Die Kondensatorspannung ist nur konstant, wenn ein Gleichgewicht zwischen aufgenommener und abgegebener Leistung gegeben ist. Der Blindstrom ist wiederum ein Maß für die Blindleistung, welche vom Netzbetreiber vorgegeben wird.

Die Stellglieder des netzseitigen Umrichters sind die Leistungsschalter des Umrichters, deren Ansteuerung beispielsweise von einer Raumzeigermodulation (RZM) bestimmt wird. Das VOC-Konzept sieht vor, dass die Regelung in d/q-Koordinaten durchgeführt wird, d.h. dass Wechselgrößen zunächst durch die Park-Transformation in Gleichgrößen transformiert werden. Dafür ist die aktuelle Phasenlage der Netzspannung, d.h. der Netzwinkel θ erforderlich. Dieser kann aus Messungen der Netzspannung mit einer Phasenregelschleife (PLL) ermittelt werden.

Die Einspeiseregulation erfolgt dann in einer kaskadierten Struktur: Die Stromregelungen in d und q-Koordinaten bilden die innere, die Zwischenkreisspannung die äußere Kaskade. Der eingespeiste Blindstrom wird durch die q-Komponente des Stroms repräsentiert. In Abbildung 2 ist ein Blockschaltbild der VOC-Kaskadenregelung dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Entkoppelpfade nur angedeutet, sie werden in Abschnitt 4 hergeleitet. Bei der Regelung der Zwischenkreisspannung wird aufgrund einer Zustandstransformation das Quadrat der Zwischenkreisspannung U_{dc}^2 als Regelgröße verwendet.

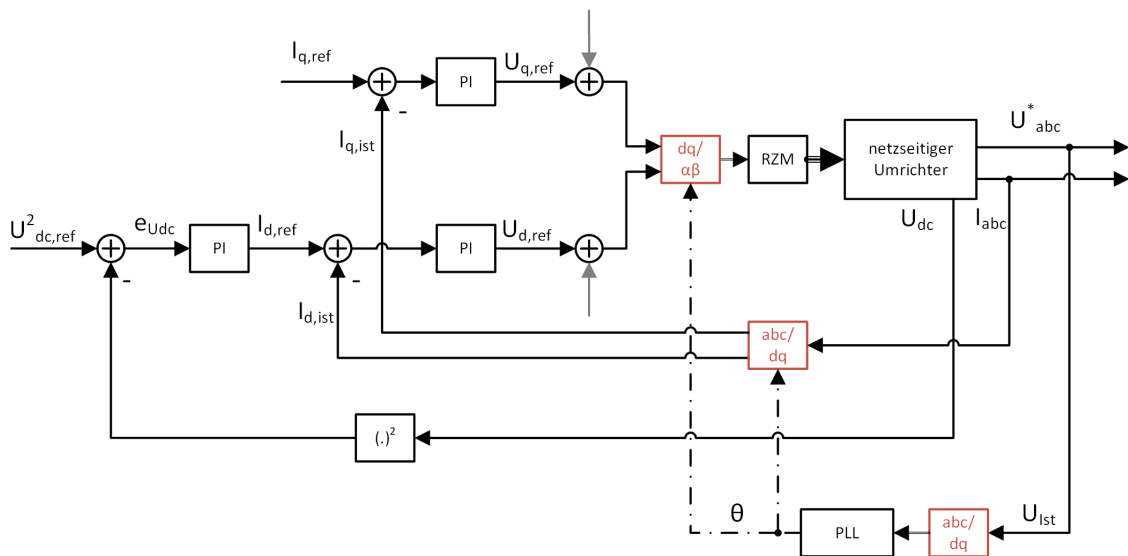


Abbildung 2: Blockschaltbild der VOC-Kaskadenregelung, die Entkoppelpfade sind in grau angedeutet

Da mit den Strömen und Spannungen in d/q-Koordinaten Gleichgrößen geregelt werden, können in der Kaskade lineare Regler verwendet und mit Standardmethoden entworfen werden. Üblicherweise werden bei VOC PI-Regler eingesetzt [3] und die Regelparameter aus Erfahrungswerten übernommen oder heuristisch eingestellt. Teilweise werden Reglerparameter auch auf der Grundlage von PT1-Modellen, beispielsweise nach Internal Model Control, ermittelt [4], [5]. Basierend auf einfachen Modellen sind auch prädiktive Regler möglich, deren theoretische Grundlagen im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

3 Predictive Functional Control

Prädiktive Regelungen nutzen ein Prozessmodell, um zukünftige Prozesszustände zu schätzen und auf dieser Grundlage ein geeignetes Stellsignal zu ermitteln. Oft wird dabei eine Optimierung durchgeführt und das optimale Stellsignal bezüglich eines vorgegebenen Gütefunktional berechnet. Je nach Komplexität des Modells und der Prädiktionsweite ist diese Optimierung sehr rechenintensiv.

Predictive Functional Control (PFC) [6] ist ein prädiktives Regelungskonzept mit reduziertem Rechenaufwand. Es ist für Prozesse geeignet, die sich mit einem Modell erster Ordnung oder als Summe von Modellen erster Ordnung approximieren lassen.

Der reale Prozess wird mit einem PT1-Modell beschrieben:

$$G_m(s) = \frac{K_m}{1 + sT_m}. \quad (1)$$

Der Index m kennzeichnet jeweils Modellparameter. Die zeitdiskrete Darstellung von (1) als Differenzgleichung lautet:

$$y_m(k + 1) = a_m \cdot y(k) + K_m(1 - a_m) \cdot u(k). \quad (2)$$

Der Parameter a_m ergibt sich aus der Zeitkonstanten der zeitkontinuierlichen Übertragungsfunktion (1) und der Abtastzeit T_s : $a_m = e^{-T_s/T_m}$. k ist die diskrete Zeitvariable.

Es wird die Annahme getroffen, dass sich der Regelfehler e nach einem Sprung des Sollwertes gleichmäßig um den Faktor $\lambda < 1$ reduziert. Es ergibt sich daher für den Regelfehler nach n Zeitschritten:

$$e(k + n) = \lambda^n \cdot e(k). \quad (3)$$

n ist der Vorhersagehorizont und λ das Reduktionsverhältnis. λ kann beispielsweise in Abhängigkeit der gewünschten Ausregelzeit gewählt werden [7]:

$$\lambda = e^{-3\frac{T_s}{T_C}}. \quad (4)$$

T_C bezeichnet hier die Zeit, in der die Regelgröße 95% des Endwertes erreicht.

Unter der Voraussetzung, dass die Stellgröße konstant bleibt, d.h. $u(k) = u(k+1) = \dots = u(k+n)$, kann mit (2) zum Zeitpunkt k die folgende Schätzung vorgenommen werden:

$$\hat{y}_m(k+n|k) = a_m^n \cdot y_m(k) + K_m(1 - a_m^n) \cdot u(k). \quad (5)$$

Die Änderung gegenüber $y_m(k)$ ist:

$$\begin{aligned} \Delta\hat{y}_m(k+n|k) &= \hat{y}_m(k+n|k) - y_m(k) \\ &= (a_m^n - 1) \cdot y_m(k) + K_m(1 - a_m^n) \cdot u(k). \end{aligned} \quad (6)$$

Die Änderung des realen Prozessausganges lässt sich mit (3) unter der Voraussetzung eines konstanten Sollwertes ($w(k) = w$) darstellen:

$$\begin{aligned} \Delta y(k+n|k) &= y(k+n) - y(k) \\ &= (1 - \lambda^n)e(k). \end{aligned} \quad (7)$$

Das Regelungsziel (gleichmäßige Abnahme des Regelfehlers und Ausregelzeit T_C) ist erreicht, wenn (6) und (7) identisch sind: $\Delta y(k+n|k) = \Delta\hat{y}_m(k+n|k)$. Es ergibt sich:

$$(a_m^n - 1) \cdot y_m(k) + K_m(1 - a_m^n) \cdot u(k) = (1 - \lambda^n)e(k). \quad (8)$$

Für die Stellgröße ergibt sich aus (8) die folgende Berechnungsvorschrift:

$$u(k) = K_0 \cdot e(k) + K_1 \cdot y_m(k) \quad (9)$$

mit

$$K_0 = \frac{1 - \lambda^n}{K_m(1 - a_m^n)} \quad (10)$$

$$K_1 = \frac{1}{K_m}. \quad (11)$$

Die Stellgröße eines PFC-Reglers ist von den Parametern des Prozessmodells (K_m, a_m)

sowie von den Parametern n und λ abhängig. Die beiden letztgenannten können im PFC-Framework als Reglerparameter aufgefasst werden. Beide Parameter haben anschauliche Einflüsse auf die Regelung: λ ergibt sich nach (4) aus T_C und ist daher ein Maß für die Ausregelzeit. n gibt an, wie viele zukünftige Zeitschritte in der Berechnung berücksichtigt werden. Mit einem größeren n steigt die Robustheit der Regelung [7]. Diese Anschaulichkeit ist beispielsweise bei den Verstärkungen eines PI-Reglers nicht vorhanden.

Das Blockschaltbild eines PFC-Reglers ist in Abbildung 3 zu sehen.

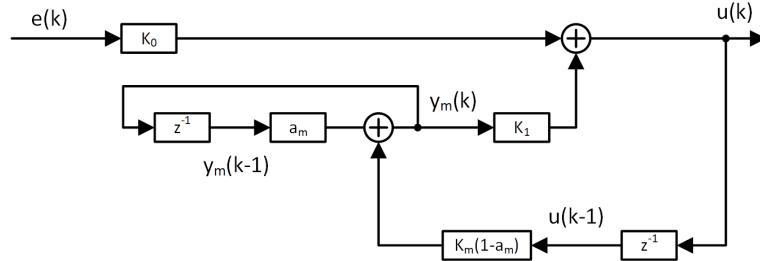


Abbildung 3: Blockschaltbild eines PFC-Reglers mit $n = 1$

3.1 Anwendung auf integrale Prozesse

Der beschriebene PFC-Ansatz kann nicht auf Regelstrecken mit integralem Anteil angewandt werden, was durch die folgende Überlegung verdeutlicht wird. Für einen Prozess mit Integrator gilt die Modellgleichung $y_m(k+1) = y_m(k) + K_m u(k)$ und es gilt $a_m = 1$. In (10) ergibt sich damit eine Division durch Null und K_0 ist nicht definiert.

Um einen PFC-Regler für ein integralen Prozess zu verwenden, wird in [6] das Verfahren *Transparent Control* vorgeschlagen. Dabei wird der integrale Prozess (Verstärkung K) zunächst nur mit einem P-Regler (Verstärkung K_P) geregelt. Als geschlossener Kreis ergibt sich ein PT1-Element mit der Verstärkung 1 und der Zeitkonstanten $\frac{1}{K_P K}$:

$$G(s) = \frac{K_P \frac{K}{s}}{1 + K_P \frac{K}{s}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_P K} s}. \quad (12)$$

Auf (12) kann nun der beschriebene PFC-Ansatz angewandt werden.

4 Anwendung

Um PFC-Regler im VOC-Konzept zu nutzen, werden Modelle erster Ordnung benötigt. Dazu wird vom Prozess, wie er in Abbildung 4 dargestellt ist, ausgegangen. Die Leistungsschalter des Umrichters werden als ideale Schalter angenommen, welche die Zwischenkreisspannung getaktet auf die drei Ausgangsphasen schalten und so Ströme in das Versorgungsnetz erzeugen. Um die hochfrequenten Anteile der Ströme zu reduzieren, werden am Umrichter Induktivitäten (L_{Inv} , R_{Inv}) verwendet, die als Ausgangsfilter wirken. Auf diese Weise stellen sich im Mittel an den drei Phasen um 120° versetzte sinusförmige

Spannungen und Ströme ein. Die Ausgangsströme und Ausgangsspannungen nach der Filterinduktivität liegen als Messwerte vor. Die gemessene Spannung ist durch * gekennzeichnet.

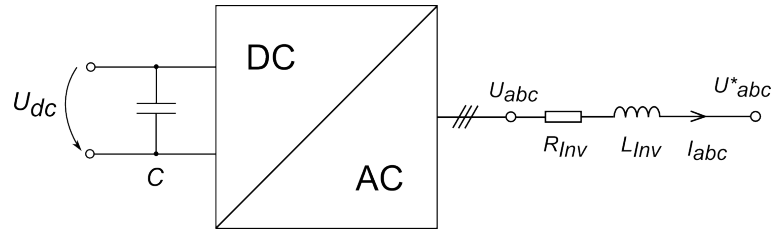


Abbildung 4: Umrichter mit Filterdrossel

Die Modellierung erfolgt in d/q-Koordinaten und ist z.B. in [4], [5] aufgeführt. Der eingespeiste Strom im Laplace-Bereich und in d/q-Koordinaten ist:

$$I_d(s) = \frac{1}{R_{Inv} + s \cdot L_{Inv}} (U_d(s) - U_d^*(s) + \omega L_{Inv} I_q(s)) \quad (13)$$

$$I_q(s) = \frac{1}{R_{Inv} + s \cdot L_{Inv}} (U_q(s) - U_q^*(s) - \omega L_{Inv} I_d(s)) . \quad (14)$$

Die Größen R_{Inv} und L_{Inv} sind Bauteilkennwerte und daher bekannt. Des Weiteren liegen I_d , I_q , U_d^* sowie U_q^* als d/q-Transformierte der Messgrößen vor. Somit lassen sich Teile des Modells (13) - (14) vorsteuern und es verbleibt ein linearer und entkoppelter Anteil:

$$I_d(s) = \frac{1}{R_{Inv} + s \cdot L_{Inv}} \cdot U_d(s) \quad (15)$$

$$I_q(s) = \frac{1}{R_{Inv} + s \cdot L_{Inv}} \cdot U_q(s). \quad (16)$$

Die Übertragungsfunktionen $I_d(s)/U_d(s)$ bzw. $I_q(s)/U_q(s)$ sind PT1-Elemente mit den gleichen Verstärkungsfaktoren und Zeitkonstanten: $K_m = \frac{1}{R_{Inv}}$ und $T_m = \frac{L_{Inv}}{R_{Inv}}$. Für beide Stromkomponenten kann also der gleiche Regler verwendet werden.

Als Ansatz zur Modellierung der Zwischenkreisspannung wird die gespeicherte Energie im Zwischenkreiskondensator C gewählt: $E = \frac{1}{2} C U_{dc}^2$. Aus der zeitlichen Ableitung der Energie ergibt sich die Leistung:

$$P = \frac{C}{2} \frac{dU_{dc}^2}{dt}. \quad (17)$$

In (17) geht die Zwischenkreisspannung quadratisch ein. Um eine lineare Beschreibung zu erhalten, wird die Transformation $W = U_{dc}^2$ durchgeführt. Des Weiteren ist die Leistungsbilanz am Kondensator durch $P = P_{WKA} - P_{Netz}$ gegeben. Dabei ist P_{WKA} die Leistung, welche vom Generator der Windkraftanlage erzeugt wird und P_{Netz} stellt die ins Versorgungsnetz eingespeiste Leistung dar. Verluste im Umrichter werden in dieser

Bilanz vernachlässigt. In d/q-Koordinaten gilt [8]:

$$P_{Netz} = \frac{3}{2}U_d I_d. \quad (18)$$

Durch Umformen von (17) und Einsetzen von (18) sowie der Leistungsbilanz ergibt sich im Laplace-Bereich:

$$W(s) = -\frac{3U_d}{sC}I_d(s) + \frac{2}{sC}P_{WKA}. \quad (19)$$

Die Übertragungsfunktion von $I_d(s)$ zu $W(s)$ ist demnach eine integrale Strecke:

$$\frac{W(s)}{I_d(s)} = -\frac{3U_d}{C} \frac{1}{s}. \quad (20)$$

Für die Regelung der Zwischenkreisspannung mit PFC wird daher die Transparent Control Methode angewandt.

5 Simulationsergebnisse

Die VOC-Kaskadenregelung mit Vorsteuerung wird in der beschriebenen Form mit PFC-Reglern in Matlab/Simulink realisiert, d.h. alle PI-Regler aus der Abbildung 2 werden durch PFC-Regler ersetzt. Um den Einfluss der PFC-Parameter aufzuzeigen, werden mehrere Simulationen mit unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt. Zusätzlich wird zum Vergleich das Regelergebnis mit den klassischen PI-Reglern herangezogen.

Als Gütemaß für die VOC-Regelung wird der Verlauf der Zwischenkreisspannung bewertet, da diese Größe die Wirksamkeit der Wirkleistungseinspeisung widerspiegelt. Als Szenario wird zunächst eine 3 MW Windkraftanlage unter Vollast simuliert. Ab dem Zeitpunkt $t = 0,2$ s wird die erzeugte Leistung der Windkraftanlage P_{WKA} alle 0,1 s verändert und nimmt nacheinander die folgenden Teillasten an: 50%, 30%, 80% und 100%. Auf diese Weise wird eine Störung für die Regelung simuliert. Der Einschwingvorgang kann in dieser Betrachtung vernachlässigt werden. Da in der Simulation die Taktung der Leistungsschalter berücksichtigt wird, existieren Schwankungen auf dem Verlauf der Zwischenkreisspannung. Für alle Simulationen beträgt der Sollwert der Zwischenkreisspannung 1100 V und der Sollwert des Blindstroms 0 A. Die Diskretisierungszeit der Regelung beträgt $T_s = 0,00025$ s und die Taktfrequenz der Leistungsschalter 2000 Hz.

In Abbildung 5 ist der Verlauf der Zwischenkreisspannung für unterschiedliche Parametrierungen der Stromregler dargestellt, die Parametrierung des Zwischenkreisreglers wird nicht verändert. Die obere Darstellung zeigt das Verhalten der PFC-Regler bei verändertem T_C und festem n . Als Vergleich ist in schwarz das Regelverhalten der PI-Regelung eingefügt.

Werden die PFC-Regler mit einem kleineren T_C parametrieren, fällt das Über- bzw. Unterschwingen nach einer Störung geringer aus und die Ausregelung erfolgt schneller. Damit konnte die in Kapitel 3 beschriebene Anschaulichkeit des Parameters T_C durch die Simulation bestätigt werden. Die beiden unteren Diagramme zeigen den Einfluss des Parameters n auf die PFC-Regelung. Um die Unterschiede zwischen den Verläufen zu erkennen, ist ein kurzer Zeitabschnitt vergrößert abgebildet. Der Parameter n hat hier nur einen geringen Einfluss auf die Regelgüte. Für $T_C = 0,001$ s ist das Unterschwingen bei $n = 2$ größer als bei $n = 1$ und die Ausregelung erfolgt unruhiger mit Schwingungen kleiner Amplitude. Bei der Parametrierung mit $T_C = 0,0005$ s ist nur ein sehr geringer Unterschied zwischen den Regelergebnissen zu erkennen. Die geringe Auswirkung von n auf die Regelung ist bereits in [7] beobachtet worden, eine verbesserte Robustheit konnte hier nicht festgestellt werden.

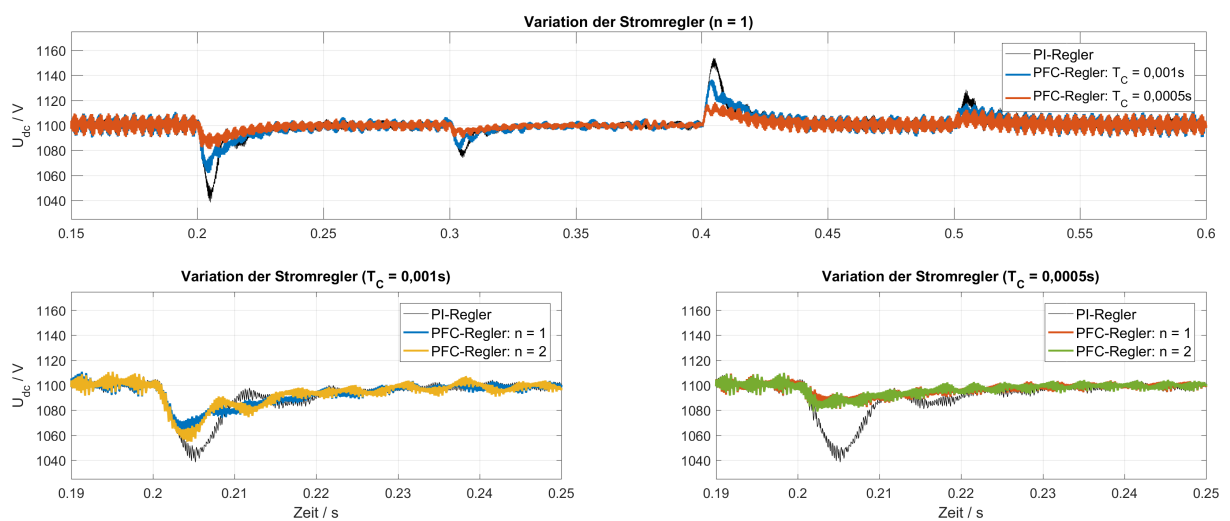


Abbildung 5: Verlauf der Zwischenkreisspannung für unterschiedliche Parametrierung der PFC-Stromregler

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse von Simulationen mit unterschiedlicher Parametrierung des Zwischenkreisreglers dargestellt. Als Stromregler werden PFC-Regler mit den Parametern $T_C = 0,001$ s und $n = 1$ verwendet. Der P-Regler, der im Rahmen von Transparent Control verwendet wird, ist so gewählt worden, dass die Zeitkonstante von (12) der dreifachen Zeitkonstanten des Stromregelkreises entspricht. Damit ist sichergestellt, dass die innere Kaskadenregelung eine schnellere Dynamik aufweist. Im oberen Diagramm ist wieder der intuitive Zusammenhang zwischen dem Reglerparameter T_C und der Ausregelzeit erkennbar: Der Regelverlauf mit kleinerem T_C erreicht auch eine kleinere Ausregelzeit. Allerdings ist im Zeitabschnitt zwischen 0,3 s und 0,4 s zu sehen, dass das kleinere T_C ein unruhiges Regelverhalten mit Schwingungen auf der Regelgröße verursacht. In den unteren Darstellungen ist wiederum nur ein geringer Einfluss des Parameters n erkennbar.

Ein Vergleich der Regelverläufe bei der Benutzung von PFC- und PI-Regler zeigt eine höhere Regelgüte der PFC-Reglern für die durchgeführten Simulationen. Vor allem ist das Überschwingen der Zwischenkreisspannung bei der Regelung mit PFC geringer.

In einer weiteren Simulation zeigt sich jedoch, dass durch eine ungünstige Wahl der

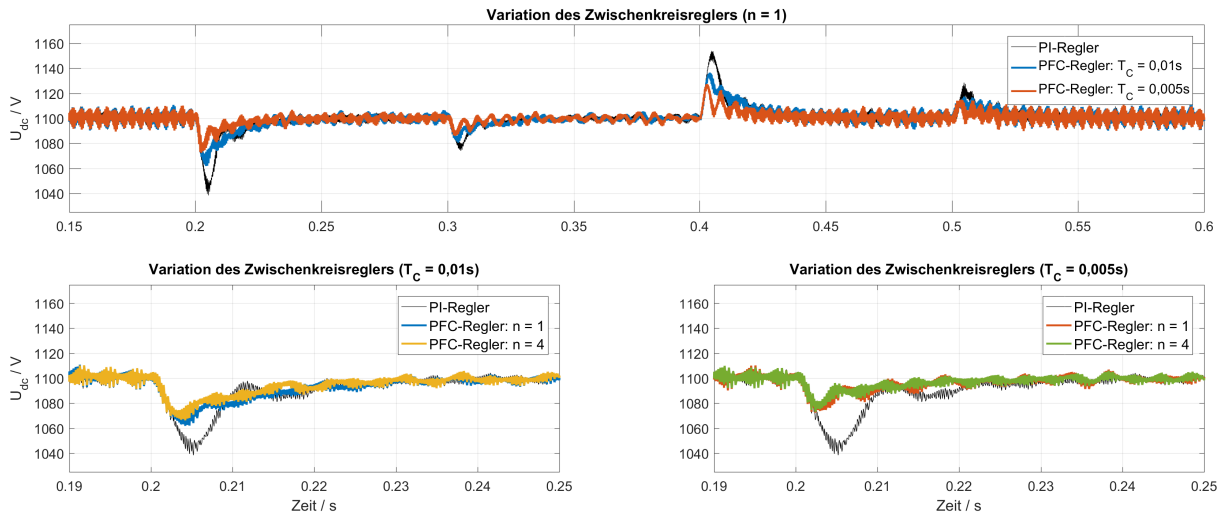


Abbildung 6: Verlauf der Zwischenkreisspannung für unterschiedliche Parametrierung des PFC-Zwischenkreisreglers

PFC-Reglerparameter die Regelqualität stark beeinträchtigt werden kann. Wird T_C zu klein gewählt, so kann die Zwischenkreisspannung zu Schwingungen angeregt werden, wie es in Abbildung 7 dargestellt ist. Die Regelperformance bleibt dann hinter der PI-Regelung zurück.

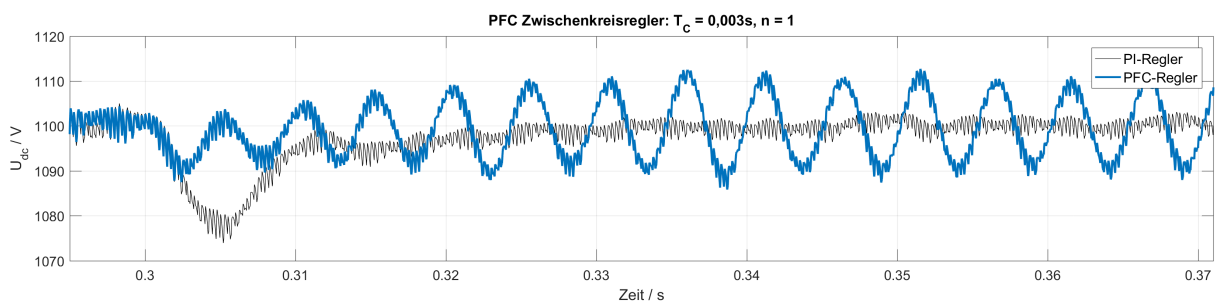


Abbildung 7: Schwingung der Zwischenkreisspannung bei Wahl von zu kleinem T_C

6 Zusammenfassung und Ausblick

VOC ist ein Konzept für die Einspeiseregulation von Umrichtern und wird für Windkraftanlagen angewandt. Klassischerweise werden dabei PI-Regler mit heuristisch eingestellten Parametern verwendet. Der vorliegende Beitrag stellt eine prädiktive Regelung vor und wendet sie im Rahmen von VOC an.

PFC-Regler basieren auf linearen Prozessmodellen erster Ordnung und nutzen die Modellparameter direkt im Regelalgorithmus. Außerdem kann das Regelverhalten über zwei weitere Parameter anschaulich eingestellt werden. In einer Simulation wurde VOC mit PFC-Reglern realisiert und die Auswirkungen unterschiedlicher Parametrierungen auf die Regelgüte demonstriert. Es zeigte sich, dass die Regelung insbesondere über den Parameter T_C intuitiv abgestimmt werden kann. Dabei konnte auch eine höhere Regelgüte als bei der bestehenden PI-Regelung erreicht werden.

Das anschauliche Tuning der PFC-Regler ist jedoch nur in Grenzen möglich. Wird eine zu kleine Ausregelzeit gefordert, reagiert die Regelgröße unruhig. Bei ungünstiger Parametrierung können starke Überschwingungen und ungedämpfte bzw. nur schwach gedämpfte Schwingungen auftreten, durch welche die Bauteile des Umrichters stark belastet werden. Die Einspeiseregung gilt in so einem Fall als instabil. Der Nachweis für die Stabilität der Einspeiseregung wird im Fokus der weiteren Forschungsarbeit stehen.

Bevor die PFC-Regelung an einem realen Umrichter implementiert und getestet werden kann, sollte das Regelverhalten in weiteren Szenarien untersucht werden. Dazu gehören der Betrieb mehrerer Umrichter, die Reaktion auf Änderungen des Blindleistungswertes sowie das Verhalten bei Netzfehlern.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie *Fünfter Monitoring Bericht zur Energiewende* 2016
- [2] Verband der Netzbetreiber: *TransmissionCode 2007 - Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber* 2007
- [3] Raducu, George Alin: *Control of Grid Side Inverter in a B2B Configuration for WT Applications* Master Thesis, Aalborg, Dänemark, 2008
- [4] Sanjuan, Sylvain: *Voltage Oriented Control of Three Phase Boost PWM Converters*, Master Thesis, Göteborg, Schweden, 2010.
- [5] Ottersten, Rolf: *On Control of Back-to-Back Converters and Sensorless Induction Machine Drives*, Dissertation, 2003
- [6] Richalet, Jacques; O'Donovan, Donal: *Predictive Functional Control - Principles and Industrial Applications*, Springer, 2009.
- [7] Haber, Robert; Kreutz, Mirco; Zabet, Khaled: *Predictive Functional Control: Algorithmus und Testbetrieb*, Automatisierungstechnische Praxis, 2011
- [8] Teodorescu, Remus; Liserre, Marco; Rodríguez, Pedro: *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, Wiley, 2011.