

**Konzept zur Überwachung elektrischer Komponenten in
Windenergieanlagen mit Hilfe konditionierter Simulation und
begleitender Messung**

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch -Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.- Ing. Constantijn Steinhuisen
aus Lübeck

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Seeliger
apl. Prof. Dr.-Ing. Paul Burgwinkel

Tag der mündlichen Prüfung: 16.11.2007

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit	2
2	Stand der Windenergiewirtschaft	5
2.1	Historischer Überblick	5
2.2	Mechanische Komponenten	6
2.2.1	Rotor	7
2.2.2	Hauptlager	11
2.2.3	Getriebe	12
2.2.4	Kupplung	13
2.2.5	Bremse	13
2.2.6	Turm	14
2.3	Generatorkonzeptionen	15
2.3.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	15
2.3.2	Synchrongenerator mit Vollumrichter	17
2.3.3	Doppeltgespeiste Asynchronmaschine	18
2.3.3.1	Der Frequenzumrichter	19
2.3.3.2	IGBT	20
2.3.3.3	Regelung	21
2.3.4	Die Betriebssteuerung	22
2.4	Condition-Monitoring-Systeme	24
2.4.1	Zustandsüberwachung für Windenergieanlagen	24
2.4.2	Condition Monitoring an WEA	28
2.4.3	Probleme beim Einsatz von CM-Systemen an WEA	30
3	Betriebsmessung an einer Referenzanlage	34
3.1	Motivation	34
3.2	Aufbau der Messinstallation	35
3.2.1	Die Datenaufzeichnung	35

3.2.2	Erfassung der mechanischen Größen	38
3.2.3	Erfassung der elektrischen Größen	42
3.2.4	Ergebnisse der Langzeitmessung	45
3.2.4.1	Mechanische Signale	46
3.2.4.2	Elektrische Signale	49
3.3	Verifikation der elektrischen Messgrößen	52
3.3.1	Leistungsvergleich	52
3.3.1.1	Luftspalmoment	53
3.3.2	Erkenntnisse aus der Messauswertung	55
4	Simulation der elektrischen Komponenten	58
4.1	Motivation	58
4.2	Anforderungen und Herangehensweise	58
4.2.1	Mathematische Beschreibung der Asynchronmaschine mit Schleifringläufer	60
4.2.2	Raumzeigerdarstellung	62
4.2.3	Symmetrische Komponenten	63
4.3	Modellbildung	64
4.3.1	Das Maschinenmodell	65
4.3.1.1	Netz	67
4.3.1.2	Generator	68
4.3.2	Berücksichtigung unsymmetrischer Lastfälle	72
4.3.2.1	Fehlererkennung	74
4.3.2.2	Sättigung und Temperatureffekte	75
4.3.2.3	Stromverdrängung	76
4.3.3	Regelung	78
4.3.3.1	Vorsteuerung	79
4.3.3.2	Leistungsregler (Power Controller)	80
4.3.3.3	Netzseitiger Umrichter (LSC)	82
4.3.4	Leistungssteller aus Drehzahl	83
4.4	Modellbildung in SimulationX	84
4.5	Bewertung der referenzierten Simulation	86
4.5.1	Verifikation	86

4.5.2	Simulation dynamischer Vorgänge	90
4.5.3	Einfaches Gesamtmodell der WEA	95
4.5.4	Zusammenfassung	97
5	Konzeption eines Anlagenüberwachungssystems	99
5.1	Anforderungsanalyse	99
5.1.1	Themeneingrenzung	99
5.1.1.1	Lagerschäden	100
5.1.1.2	Stand der Lagerdiagnose	102
5.1.1.3	Prüfstandsuntersuchungen	109
5.1.2	Hardwareanforderung	115
5.1.3	Softwareanforderung	116
5.1.4	Marktrecherche	118
5.2	Überwachungskonzept	120
5.2.1	Entwurf des Gesamtsystems und Beschreibung der Elemente	120
5.2.2	Das Datenerfassungsmodul	121
5.3	Resümee zum Überwachungssystem	131
6	Zusammenfassung und Ausblick	132
7	Quellenverzeichnis	136
8	Abbildungsverzeichnis	152
9	Tabellenverzeichnis	155