

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel und Gliederung der Arbeit.....	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Grundlagen zur Systemführung im Übertragungsnetz.....	5
2.1.1 Aufbau und Funktion des Übertragungsnetzes	5
2.1.2 Aufgaben der Systemführung.....	6
2.1.3 Netzsicherheitsrechnung	8
2.2 Stabilität in Übertragungsnetzen.....	12
2.2.1 Klassifizierung der Stabilitätsarten.....	12
2.2.2 Polradwinkelstabilität	12
2.2.3 Frequenzstabilität.....	13
2.2.4 Spannungsstabilität	13
2.3 Verfahren zur Untersuchung der Spannungsstabilität.....	16
2.3.1 Einordnung der verschiedenen Verfahren.....	16
2.3.2 Arbeitspunktbasierende Verfahren	18
2.3.2.1 Berechnung von Indizes auf Basis des Spannungsabfalls	18
2.3.2.2 Berechnung von Indizes auf Basis von Sensitivitäten.....	19
2.3.2.3 Berechnung eines Indexes auf Basis der MW/MVar Verluste ..	20
2.3.3 Auslenkungsbasierende Verfahren	21
2.3.3.1 Leistungsflussbasierte P/V-Analyse.....	21
2.3.3.2 Leistungsflussbasierte Q/V-Analyse	22
2.3.3.3 Continuation Power Flow	23
2.3.3.4 Einsatz von Optimierungsverfahren.....	24
2.4 Anforderungen an ein Werkzeug zur Überwachung des Systemzustandes	25
3 Erweiterung der Netzsicherheitsrechnung um ein Verfahren zur Bestimmung der Wirkleistungsmargen im Übertragungsnetz	27
3.1 Motivation zur Bestimmung der Wirkleistungsmargen	27
3.2 Definition eines Systemzustandsmodells	28
3.3 Modellierung relevanter Systemkomponenten	32
3.3.1 Netzelemente	32
3.3.2 Benachbarte Netze	33
3.3.3 Unterlagerte Netze	33
3.3.4 Konventionelle Erzeugungseinheiten	35
3.3.5 Erneuerbare Erzeugungseinheiten	38
3.3.6 Nachbildung des Schutzkonzeptes	38

3.4	Bestimmung von Wirkleistungsmargen mit der P/V-Analyse.....	39
3.4.1	Funktionsweise der P/V-Analyse.....	39
3.4.2	Prinzipieller Ablauf des Verfahrens	40
3.5	Bildung von Regionen	41
3.6	Modellierung eines Leistungsaustauschs.....	42
3.6.1	Das Prinzip des Leistungsaustauschs	42
3.6.2	Varianten der P/V-Analyse	44
3.6.3	Simulation eines ungerichteten Leistungsaustauschs.....	45
3.6.4	Simulation eines gerichteten Leistungsaustauschs	47
3.7	Präsentation der Ergebnisse	48
3.8	Reduktion des Rechenaufwandes	52
3.8.1	Notwendigkeit	52
3.8.2	Identifizierung von Optionen.....	53
3.8.3	Beschreibung der Optionen	53
3.8.3.1	Elimination von nicht benötigten Rechnungen	53
3.8.3.2	Reduktion von Ausfallsituationen durch Vorauswahl	56
3.8.3.3	Reduktion der Anzahl untersuchter Regionen.....	58
3.8.3.4	Wahl der Abbruchkriterien.....	58
3.8.3.5	Wahl der Schrittweite.....	59
3.8.3.6	Parallelisierung	59
3.8.3.7	Optimierte Implementierung	60
4	Simulationsrechnungen mit der P/V-Analyse	67
4.1	Verifikation der P/V-Analyse als Werkzeug zur Ermittlung von Wirkleistungsmargen	67
4.1.1	Vorgehensweise und Beschreibung des verwendeten Netzmodells	67
4.1.2	Event-Graph der Ergebnisse	68
4.1.3	Detaillierte Auswertung.....	69
4.1.3.1	Szenario 1	69
4.1.3.2	Szenario 2	71
4.1.3.3	Szenario 3	73
4.1.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse	75
4.2	Anwendung der P/V-Analyse auf ein großes Netzmodell.....	75
4.2.1	Beschreibung des verwendeten Netzmodells	75
4.2.2	Simulation eines ungerichteten Leistungsaustauschs.....	77
4.2.2.1	Übersicht über die Ergebnisse	77
4.2.2.2	Ergebnisse der Simulation eines Wirkleistungsimports der Region 15	78
4.2.2.3	Ergebnisse der Simulation eines Wirkleistungsexports der Region 3	80

4.2.2.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse der Simulation.....	82
4.2.3	Simulation eines gerichteten Leistungsaustauschs	83
4.2.3.1	Übersicht über die Ergebnisse für Region 3	83
4.2.3.2	Betrachtung des Leistungsaustauschs von Region 3 nach Region 17.....	85
4.2.3.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse	87
4.2.4	Variation der Schrittweite	88
4.3	Untersuchung einer gleichzeitigen Veränderung mehrerer Regionen	89
4.3.1	Ziel der Untersuchung und Eingangshypothese	89
4.3.2	Vorgehensweise.....	90
4.3.3	Ergebnisse der Untersuchungen an Region 1	90
4.3.4	Ergebnisse der Untersuchungen an Region 3.....	92
4.3.5	Ergebnisse der Untersuchungen an Region 17.....	94
4.3.6	Fazit der Untersuchung	95
5	Diskussion der Ergebnisse	97
5.1	Erfüllung der Anforderungen	97
5.2	Rechenzeit der P/V-Analyse.....	98
5.3	Vergleich zwischen ungerichtetem und gerichtetem Leistungsaustausch	99
5.4	Räumliche Korrelation des Prognosefehlers der Erzeugung aus EE	100
5.5	Größe der gebildeten Regionen	101
6	Zusammenfassung	103
7	Ausblick	107
8	Literaturverzeichnis	109
9	Abbildungsverzeichnis	119
10	Tabellenverzeichnis	122
11	Liste der Formelzeichen und Indizes	123
11.1	Formelzeichen.....	123
11.2	Indizes	124
12	Abkürzungsverzeichnis	125
13	Anhang	127
13.1	Details zum Netzmodell für die Verifikation der P/V-Analyse.....	127
13.2	Simulationsergebnisse der gleichzeitigen Veränderung mehrerer Regionen	128