

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik der Fakultät für Maschinenbau an der Technischen Universität Chemnitz, und wurde im Rahmen des Graduiertenkollegs „Energiebereitstellung aus regenerativen Energiequellen“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. -Ing. P. Tenberge, da durch seine Anregung und Unterstützung diese Arbeit möglich wurde.

Mein Dank gilt in gleicher Weise Herrn Prof. Dr. sc. nat. P. Maißer, dem Leiter des Instituts für Mechatronik, für seine fachliche und persönliche Unterstützung, die zum guten Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Schließlich möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken.

Meiner Frau danke ich besonders herzlich für die Jahre der Rücksichtnahme und Geduld.

Chemnitz, in März 2004

Zhang Tong

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Windkraftanlage	1
1.2 Regelungssystem der Windkraftanlage	3
1.3 Aufbau der Arbeit	6
2 Modellierung der Windkraftanlage	9
2.1 Luftdynamisches Modell	9
2.2 Mechanisches Modell	10
2.2.1 Umlaufrädergetriebe	10
2.2.1.1 Struktur	12
2.2.1.2 Drehzahlbeziehung	14
2.2.1.3 Drehmomentbeziehung	15
2.2.1.4 Umlaufwirkungsgrad	17
2.2.2 Modellierung des mechanischen Systems	19
2.3 Elektrische Maschine	26
2.3.1 Asynchrongenerator	26
2.3.1.1 Gleichungssystem	29
2.3.1.2 Stationäres Verhalten	30

2.3.2	Pitchregelung	33
2.4	Kombination des Systems	35
2.5	Simulation des Windes	37
3	Dynamisches Verhalten des Systems	41
3.1	Aerodynamisches Verhalten	41
3.2	Basis-Modell mit elastischer Kupplung	44
3.3	Dynamisches Verhalten des gesamten Modells	46
3.3.1	Mathematisches Modell mit Energieoptimum	46
3.3.2	Strukturelle Parameter	50
3.3.2.1	Steifigkeit der Hauptwelle	50
3.3.2.2	Dämpfung der Hauptwelle	57
3.3.2.3	Steifigkeit und Dämpfung der Generatorwelle	59
3.3.2.4	Steifigkeit und Dämpfung der Stellmotorwelle	63
4	Regelungen der Windkraftanlage	67
4.1	Anlaufprozess	68
4.2	Wartestellung	70
4.3	Teillastbereich	71
4.3.1	Theorie	71
4.3.2	Leistungsoptimierung	73
4.3.3	Dynamisches Verhalten mit elastischen Kupplungen	78
4.4	Überlastbereich	81
4.4.1	Theorie	81
4.4.2	Regelungssystem des Pitch-Winkels	83
4.4.2.1	Dynamisches Modell	83
4.4.2.2	Regelungssystem	84
4.4.3	Dynamisches Verhalten	86
4.4.4	Sprungantwort	87

4.4.5	Systematische Methodologie	91
5	Regelstrategien	99
5.1	Auswertung der Signale	99
5.1.1	Auswertung dynamischer Belastungen	99
5.1.2	Auswertung der Leistungen	107
5.2	Regelstrategien der Windkraftanlage	111
5.2.1	Regelstrategien	111
5.2.1.1	A-Strategie	111
5.2.1.2	B-Strategie	112
5.2.2	Dynamisches Verhalten	113
5.3	Simulationsergebnisse	118
5.3.1	Windprofile	118
5.3.2	Antwort des Systems bei Anregung mit simuliertem Wind	118
5.3.3	Simulationsergebnisse bei Anregung mit verschiedenen Wind- profilen	124
6	Aktive Dämpfung	133
6.1	Dynamisches Verhalten bei Aktiver Dämpfung	133
6.1.1	Realisierung der aktiven Dämpfung	133
6.1.2	Regelkreis mit Eingang Stellmoment M_S	136
6.1.3	Dynamisches Verhalten	139
6.2	Sprungantwort mit aktiver Dämpfung	143
6.3	Simulationsergebnisse	146
6.3.1	Antwort bei Anregung durch simulierte Winde	146
6.3.1.1	Anregung durch Wind mit $\bar{v}_W = 6 m/s$	148
6.3.1.2	Anregung durch Wind mit $\bar{v}_W = 10 m/s$	151
6.3.1.3	Anregung durch Wind mit $\bar{v}_W = 14 m/s$	158
6.3.2	Simulationsergebnisse bei Anregung mit allen Windprofilen	162

6.4	Zusammenfassung	175
7	Zusammenfassung und Ausblick	177
7.1	Zusammenfassung	177
7.2	Kritik und Ausblick	180
A	Verwendete Symbole	181
	Literaturverzeichnis	184

Abbildungsverzeichnis

1.1	Struktur der Windkraftanlage mit leistungsverzweigtem Getriebe	3
1.2	Blockschaltbild der Regelungs- und Betriebsführungssysteme	3
2.1	Leistungs- und Momentenbeiwerte	11
2.2	Umlaufrädergetriebe in der Windkraftanlage	13
2.3	Leistungen des Windes, des Stellmotors und des Generators als Funktion der Rotordrehzahl	17
2.4	Wirkungsgrad des Getriebes	18
2.5	Mechanisches Modell mit leistungsverzweigtem Getriebe	19
2.6	Schematische Darstellung der Wicklungen einer Asynchronmaschine	27
2.7	Signalflussplan der Asynchronmaschine bei Verwendung des mit statorfesten Koordinatensystem S	31
2.8	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der Asynchronmaschine	32
2.9	Aktor für die Pitchregelung	34
2.10	Windmodell für Simulation des Windes	38
2.11	Simulierte Windgeschwindigkeit mit verschiedenen durchschnittli- chen Windgeschwindigkeiten	39
3.1	Elementares Regelungssystem	42
3.2	Rotormoment/Rotorgeschwindigkeit Kurve	43
3.3	Antrieb mit elastischer Verbindung zwischen Rotor und Last	44

3.4	Störungsverhalten mit dem Moment der Hauptwelle, dem Generatormoment und dem Moment des Stellmotors als Ausgänge	53
3.5	BODE-Diagramme mit der Generatorleistung und der Rotordrehzahl als Ausgänge bzw. mit der Windgeschwindigkeit als Eingang	55
3.6	BODE-Diagramm, Eingang: Stellmoment	56
3.7	BODE-Diagramm, Eingang: Pitch-Winkel	57
3.8	BODE-Diagramm mit der Generatorleistung und dem Generatormoment als Ausgänge bzw. der Änderung der Windgeschwindigkeit als Eingang für das System mit Dämpfung der Generatorwelle $D_G = 200 \text{ Nm s/rad}$	62
3.9	BODE-Diagramme mit der Änderung der Windgeschwindigkeit als Eingang und dem Moment des Stellmotors als Ausgang bzw. dem Moment des Stellmotors als Eingang und der Differenz der Drehzahlen des Rotors und der Eingangswelle des Getriebes als Ausgang	66
4.1	Die Momentenbeiwerte und die Beziehung zwischen dem Pitch-Winkel und der Schnelllaufzahl beim Anlaufprozess	69
4.2	Rotormoment/Pitch-Winkel bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten, $\omega_R = 2.6 \text{ rad/sec}$	70
4.3	Rotormoment/Rotorgeschwindigkeit bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten	72
4.4	Antriebsmoment/Rotorgeschwindigkeit	72
4.5	Simulationsergebnis eines Modells mit starren Kupplungen (Momente)	74
4.6	Simulationsergebnis eines Modells mit starren Kupplungen (Drehzahlen und Beschleunigungen)	75
4.7	Simulationsergebnis eines Modells mit starren Kupplungen (Leistung)	76
4.8	Sprungantwort der WKA mit elastischer Kopplung im Teillastbereich	79

4.9	Leistung/Pitch-Winkel- und Moment/Pitch-Winkel-Kennlinien im Überlastbereich	82
4.10	Block-Diagramm des Regelungssystems für Leistungsbegrenzung .	84
4.11	Block-Diagramm des Regelungssystems mit dem Regler und luftdynamischem Modell	85
4.12	BODE-Diagramm (Eingang: Pitch-Winkel; Ausgang: Rotordrehzahl)	88
4.13	BODE-Diagramm der Übertragungsfunktionen der offenen Schleife und des geschlossenen Kreises	89
4.14	Sprungantwort des Regelungssystems für Leistungsbegrenzung . .	90
4.15	Kontur der Eigenschaft des Systems mit $k_I = 0$ deg/rad bei Anregung mit dem Wind	93
4.16	Kontur der Eigenschaft des Systems mit $k_I = 3$ deg/rad bei Anregung mit dem Wind	94
4.17	Kontur der Eigenschaft des Systems mit $k_I = 6$ deg/rad bei Anregung mit dem Wind	95
4.18	Kontur der Eigenschaft des Systems mit $k_I = 9$ deg/rad bei Anregung mit dem Wind	96
4.19	Simulationsergebnisse mit verschiedenen Reglern	98
5.1	Windgeschwindigkeit und inneres Moment der Hauptwelle ($\bar{v}_W = 8$ m/sec)	100
5.2	Wöhlerlinie für konstante Mittelspannung	102
5.3	Dynamische Belastung und ihre Normalverteilung	104
5.4	Zählbeispiel für das Klassendurchgangsverfahren	106
5.5	Windgeschwindigkeit und Leistung des Generators (bei $\bar{v}_W = 12$ m/s)	109
5.6	Die Verteilung der Generatorleistung	110
5.7	Die Generatorleistung in Zeitbereich	110
5.8	Dynamisches Verhalten des Systems mit A- und B-Strategie (Eingang: Änderung der Windgeschwindigkeit)	117

5.9	Simulierte Windgeschwindigkeiten mit verschiedenen durchschnittlichen Werten \bar{v}_W in Heroldstatt und Nordholz	119
5.10	Die Abweichungen der dynamischen Belastungen von den Mittelwerten bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 6 \text{ m/s}$ in Nordholz	120
5.11	Beschleunigungen bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 6 \text{ m/s}$ in Nordholz	122
5.12	Die Abweichungen der Leistungen von den Mittelwerten bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 6 \text{ m/s}$ in Nordholz	123
5.13	Die Standardabweichungen der Momente bei verschiedenen Regelstrategien	125
5.14	Standardabweichungen der Beschleunigungen bei verschiedenen Regelstrategien	126
5.15	Standardabweichungen der Leistungen bei verschiedenen Regelstrategien	128
5.16	Extremwerte der Leistungen bei verschiedenen Regelstrategien . .	129
6.1	Block-Diagramm des Systems	135
6.2	BODE-Diagramm der Übertragungsfunktionen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten (Eingang: Stellmoment; Ausgang: Differenz der Rotordrehzahl und der Drehzahl der Eingangswelle des Getriebes)	137
6.3	BODE-Diagramm	138
6.4	Schematisches Bild der Beziehung zwischen der Rotorgeschwindigkeit und dem Antriebsmoment bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten	139
6.5	BODE-Diagramm des Momentes der Hauptwelle und Generatorwelle	142
6.6	BODE-Diagramm des Stellmomentes und der Generatorleistung .	144

6.7	BODE-Diagramm des dynamischen Verhaltens bei Anregung durch die Turbulenz des Windes	145
6.8	Sprungantwort mit und ohne aktive Dämpfung	147
6.9	Simulierter Wind mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit $\bar{v}_W = 6 m/s$ in Nordholz	148
6.10	Die Abweichungen der dynamischen Belastungen von den Mittelwerten bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 6 m/sec$ in Nordholz	149
6.11	Beschleunigungen bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 6 m/sec$ in Nordholz	150
6.12	Leistung des Systems bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 6 m/sec$ in Nordholz	152
6.13	Die Abweichungen der dynamischen Belastungen von den Mittelwerten bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 10 m/sec$ in Heroldstatt	153
6.14	Beschleunigungen bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 10 m/sec$ in Heroldstatt	154
6.15	Leistung des Systems bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 10 m/s$ in Heroldstatt	156
6.16	Antwort des Systems bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 10 m/sec$ in Heroldstatt	157
6.17	Die Abweichungen der dynamischen Belastungen von den Mittelwerten bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 14 m/sec$ in Nordholz	159
6.18	Leistung des Systems bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 14 m/sec$ in Nordholz	160
6.19	Antwort des Systems bei Anregung mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von $\bar{v}_W = 14 m/sec$ in Nordholz	161
6.20	Standardabweichungen der Momente bei aktiver Dämpfung	163

6.21 Die Winde mit durchschnittlicher Windgeschwindigkeit $\bar{v}_W = 10 \text{ m/sec}$ in Heroldstatt und Nordholz	164
6.22 Standardabweichungen der Beschleunigungen bei aktiver Dämpfung	166
6.23 BODE-Diagramm des Systems, Ausgang: Rotordrehzahl ω_R	167
6.24 Die Standardabweichungen der Leistungen bei aktiver Dämpfung .	168
6.25 Die Extremwerte der Leistungen bei aktiver Dämpfung	169
6.26 Die Standardabweichungen der Pitch-Drehzahl, Pitch-Beschleunigung und Rotordrehzahl bei aktiver Dämpfung	171
6.27 BODE-Diagramm des Systems bei der verschiedenen Windgeschwin- digkeit im Überlastbereich	174

Tabellenverzeichnis

2.1	Die Parameter der drei Stufen des Getriebes	14
3.1	Die Eigenwerte des Systems mit den verschiedenen Torsionssteifigkeiten der Hauptwelle K_H	51
3.2	Die Eigenwerte des Systems mit den verschiedenen Dämpfungen der Hauptwelle D_H	58
3.3	Die Eigenwerte des Systems mit den verschiedenen Torsionssteifigkeiten der Generatorwelle K_G	60
3.4	Die Eigenwerte des Systems mit den verschiedenen Dämpfungen der Generatorwelle D_G	61
3.5	Die Eigenwerte des Systems mit den verschiedenen Torsionssteifigkeiten der Stellmotorwelle K_S	64
3.6	Die Eigenwerte des Systems mit den verschiedenen Dämpfungen der Stellmotorwelle D_S	65
4.1	Minimalwerte von ADC	92
4.2	Parameter des Reglers	97
5.1	Die Eigenwerte des Systems mit A- und B-Strategie	116
5.2	Die von der Windkraftanlage erzeugte Energie in Heroldstatt . . .	130
5.3	Die von der Windkraftanlage erzeugte Energie in Nordholz	130

6.1	Die Eigenwerte des Systems mit und ohne aktiver Dämpfung und B-Strategie	141
6.2	Die von der Windkraftanlage erzeugte Energie in Heroldstatt . . .	173
6.3	Die von der Windkraftanlage erzeugte Energie in Nordholz	173