

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Entstehung und Verbreitung von Oberschwingungen in Energieversorgungsnetzen untersucht. Die Analyse erfolgt mittels eines Modellierungsansatzes im Frequenzbereich und basiert auf linearen Frequenzkopplungsmatrizen. Ein besonderer Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Analyse von dreiphasigen Zweistufenspannungswechsellrichtern (Wechselrichter) und doppelt gespeisten Asynchronmaschinen (DASM). Die Ansteuerung der Wechselrichter erfolgt durch ein Pulsweiten modulierte Signal, das mittels eines Trägerverfahrens (Sinus/Dreieckvergleich) erzeugt wird. Das Ergebnis der Analyse sind sehr genaue, schnelle und anschauliche Modelle für Wechselrichter und Schleifringläuferasynchronmaschinen. Mit Hilfe dieser Modelle können optimierte Regelverfahren entwickelt werden, die zu einer deutlichen Reduzierung von Netzrückwirkungen bei Oberschwingungsbehafteten Netzspannungen führen.

Eine zunehmende Anzahl von drehzahlvariablen Antrieben, erneuerbaren Energiequellen und allgemein leistungselektronischen Einrichtungen sind in modernen Energieversorgungsnetzen miteinander verbunden. Viele dieser Einrichtungen erzeugen Oberschwingungen und beeinflussen sich gegenseitig und die Dynamik des Energieversorgungsnetzes. Es ist schwierig, diese Wechselwirkungen mathematisch exakt zu beschreiben und durch Simulationen im Zeitbereich nachzuvollziehen. Simulationen im Zeitbereich haben, obwohl sie grundsätzlich genau und ihre Ergebnisse allgemein anerkannt sind, gravierende Nachteile: Sie geben keinen Einblick in die fundamentalen Funktionsweisen der modellierten Systeme. Hinzu kommen Schwierigkeiten bei der Modellbildung, da die meisten leistungselektronischen Systeme nicht linear sind, Frequenzkopplungen beinhalten und steife Systeme sind, für die detaillierte Simulationen zeitintensiv oder sogar unmöglich sind. So ist es zum Beispiel nach wie vor nicht möglich, Windparks mit detaillierten Modellen für jede Windkraftanlage im Zeitbereich zu simulieren. Aufgabe dieser Arbeit ist daher, ein Modellierungskonzept zu erarbeiten, das ein genaues, schnelles und anschauliches Modellieren von leistungselektronischen Einrichtungen ermöglicht.

Das in dieser Arbeit verfolgte Modellierungskonzept linearer Systeme findet im Frequenzbereich statt und benutzt das Konzept operativer Matrizen, d.h. die zu untersuchenden Systeme werden durch geeignete Koeffizienten (hier Fourierkoeffizienten) und nicht durch Zeitfunktionen beschrieben. So werden signifikante Vorteile gegenüber konventionellen Simulationen im Zeitbereich erreicht: Simulationen im Frequenzbereich sind sehr viel schneller, durch die Analyse der Matrixstruktur ist ein unmittelbarer Einblick in die fundamentalen Funktionsmechanismen möglich und numerische Schwierigkeiten werden vermieden, die bei der Analyse von nicht linearen Systemen und von leistungselektronischen Bauteilen mit diskreten Schaltzuständen im Zeitbereich bestehen.

Ergebnisse der Modellbildung sind lineare analytische Modelle für Wechselrichter und Schleifringläuferasynchronmaschinen. Die Herleitung erfolgt zunächst im Zeitbereich. Die Ergebnisse werden dann in den Frequenzbereich übertragen. Das Modell für den Wechselrichter basiert auf der Analyse der zur Ansteuerung verwendeten Schaltfunktionen. Die resultierenden Übertragungsfunktionen sind linear, solange keine Änderung des Ansteuersignals erfolgt. Ändert sich jedoch das Ansteuersignal, so sind sie nicht länger linear und müssen um einen Arbeitspunkt linearisiert werden. Das Modell für die DASM basiert auf üblichen Vereinfachungen zur Modellierung in einem rotierenden Koordinatensystem. Die resultierenden Gleichungssysteme sind nicht linear und müssen folglich ebenfalls um einen Arbeitspunkt linearisiert werden. Auf Grund der Linearisierung sind die Modelle auf Kleinsignalanalysen beschränkt.

Die Modelle werden für die Untersuchung der Entstehung und Verbreitung von Oberschwingungen unter normalen und gestörten Betriebsbedingungen genutzt. Die Analyse unter ungestörten Bedingungen erlaubt es, charakteristische Oberschwingungen zu bestimmen. Sie sind systemimmanent und können nicht beeinflusst werden, ohne die grundsätzliche Funktionsweise zu ändern oder ohne zusätzliche Komponenten zu installieren. Die Analyse der Systemantwort auf Störungen erlaubt es, nicht charakteristische Oberschwingungen zu bestimmen. Beide Systeme verursachen erhebliche Netzzrückwirkungen, wenn die Netzspannung Oberschwingungsbehaftet oder das Energieversorgungsnetz unsymmetrisch ist. Es ist von besonderem Interesse, Wechselrichter und DASM dagegen unempfindlich zu machen. Filter, so sie installiert sind, dämpfen in der Regel gezielt charakteristische Oberschwingungen. Folglich muss ein geeignetes Regelverfahren gefunden werden, mit dessen Hilfe eine Reduzierung der Netzzrückwirkungen erfolgt. Der hier verfolgte Modellierungsansatz ermöglicht die Herleitung einer geeigneten Regelung.

Sowohl Wechselrichter als auch DASM werden geregelt betrieben. Regelungen können so entworfen werden, dass sie nicht auf externe Störungen reagieren, also kaum Einfluss auf die Entstehung nicht charakteristischer Oberschwingungen nehmen, oder sie können zusätzlich dazu genutzt werden, aktiv Netzzrückwirkungen zu reduzieren. Ein besonders effektives Regelverfahren mittels Vorsteuerung, das Netzzrückwirkungen bei Oberschwingungsbehafteten Netzspannungen reduziert, wird entwickelt. Die Vorsteuersignale werden durch einfache Manipulationen der Frequenzkopplungsmatrizen generiert.

Die Implementierung der Modelle erfolgt mittels MATLAB. Für die Berechnung der Frequenzspektren wird ein Sinusbezugssystem verwendet. Da die Ergebnisse an Hand von Frequenzspektren verglichen und diskutiert werden, ist eine detaillierte Analyse von Transformationen, die Signale aus dem Zeit- in den Frequenzbereich abbilden, Bestandteil dieser Arbeit. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Darstellung von Fehlerquellen, die durch die Analyse von zeitbegrenzten diskreten Signalen im Gegensatz zu unbegrenzten kontinuierlichen Signalen entstehen.

Mit Hilfe des Programms PSCAD/EMTDC werden alle Ergebnisse verifiziert. Die Simulationsergebnisse im Zeit- und im Frequenzbereich stimmen sehr gut überein. Das in dieser Arbeit entworfene Regelverfahren zur Reduzierung von Netzzrückwirkungen ist sehr effektiv. Dadurch wird die Genauigkeit und der Nutzen dieser Methode für die Analyse der Entstehung von Oberschwingungen in modernen Energieversorgungsnetzen mit einer Vielzahl von leistungselektronischen Einrichtungen nachgewiesen.

Acknowledgment

This thesis was written during my employment at the TU Berlin. Dr. Alan Wood from the University of Canterbury in Christchurch, New Zealand and Prof. Dr. Rolf Hanitsch from the TU Berlin supervised my doings. It would have been impossible to finish without the support of many - either supporting me work-wise or keeping me sane.

I would like to express my sincere appreciation to Prof. Dr. Rolf Hanitsch for his support, advice and postponing his retirement to see me through the stormy waters of finishing. To Dr. Alan Wood, for his invaluable advice on work-related and outdoor-related subjects, his willingness to endure longish discussions on harmonic interactions in his office and for taking me kayaking, caving, tramping and climbing. I would also like to thank Dr. Simon Round for inviting me to Christchurch in the first place and Dr. Hamish Laird as well as Christopher Osaukas. Getting started without your help would have been much slower. Dr. Dave Hume and Dr. Jonathan Carr: Cheers for countless fantastic trips into New Zealand's beautiful wilderness above and below ground level. As for the support I received in Germany: Many thanks for the successful teamwork at university to my colleagues: Matthias Centner, Yuriy Plotkin, Prof. Dr. Detlef Schulz and Arno Hellemann. Special mention must be made to Thomas Sadowski for his cooperation, friendship and the numerous climbing trips as well as to Rayk Grune for supplying me with valuable ideas towards the end of my thesis. Nico Mock, cheers for all your delicious cooking and the distractions you provided as well as for your patience maintaining my Linux system and solving my \LaTeX troubles. Thanks Barbara Rehbehn, for your love, moral support, many sailing adventures and marrying me!

OK, another round of "thank yous" to my parents, Prof. Dr. Timo Bretschneider, Hans-Uwe (Wili) Berger and Sarah Brophy, Dr. Michael Hagedorn and Dr. Britta Bass, Dr. Stuart Barnes, Dr. Philipp Börker, Wolfgang Grünheid and his "Windflower", the "Jugend des Deutschen Alpenvereins", namely "die Yetis", Simon Kuhnt and Julian Merlin and all others who managed to provide exciting distractions that prevented me from almost inevitable insanity.

I really have to acknowledge the financial support I received from the DAAD, which financially supported two out of my four trips to Christchurch, New Zealand; the "101" as well as the "Elektrotechnik Cafeteria" for their never ceasing coffee supply.

Finally, I'd like to thank Niklas Werner for the love and friendship I received and the uncountable adventures we had until his fatal accident on Mt. Aspiring. Without him, my life would have been a lot less exciting and joyful. Cheers mate!