

Ein mechanisches
Kommutierungsverfahren
zum direkten Betrieb von
permanenterregten Synchronmaschinen
aus einer Gleichspannungsquelle

dem Fachbereich
Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik
der Bergischen Universität Wuppertal
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Dipl.-Ing. Tobias Rösmann

Tag der Prüfung: 27.01.2012

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Stefan Soter

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Steimel, Ruhr-Universität Bochum

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Stand der Technik	4
1.3	Aufgabenstellung	5
1.4	Aufbau der Arbeit	8
2	Grundlagen	9
2.1	Pitchsysteme in Windkraftanlagen	9
2.1.1	Aufbau und Funktion des Pitchsystems	11
2.1.2	Funktionsweise des Pitchsystems	12
2.1.3	Antriebsauslegung und Lasten von Pitchsystemen	15
2.2	Regelungsverfahren für Drehfeldmaschinen	19
2.2.1	Direkte Regelungsverfahren	19
2.2.2	DTC-Betrieb von permanenterregten Synchronmaschinen	22
2.2.3	Blockkommutierung zur Regelung von Synchronmaschinen	24
3	Funktionale Sicherheit in Windkraftanlagen	27
3.1	CE-Konformität	27
3.1.1	Zertifizierung der WKA	28
3.2	Sicherheitsgerichtete Ansteuerung von Maschinen	28
3.3	Kategorien	31
3.4	Sicherheitsfunktion 'Nothalt WKA'	32
3.4.1	SRP/CS Rotor WKA	34
3.4.2	SRP/CS Pitchachse	35
4	Betrieb mit rotorgesteuertem Drehspannungssystem	37
4.1	Funktionsprinzip des Ansteuerungsverfahrens	37
4.2	Stationäres Betriebsverhalten	39
4.2.1	Elektrische Zustandsgrößen im stationären Zustand	40
4.2.2	Mechanische Zustandsgrößen im stationären Zustand	41
4.3	Analyse der Drehmomentcharakteristik	43
4.3.1	Permanenterregte Maschine ohne Reluktanz	43
4.3.2	Permanenterregte Maschine mit Reluktanzmoment	47
4.4	Quantitative Analyse des Maschinenverhaltens	54
4.4.1	Drehmoment, Drehzahl- und Stromcharakteristik	55
4.4.2	Leistungsaufnahme der Maschine	56
4.4.3	Einfluss des Wicklungswiderstands	57

4.4.4	Einfluss der Reluktanz	57
4.4.5	Dynamisches Verhalten	58
5	Mechanische Selbstkommutierung von Synchronmaschinen	65
5.1	Diskrete Approximation der Strangspannungen	65
5.1.1	Bestimmung der diskreten Spannungszustände	66
5.1.2	Bewertung möglicher Schaltsequenzen	70
5.2	Realisierung des Kommutators	76
5.2.1	Erzeugung der Spannungszustände	76
5.2.2	Kommutierung induktiver und kapazitiver Strangströme	78
5.2.3	Mechanischer Aufbau des Kommutators	80
5.2.4	Elektrisches Ersatzschaltbild des Kommutators	81
5.3	Vergleich mit bekannten Regelungsverfahren	83
6	Simulation einer MSK-gesteuerten Synchronmaschine	87
6.1	Aufbau des Simulationsmodells	89
6.2	Modellierung des Kommutators	91
6.3	Herleitung der Maschinengleichungen	92
6.3.1	Kopplungsmatrix $[M_{ss}]$	94
6.3.2	Kopplungsmatrizen $[M_{sr}]$ und $[M_{rs}]$	97
6.3.3	Kopplungsmatrix $[M_{rr}]$	97
6.3.4	Induzierte Spannung	98
6.3.5	Elektromechanisches Drehmoment der Maschine	99
6.4	Nullstrom-kompensiertes Maschinenmodell	101
6.4.1	Systemgleichungen in rotororientierter Darstellung	103
6.4.2	Stationärer Zustand des Gleichungssystems	106
7	Messtechnische Verifikation und Modellvalidierung	109
7.1	Versuchsaufbau	109
7.2	Ausgewählte Messergebnisse	111
7.2.1	Stationäre Kennlinien	112
7.2.2	Zeitverläufe	115
8	Zusammenfassung und Ausblick	119
	Literaturverzeichnis	123
A	Parameter der Testmaschine	129
	Stichwortverzeichnis	131