

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Kurzzusammenfassung	v
Abstract	ix
1 Hintergrund, Motivation und Ansatz	1
2 Integrität des elektrischen Energieversorgungssystems	7
2.1 Physikalische Natur der Gleichgewichtszustände	7
2.1.1 Das System als kausaler Energiespeicherzusammenschluss .	8
2.1.2 Kausale Wechselwirkungsketten	12
2.1.3 Stabilitätseigenschaften von Gleichgewichtspunkten	20
2.1.4 Das Grundprinzip der Spannungsstabilität	37
2.2 Kausales Gefüge des Systemzusammenbruchs	42
2.2.1 Systemzustände	43
2.2.2 Zusammenbruchsmechanismen	45
2.2.3 Kausale Kopplung der Zusammenbruchsmechanismen . . .	56
2.3 Auswirkungen des Systemzusammenbruchs	59
2.4 Rekapitulation der stabilitätsorientierten Systembetrachtung	60
3 Theorie des Netzwiederaufbaus	63
3.1 Planungsphase	64
3.1.1 Zustandsanalyse	65
3.1.2 Strategie Werkzeugkasten	73
3.2 Umsetzungsphase	93
3.2.1 Strategische Ausrichtung und Ziele	94
3.2.2 Handlungsoptionen	99
3.3 Zusammenfassung der Netzwiederaufbaustruktur	137
4 Exemplarische Umsetzung des Netzwiederaufbaus	139

4.1	Netzwiederaufbau Simulator	139
4.1.1	Topologie des Simulationsmodells	141
4.1.2	Kraftwerkspark	148
4.1.3	DEA-Parks	156
4.1.4	Modellierung der Mittelspannungsabgänge	163
4.1.5	Schutzkonzept des Netzwiederaufbausimulators	166
4.2	Durchführung des Netzwiederaufbaus	169
4.2.1	Der Weg zu Meilenstein A	172
4.2.2	Der Weg zu Meilenstein B	184
4.2.3	Der Weg zu Meilenstein C	195
4.2.4	Der Weg zu Meilenstein D	210
4.2.5	Der Weg zu Meilenstein E	221
4.2.6	Der Weg zu Meilenstein F	234
4.2.7	Der Weg zu Meilenstein G	250
4.3	Reflektierende Betrachtung der Netzwiederaufbauumsetzung	269
5	Schutzsystemanalyse während des Netzwiederaufbaus	271
5.1	PSA Systeme in der Praxis	272
5.2	Struktur von PowerPSA	273
5.3	Datengewinnung	278
5.4	Datenanalyse	284
5.4.1	Generierung von Topologiegraphiken	284
5.4.2	Ortsspezifische Ergebnisaggregation	289
5.4.3	Fallspezifische Ergebnisaggregation	293
5.5	Exemplarische Anwendung auf den NWA-Simulator	296
5.5.1	Fälle des Wiedezusammenbruchs aufklären	298
5.5.2	Prüfung der automatisierten Distanzschutzstaffelung	309
5.5.3	Detailrekonstruktion durch Nachsimulation	311
5.6	Funktionszusammenfassung von PowerPSA	316
6	Proaktiver Überlastschutz	319
6.1	Grundfunktion der Verhinderung überlastbedingter Ausfallkaskaden	319
6.1.1	Abgrenzung gegenüber reaktiven Überlastschutzsystemen . .	320
6.1.2	Wirkungsweise des POPS Verfahrens	320
6.1.3	Prüfung der POPS-Funktion auf negative Auswirkungen . .	334
6.2	Zusatzfunktion zur Dämpfung elektromechanischer Ausgleichsvorgänge	351
6.2.1	Analytische Betrachtung des Systemenergieentzugs durch PSS-Elemente	351
6.2.2	Regelstrategie einer PSS-Funktion anhand von TCSR-Elementen	357

6.2.3	Stabilisierung der PSS-Regelung	362
6.2.4	Erprobung der PSS-Funktion am Simulationsbeispiel	371
6.3	Rekapitulation der Wirkungsweise des Proaktiven Überlastschutzes inklusive seiner PSS-Funktion	377
7	Sympathetic-Transformer-Inrush-Erkennung	379
7.1	Hintergrund des STI-Phänomens	380
7.1.1	Verständnisbasis anhand der TI-Betrachtung	381
7.1.2	Weiterentwicklung der TI-Betrachtung zum STI-Mechanismus	389
7.2	Ansatz zur Erkennung des STI	394
7.2.1	Unterscheidungsmerkmale zwischen Kurzschluss und STI	396
7.2.2	STI-Erkennungsverfahren anhand dreier Unterscheidungs- merkmale	398
7.2.3	Auswertungslogik der Erkennungsalgorithmen	407
7.3	Anwendung des STI-Erkennungsansatzes	410
7.3.1	Anwendungsbeispiel 1: STI-Simulation mit PowerFactory	410
7.3.2	Anwendungsbeispiel 2: TI-Ereignis im Feldversuch	411
7.3.3	Anwendungsbeispiel 3: Kurzschlussereignis im Laborversuch	421
7.4	Zusammenfassung der Entstehung und Detektion von STI-Ereignissen	423
8	Grid-Forming Orbitalraumregelung	425
8.1	Forschungsstand der netzbildenden Umrichterregelung	425
8.2	Einleitender Vergleich und Szenarienübersicht	427
8.2.1	Unterschiede zwischen Synchronmaschine und VSC	427
8.2.2	Netzwiederaufbauprozess mit netzbildenden VSC	430
8.3	Aufbau und Funktionsweise der Konverterstationen	432
8.3.1	Hardwarekonfiguration des MMC	433
8.3.2	Signalverarbeitungsframework der MMC-Regelung	434
8.3.3	Submodulansteuerung durch den Modulator	437
8.4	Grid-Forming und Grundprinzip der Orbitalraumregelung	439
8.4.1	Unterschiede zwischen Grid-Feeding und Grid-Forming	439
8.4.2	Wirkungsweise der Orbitalraumregelung	441
8.4.3	Struktur der Orbitalraumregelung	447
8.5	Kausale Bewegungsmechanismen des Punktes G	452
8.5.1	Ursache 1: Kurzschlussereignisse	452
8.5.2	Ursache 2: Elektromechanische Ausgleichsvorgänge	470
8.5.3	Ursache 3: Last- bzw. DEA-bedingte Überstromsituation	492
8.6	Ausblick auf komplexere Szenarien	496
8.6.1	Verhaltensweise der Orbitalraumregelung angesichts eines Außertrittfalls von Synchronmaschinen	496

8.6.2	Wiedervereinigung asynchroner Gruppen im laufenden Betrieb	511
8.6.3	Ausbau des DC-Systems zur Multiterminal HGÜ-Anlage . .	520
8.6.4	Abschließender Vergleich zwischen Synchronmaschine und VSC	524
8.7	Funktionsweise der Orbitalraumregelung im kompakten Überblick	528
9	Rekapitulation und Ausblick	531
A	Detaillierte sektorenbezogene Auswirkungen des Systemzusammenbruchs	537
A.1	Auswirkungen auf den IKT-Sektor	537
A.1.1	Bürgerkommunikation	537
A.1.2	Bürgerinformation	539
A.1.3	Regierungs- und Einsatzkräftekommunikation	540
A.2	Auswirkungen auf den Verkehrssektor	540
A.2.1	Straßenverkehr	541
A.2.2	Schienenverkehr	543
A.2.3	Luftverkehr	544
A.2.4	Schiffsverkehr	545
A.3	Auswirkungen auf die Wasserver- und Abwasserentsorgung	545
A.3.1	Wasserversorgung	546
A.3.2	Abwasserentsorgung	547
A.4	Auswirkungen auf die Lebensmittelversorgung	548
A.4.1	Landwirtschaft	548
A.4.2	Lebensmittelhandel	550
A.5	Auswirkungen auf das Gesundheitswesen	550
A.5.1	Nachfrage nach medizinischen Dienstleistungen	552
A.5.2	Krankenhäuser	552
A.5.3	Weitere medizinische Einrichtungen	553
A.5.4	Pharmazeutische Produktion und Großhandel	554
A.6	Auswirkungen auf das Finanzsystem	555
A.6.1	Bankdienstleistungen	555
A.6.2	Zahlungssysteme	557
A.6.3	Börsenhandel	557
	Literaturverzeichnis	559