

Dipl.-Ing. Martin Könemund, Nürnberg

**Regelung und optimale  
Leistungsverteilung  
in einem elektrisch  
gekoppelten,  
windgetriebenen  
Mehrumpensystem**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik Nr. **699**

# Inhalt

---

	<b>Inhalt</b>	<b>V</b>
	<b>Symbole</b>	<b>IX</b>
	<b>Überblick - Abstract - Résumé</b>	<b>XV</b>
<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Systemeigenschaften	4
1.1.1	Elektrische Leistungsübertragung	4
1.1.2	Drehzahlvariabler Betrieb und Frequenzentkopplung	4
1.1.3	Netzunabhängigkeit und einfache Realisierung	5
1.1.4	Pumpen und Windturbine	5
1.2	Stand der Technik und Themenabgrenzung	5
1.3	Gliederung der Arbeit	7
<b>2</b>	<b>Modellbildung der Strömungsmaschinen und Windverhältnisse</b>	<b>9</b>
2.1	Strömungsmaschinen	9
2.1.1	Pumpenmodell	10
2.1.2	Modell der Rohranlage	11
2.1.3	Betriebsbereiche der Kreiselpumpen	16
2.1.4	Windturbine	17
2.2	Sollwertgenerator	21
2.3	Windmodelle	23
2.3.1	Statistische Jahreswindverteilung	23
2.3.2	Pseudostochastische Windverläufe	25
<b>3</b>	<b>Diskussion der möglichen Lösungen für elektrische Wind-Pumpensysteme</b>	<b>26</b>
3.1	Elektronisch getaktete Läufer-Widerstände	26

<b>Inhalt</b>		
3.2	Frequenzumrichter	27
3.2.1	Umrichter mit Drehstromübertragung	27
3.2.2	Gleichstromübertragung	29
3.2.3	Doppelt gespeiste Maschine, untersynchrone Stromrichtererkaskade	30
<b>4</b>	<b>Modellbildung und Regelung der elektrischen Maschinen</b>	<b>32</b>
4.1	Motivation der Modellierung	32
4.2	Maschinenmodelle	33
4.3	Läuferstromregelung	35
4.4	Generatormodell	37
4.5	Spannungsregelung	38
4.6	Integrative Kopplung	39
4.7	Echtzeitsimulation und Labornachbildung	42
4.7.1	Skalierung	43
4.7.2	Momentenregelung	44
<b>5</b>	<b>Regelung mit elektronisch getakteten Widerständen</b>	<b>45</b>
5.1	Leistungsübertragung der „elektrischen Welle“	45
5.2	Dimensionierung	46
5.2.1	Widerstandswerte	48
5.2.2	Frequenzregelung	50
5.2.3	Leistungsanforderungen	51
5.2.4	Elektrische Eigenschaften	51
5.3	Reglerstruktur	55
5.3.1	Systemdynamik - Rückwirkung der Läuferwiderstandserhöhung	55
5.3.2	Motorstromregelung	57
5.3.3	Drehzahlregelung	59
5.4	Laborerprobung	60
5.4.1	Wirkungsgradbetrachtungen	60
5.4.2	Stochastische Windgeschwindigkeitsanregung	62
<b>6</b>	<b>Regelung mit Frequenzumrichtern</b>	<b>63</b>
6.1	Reglerstrukturen	63
6.2	Frequenzgangsauslegung	64
6.2.1	Modellbildung der Regelstrecken	64
6.2.2	Auslegung an der Laboranlage	66
6.3	Laborerprobung	68
6.3.1	Wirkungsgradbetrachtungen	68
6.3.2	Dynamik bei stochastischen Windanregungen	70

<b>7</b>	<b>Maximierung der Fördermenge</b>	<b>71</b>
7.1	Formulierung	72
7.1.1	Nebenbedingungen	72
7.1.2	Zielfunktion	73
7.2	Fördermengenfläche	74
7.3	Jahresenergiebetrachtungen	75
7.3.1	Leistungsaufteilung nach $\partial Q/\partial P$	76
7.3.2	Zielfunktion und Nebenbedingung	76
7.3.3	Kriterien für die Pumpenauswahl	78
7.3.4	Standortbedingung Windgeschwindigkeit - Turbinenleistung	80
7.3.5	Generatorleistung - Maschinenaufteilung	80
7.3.6	Einzelpumpenbetrieb - Parallelbetrieb	81
7.3.7	Hydraulische Leistung	82
7.3.8	Hydraulische Jahresarbeit	82
7.3.9	Pumpenlast bei geringer Förderhöhe	83
7.4	On-Line Maximierung durch Kennfeldinterpolation	84
7.4.1	Interpolation	84
7.4.2	Methodik und Begriffe	86
7.4.3	Klassifikation	86
7.4.4	Schätzung der Förderhöhe	88
7.4.5	Regression	88
7.4.6	Eindimensionale-Regression und Interpolation der Stützstellen	90
7.4.7	Korrelation	90
7.4.8	Iteration zur Bestimmung der Leistungssollwerte	91
7.4.9	Echtzeit vs. Hintergrundberechnungen	93
7.5	Erprobung der Algorithmen	93
7.5.1	Signalverarbeitung	94
7.5.2	Schwellwerte	96
7.5.3	On-Line Optimierung	97
<b>8</b>	<b>Betriebsführung</b>	<b>106</b>
8.1	Einleitung	106
8.1.1	Begriffe	106
8.1.2	Methodik	107
8.1.3	Implementierung	107
8.1.4	Aufgaben der Betriebsführung und Abgrenzung von der Regelung	108
8.2	Entwicklungswerkzeuge	111
8.2.1	Modellnotation - Strukturierte Analyse	112
8.2.2	Modellnotation - Real-Time Erweiterung	112
8.3	Erprobung in numerischer Simulation	114
8.3.1	Anfahrvorgänge bei Schwachwind	115

<b>Inhalt</b>		
8.3.2	Wind-Stufengrenzen und Priorität der Schalthandlungen	117
8.3.3	Abfahrvorgänge bei Schwachwind	118
8.4	Erprobung in Laborversuchen	121
8.4.1	Anfahren bei Schwachwind	122
8.4.2	Abschalten bei Schwachwind	123
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>126</b>
	<b>Anhang</b>	<b>129</b>
A.1	Windturbinen	129
A.2	Labormaschinen	130
A.3	Pumpenkennlinien	132
A.4	Zeitkonstanten	136
A.5	Übertragungsfunktionen	138
A.6	Korrelationsverfahren	139
A.7	Zusammenfassung der Modelle	141
A.8	Allgemeine Herleitung der dynamischen Anlagenkennlinie	144
	<b>Literatur</b>	<b>146</b>
	<b>Index</b>	<b>149</b>