

Dipl.-Ing. Knud Rehfeldt, Varel

Untersuchungen zur Modell- bildung von Windkraftan- lagen mit hydrostatischem Triebstrang und deren Regelung auf der Basis der Fuzzy-Logik

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Nr. **538**

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Grundlagen von Windkraftanlagen	4
2.1 Physikalische Grundlagen	4
2.1.1 Impulstheorie nach Betz	5
2.1.2 Beschaffenheit der Windströmung	7
2.1.3 Kräfte am Windrotor	9
2.2 Energiebilanz am Windrotor	11
2.2.1 Profilverluste	11
2.2.2 Drallverluste	12
2.2.3 Tip-Verluste	13
2.2.4 Die c_p - λ -Kurve	15
2.3 Verfahren zur Nutzung der Windenergie	16
2.3.1 Drehzahlstarre Systeme	17
2.3.2 Drehzahlvariable Systeme	19
2.3.3 Möglichkeiten der Blattwinkelverstellung	23
3 Windkraftanlagen mit hydrostatischem Triebstrang	25
3.1 Modellbildung der Regelstrecke des Primärregelkreises	27
3.1.1 Aerodynamisches und mechanisches Verhalten	29
3.1.2 Übertragungsverhalten von Rohrleitungen	32
3.1.3 Hydraulische Primäreinheit	35
3.2 Modellbildung der Regelstrecke des Sekundärregelkreises	41
3.2.1 Hydraulikspeicher	41
3.2.2 Hydraulische Sekundäreinheit	53
3.3 Mathematische Beschreibung des Synchrongenerators	55
4 Fuzzy-Logik als Regelungskonzept	67
4.1 Grundlagen der Fuzzy-Logik	67
4.2 Regelungskonzept nach Mamdani	71
4.2.1 Fuzzyfizierung	73
4.2.2 Regelbasis	75
4.2.3 Fuzzy-Inferenz	76
4.2.4 Defuzzyfizierung	79
4.3 Funktionale Beschreibung von Fuzzy-Regelalgorithmen	81
4.3.1 Fuzzy-Regler mit zwei Eingangsgrößen	82
4.3.2 Fuzzy-Regler mit drei Eingangsgrößen	87
4.3.3 Anwendungsbeispiel	91
4.4 Vergleich mit konventionellen Reglern	94
4.4.1 Fuzzy-PD-Regler	95
4.4.2 Fuzzy-PD-Regler mit nachgeschaltetem Integrator	97
4.4.3 Zusammenfassende Betrachtung zu Fuzzy-Reglern	100
5 Regelung von Windkraftanlagen mit hydrostatischem Triebstrang	103
5.1 Regelung des Primärregelkreises auf konstante Schnellaufzahl	104
5.1.1 Linearisierung	106
5.1.2 PI-Zustandsregelung	107
5.1.3 PD-Regelung	110
5.1.4 Fuzzy-Regelung mit zwei Reglereingangsgrößen	111
5.1.5 Vergleich der Regelungskonzepte	113
5.1.5.1 Parametereinstellungen	113

5.1.5.2 Regelgüte	116
5.1.5.3 Robustheit	117
5.1.6 Adaptive Fuzzy-Regelung zur Reduzierung dynamischer Belastungen	118
5.1.6.1 Adaption der Zugehörigkeitsfunktionen	121
5.1.6.2 Adaption der Regelbasis	122
5.1.6.3 Vergleich der Adaptionsverfahren mittels Simulation	124
5.2 Verfahren der Momentensteuerung mit unterlagertem Regelkreis	126
5.3 Regelung des Sekundärregelkreises	132
5.3.1 Konventionelle PD-Regelung	134
5.3.2 Fuzzy-Regelung	136
5.3.3 Verfahren zur Glättung der Leistungsabgabe	139
5.3.3.1 Betrieb des Hydraulikspeichers als Kurzzeitergiespeicher	139
5.3.3.2 Einfluß der Speichergröße auf die Glättung der Leistungsabgabe	142
6 Erprobung und Vergleich der Ergebnisse mit realen Windkraftanlagen	144
6.1 Einsatz einer Fuzzy-Regelung im Feldversuch	144
6.2 Vergleich der Simulationsergebnisse mit einer realen Windkraftanlage	150
7 Zusammenfassung	154
8 Anhang	157
9 Literaturverzeichnis	174