

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation .....	1
1.2 Forschungsfragen .....	3
1.3 Zielstellung.....	4
1.4 Aufbau der Arbeit .....	5
<b>2 Differential-algebraische Gleichungssysteme .....</b>	<b>7</b>
2.1 Klassifizierung von DAE .....	7
2.1.1 Indexbegriffe von DAE und damit verbundene Struktureigenschaften.....	9
2.2 Numerische Lösung .....	14
2.2.1 Überführung der DAE in ein System von ODE .....	14
2.2.2 Simulation von DAE.....	15
2.2.3 Reformulierung der DAE.....	17
2.2.4 Stabilisierungsmethoden für DAE.....	18
2.2.5 Weitere Verfahren zur Indexreduzierung von DAE .....	19
2.2.6 Konsistente Berechnung von Anfangswerten.....	20
<b>3 Aufbau und Klassifizierung von Netzgleichungssystemen .....</b>	<b>23</b>
3.1 Grundlagen zur Beschreibung elektrischer Netze.....	23
3.1.1 Netzwerkelemente .....	23
3.1.2 Grundlagen zur Graphen- und Netzwerktheorie.....	25
3.1.3 Limitationen.....	27
3.2 Knotenorientierte Verfahren für die Berechnung von Ausgleichsvorgängen.....	28
3.2.1 Knotentableauanalyse .....	29
3.2.2 Erweiterte Knotenpotentialanalyse .....	30
3.2.3 Modifiziertes Knotenpotentialverfahren mit Netzwerkelementen.....	31
3.2.4 Modifiziertes Knotenpotentialverfahren mit LCR-Betriebsmitteln.....	32
3.2.5 Erweitertes Knotenpunktverfahren .....	34
3.3 Klassifizierung knotenorientierter Verfahren.....	37
3.3.1 Klassifizierung für knotenorientierte Verfahren der Schaltungssimulation .....	37
3.3.2 Klassifizierung des Erweiterten Knotenpunktverfahrens .....	40
3.3.3 Numerische Lösung der DAE des EKPV .....	42
3.4 Zusammenfassung.....	44
<b>4 Koordinatentransformationen, Komponentensysteme und Zweitor-Theorie .....</b>	<b>47</b>
4.1 Koordinatentransformationen für Dreiphasensysteme.....	47
4.2 Auswahlkriterien für Komponentensysteme .....	50
4.3 Netzwerktheoretische Analyse für die Wahl des Komponentensystems .....	52
4.4 Numerische Aspekte bei der Wahl von Komponentensystemen mit komplexen Variablen .....	54

<b>5 Erweitertes Knotenpunktverfahren.....</b>	<b>57</b>
5.1 Betriebsmittelgleichungen im EKPV .....	57
5.1.1 Induktive Betriebsmittel .....	58
5.1.2 Kapazitive Betriebsmittel .....	65
5.1.3 Resistive Betriebsmittel .....	67
5.1.4 Zusammenfassung der Betriebsmittelgleichungen der LCR-Betriebsmitteltypen.....	70
5.2 Knotenpunktsätze und modifizierte Knotenpunktsätze .....	73
5.3 Aufbau des differential-algebraischen Gleichungssystems des EKPV .....	73
5.3.1 Aufbau der DAE in der quasilinearen Darstellung der Betriebsmittelgleichungen .....	73
5.3.2 Aufbau der DAE in der allgemeinen Darstellung der Betriebsmittelgleichungen .....	75
5.4 Analyse der DAE des EKPV mit Betriebsmitteln in unterschiedlichen Komponentensystemen .....	77
<b>6 Einfluss von Betriebsmittelmodellentartungen auf die DAE .....</b>	<b>81</b>
6.1 Induktive Betriebsmittel vom Typ A .....	81
6.1.1 Starre Sternpunktterdung .....	83
6.1.2 Niederohmige Sternpunktterdung.....	84
6.1.3 Freie Sternpunktterdung.....	85
6.1.4 Dreieckschaltung .....	91
6.1.5 Leitungsmodell ohne Querglieder vom Typ A .....	92
6.2 Induktives Betriebsmittel vom Typ AB .....	93
6.2.1 Leitungsmodell ohne Querglieder vom Typ AB .....	94
6.2.2 Dreiphasen-Zweswicklungstransformator.....	98
6.3 Klassifizierung der DAE des EKPV mit degenerierten Betriebsmitteln.....	100
<b>7 Fehlernachbildung in unterschiedlichen Komponentensystemen .....</b>	<b>103</b>
7.1 Fehlerbedingungen und Fehlermatrizen.....	103
7.1.1 Querfehlernachbildung an induktiven Knoten.....	105
7.1.2 Längsfehlernachbildung an induktiven Betriebsmitteln .....	109
7.2 Weiterführende Bemerkungen zum Fehlermatrizenverfahren.....	112
<b>8 Modulare Stabilisierung und Regularisierung der DAE des EKPV .....</b>	<b>115</b>
8.1 Stabilisierung induktiver Knoten .....	115
8.2 Regularisierung .....	116
8.2.1 Regularisierung von induktiven Betriebsmitteln mit strukturellen Defekten.....	117
8.2.2 Regularisierung von längsfehlerbehafteten induktiven Betriebsmitteln.....	119
8.3 Rückführung der Lösungstrajektorie aufgrund von Redundanz zwischen komplexen Variablen .....	120
8.4 Auswirkungen auf die Klassifizierung der DAE .....	121
<b>9 Simulation differential-algebraischer Netzgleichungssysteme .....</b>	<b>123</b>
9.1 Löser für DAE und Simulationsablauf.....	123

9.2	Beispielnetz und Eigenwerteanalyse .....	126
9.3	Simulationen .....	128
9.3.1	Vergleich zwischen den Lösungen der Zustandsform und der DAE .....	129
9.3.2	Stabilisierung .....	138
9.3.3	Regularisierung .....	143
9.3.4	Rückführung der Lösungstrajektorie auf die Mannigfaltigkeit .....	153
9.4	Vergleich und Analyse .....	156
9.4.1	Stabilisierung und Vergleich der Lösungsverfahren .....	157
9.4.2	Regularisierung .....	159
9.4.3	Rückführung der Lösungstrajektorie aufgrund von Redundanz zwischen den komplexen Variablen .....	161
9.4.4	Zusammenfassung .....	163
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>165</b>
<b>A.</b>	<b>Ergänzende Dokumentation zu den Anwendungsbeispielen .....</b>	<b>169</b>
A.1.	Parameterdatensätze .....	169
A.2.	Anfangswerte .....	171
A.3.	Optionen der Löser und Dämpfungsfaktoren .....	173
A.4.	Eigenwerte der Beispielnetzvarianten .....	174
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>175</b>	