

# Inhaltsverzeichnis

Geleitwort.....	V
Vorwort.....	VII
<b>1</b>	<b>Vision und Strategie für die elektrischen Netze der Zukunft ..... 1</b>
1.1	Die Treiber der Umgestaltung der elektrischen Netze..... 1
1.2	Grundlagen und Kernelemente des europäischen Smart-Grid-Konzepts ..... 5
1.3	Ambitionierte Energiewendeziele und die Konsequenzen für die elektrischen Netze..... 11
1.4	Literatur..... 16
<b>2</b>	<b>Smarte Erzeugung von elektrischer Energie – Ressourcen und Potenziale..... 17</b>
2.1	Neue Trends und Anforderungen an die elektrische Energieerzeugung..... 17
2.2	Wetterabhängig schwankende Elektroenergieerzeugung aus Wind und Sonne ..... 20
2.2.1	Windenergieanlagen ..... 20
2.2.2	Nutzung der Sonnenenergie für die Elektroenergieerzeugung ..... 26
2.3	Kraft-Wärmekopplung (KWK) auf Basis erneuerbarer Energien ..... 32
2.3.1	Kraftwerke auf Basis biogener Brennstoffe..... 33
2.3.2	Geothermische Heizkraftwerke ..... 35
2.3.3	Brennstoffzellen ..... 37
2.4	Speichermöglichkeiten für Elektroenergie..... 40
2.4.1	Technologien und Einsatzbereiche..... 40
2.4.2	Hochleistungs-Langzeitspeicher ..... 41
2.4.2.1	Pumpspeicherwerke ..... 41
2.4.2.2	Druckluftspeicherkraftwerke ..... 43
2.4.3	Stationäre Akkumulator-Batterien..... 45
2.4.4	„Elektroenergie zu Gas“ mittels Elektrolyse ..... 48
2.4.5	Thermische Speicherung von Energie und optimierter KWK-Betrieb ..... 50
2.5	Erweiterte Flexibilität der definiert steuerbaren Elektroenergieerzeugung ... 52
2.6	Literatur..... 55
<b>3</b>	<b>Moderne Technik und die Smart-Grid-Anforderungen im Übertragungsnetz..... 59</b>
3.1	Umspannwerke – die Knoten des elektrischen Netzes ..... 59
3.1.1	Schaltungen und Betriebsmittel in der Hoch-, Höchst- und Ultrahochspannungsebene..... 60

3.1.2	Innovative Freiluft-Schaltanlagentechnik .....	65
3.1.3	Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) .....	68
3.2	Digitale Technologien zur Steuerung und Überwachung .....	70
3.2.1	Hierarchie der Informationserfassung und -verarbeitung für die Netzführung .....	70
3.2.2	Schutz- und Stationsleittechnik .....	73
3.2.2.1	Historische Entwicklung .....	73
3.2.2.2	„IED“-Technologie .....	76
3.2.2.3	Schutzsysteme in der Übertragungsebene .....	82
3.2.3	Netzleittechnik .....	91
3.3	Hochleistungsübertragungstechnik .....	96
3.3.1	Übersicht .....	96
3.3.2	Drehstromübertragung .....	98
3.3.3	Gleichstromübertragung .....	102
3.3.4	Flexible AC-Übertragung mittels Wirk- und Blindleistungssteuerung .....	107
3.4	Aktuelle Herausforderungen für die Übertragungsnetze .....	111
3.4.1	Einfluss der volatilen Einspeisung von Wind- und Photovoltaikanlagen ...	111
3.4.2	Auseinanderdriften von Erzeugung und Verbrauch .....	114
3.4.3	Einspeisung über Leistungselektronik und Einfluss auf die Kurzschlussleistung .....	116
3.5	Literatur .....	120
<b>4</b>	<b>Aufbau und Betrieb von Verteilungsnetzen und der Einfluss neuer Netznutzer .....</b>	<b>121</b>
4.1	Klassifizierung der Verteilungsnetze .....	121
4.2	Anlagen der Mittelspannungsebene: Primär- und Sekundärverteilung .....	122
4.3	Netzstrukturen in der Mittel- und Niederspannungsebene .....	128
4.4	Sternpunktterdungskonzepte .....	132
4.5	Schutzkonzepte in Verteilungsnetzen .....	142
4.5.1	Mittelspannungsnetze .....	142
4.5.2	Einspeisende Umspannwerke .....	149
4.5.3	Niederspannungsnetze .....	150
4.6	Betriebsführung in Verteilungsnetzen .....	151
4.6.1	Sicherung der Versorgungsqualität .....	151
4.6.2	Betriebsführung in Verteilungsnetzen .....	156
4.7	Aktuelle Trends in der Verteilungsebene .....	161
4.7.1	Verteilte Erzeugung und neue Verbrauchertypen .....	161
4.7.2	Einfluss auf die Versorgungsqualität .....	162
4.8	Literatur .....	164
<b>5</b>	<b>Smarte Betriebsführung und Beobachtbarkeit in Übertragungsnetzen...</b>	<b>165</b>
5.1	Ursachen und Vermeidbarkeit internationaler Großstörungen in elektrischen Netzen .....	166

5.1.1	Übersicht über große Systemstörungen und das Phänomen „Spannungskollaps“ .....	166
5.1.2	Blackout Nord-Ost USA/Kanada 2003 .....	169
5.1.3	Großstörung in London 2003 .....	171
5.1.4	Blackout in Schweden/Dänemark 2003 .....	172
5.1.5	Blackout in Italien 2003 .....	173
5.1.6	Netzzusammenbruch in Athen 2004 .....	175
5.1.7	Großstörung im Süden Moskaus 2005 .....	176
5.1.8	Großstörung in Deutschland und Kontinentaleuropa 2006 .....	177
5.2	Regelzonen und Systemdienste .....	180
5.2.1	System- und Betriebsführung .....	180
5.2.2	Frequenzhaltung .....	183
5.2.3	Spannungshaltung .....	185
5.2.4	Versorgungswiederaufbau .....	186
5.2.5	Erzeugungsfahrpläne und das Merit-Order-Prinzip .....	187
5.2.6	Systemdienstleistungen durch verteilte und erneuerbare Erzeuger .....	188
5.3	Systemüberwachung und intelligentes Engpassmanagement .....	193
5.3.1	Erfordernis für erweiterte Systemüberwachung .....	193
5.3.2	Bedeutung von Vorhersagemethoden für die sichere Betriebsführung .....	196
5.3.2.1	Grundprinzipien der Einspeisungsvorhersage von erneuerbarer Energie .....	196
5.3.2.2	Engpassvorhersage für den Folgetag im internationalen Verbund .....	199
5.3.2.3	Netzebenenübergreifende Engpassprognosen .....	200
5.3.2.4	Der zellulare Ansatz für Vorhersagen, Bilanzierung und Fahrplanmanagement .....	202
5.3.3	Moderne Schutzphilosophie .....	204
5.3.3.1	Schutzsicherheitsüberwachung .....	204
5.3.3.2	Adaptiver Schutz .....	207
5.3.3.3	Systemschutz .....	209
5.3.4	Weitbereichsüberwachung mit Phasormesseinrichtungen .....	211
5.3.5	Stationäre und dynamische Netzsicherheitsbewertung .....	216
5.3.6	Flexible Leitungsbelastung aufgrund der Wetterbeobachtung .....	222
5.3.7	Resümee .....	222
5.4	Literatur .....	223
6	Die drei Säulen von Smarter Verteilung – Smart Distribution .....	225
6.1	Die Wechselbeziehung von Smart Grid und Smart Market in der Verteilung .....	225
6.2	Säule 1: Automatisierung und Fernsteuerung im lokalen Verteilungsnetz .....	229
6.2.1	Spannungsregelung im Verteilungsnetz .....	229
6.2.1.1	Traditionelle Spannungsregelung und die Adaption für Smart Grids .....	229
6.2.1.2	Smarte Einbindung der Netznutzer in die Spannungsregelung .....	233
6.2.2	Möglichkeiten der Leistungsflusssteuerung .....	234
6.2.3	Beschleunigte Fehlerortung und Wiederversorgung nach Störungen .....	236
6.2.4	Erweiterte Schutzkonzepte .....	238
6.2.4.1	Die geänderten Anforderungen an die Schutzkonzepte [6–4] .....	238

6.2.4.2	Schutzsysteme mit verteilter Erzeugung .....	242
6.2.4.3	Phasormessung im Verteilungsnetz .....	245
6.2.5	Die Wirtschaftlichkeit von Smart-Grid-Ertüchtigung in Verteilungsnetzen .....	247
6.3	Säule 2: Flexibilität durch virtuelle Kraftwerke .....	250
6.3.1	Grundlagen virtueller Kraftwerke .....	250
6.3.2	Speicher und steuerbare Lasten – Demand Side Management .....	252
6.3.3	Nutzen virtueller Kraftwerke in einer perspektivischen Marktordnung .....	255
6.4	Säule 3: Smart Metering und Markteinbindung der Konsumenten .....	262
6.4.1	Grundlagen der digitalen Zählertechnik .....	262
6.4.2	Dynamische Tarife .....	264
6.4.3	Beeinflussung des Konsumentenverhaltens – Demand Side Response .....	267
6.4.4	Elektromobilität und Energiemanagement .....	273
6.5	Kommunikationsbedarf für Smart Distribution .....	277
6.6	Literatur .....	278
<b>7</b>	<b>Anforderungen an die künftige Marktordnung .....</b>	<b>281</b>
7.1	Perspektiven zur Marktordnung auf dem Elektroenergiesektor – Vision und Fallstudie .....	286
7.2	Innovative Dienstleistungen für Netzbetrieb und Markt .....	293
7.2.1	Smart Services im Überblick .....	293
7.2.2	Messdienstleistungen .....	294
7.2.3	Datenkommunikation und Informationsmanagement .....	296
7.3	Literatur .....	296
<b>8</b>	<b>Informations- und Kommunikationstechnologie als Rückgrat der Smart Grids .....</b>	<b>299</b>
8.1	Die Bedeutung von einheitlichen IKT-Standards für Smart Grids .....	299
8.1.1	Aufgaben von IKT-Standards .....	299
8.1.2	Kommunikationsstandards .....	300
8.1.3	Standards für das Datenmanagement .....	304
8.1.4	Informationssicherheit und Datenschutz .....	306
8.2	Entwicklung von Leittechnik und Kommunikation in elektrischen Netzen .....	307
8.2.1	Architekturentwicklung der Fernsteuerung von Umspannwerken .....	307
8.2.2	Einführung digitaler Kommunikationsprotokolle .....	311
8.3	Die durchgängige Anwendung des Kommunikationsstandards IEC 61850 .....	319
8.3.1	Referenzmodell und Struktur von IEC 61850 .....	319
8.3.2	Objektorientiertes Datenmodell .....	323
8.3.3	Drei Kommunikationsprotokolle auf einem Bus .....	329
8.3.4	Die Protokolldienste .....	331
8.3.5	Herstellerunabhängiges Engineering .....	335
8.3.6	Konformitäts- und Abnahmetests .....	338

8.3.7	Standarderweiterungen für Smart-Grid-Anwendungen .....	343
8.4	Datenmanagement auf Basis einheitlicher Datenmodelle „CIM“ nach IEC 61968/70 .....	345
8.5	Sicherheit der Kommunikation nach IEC/TS 62351 .....	350
8.6	Internationale Anstrengungen zur Schaffung einheitlicher Standards für Smart Grids .....	352
8.6.1	Das Referenzmodell IEC/TR 62357 .....	352
8.6.2	Das europäische Normungsmandat M/490 .....	353
8.6.3	Globale Aktivitätsanalyse im Rahmen der E-Energy-/Smart-Grid-Normungsroadmap .....	358
8.7	Literatur .....	365
9	<b>Smart Grids weltweit .....</b>	<b>369</b>
9.1	Smart Grids für die global größten Elektroenergiesysteme .....	369
9.1.1	Ambitionierte Entwicklungsstrategien in China .....	369
9.1.2	Ausbauziele für die Verbundnetze der USA .....	372
9.1.3	Ausbau der Verbundnetze Russlands und der umgebenden Länder .....	378
9.2	Übersicht zu den Smart-Grid-Aktivitäten in Europa .....	383
9.2.1	Projekte der 5. bis 8. Rahmenprogramme der Europäischen Union .....	384
9.2.2	Europäische Inventur nationaler Smart-Grid-Projekte .....	387
9.3	Ausgewählte Smart-Grid-Projekte in der Verteilungsebene .....	392
9.3.1	Web2Energy – die drei Säulen von Smart Distribution im Praxistest .....	392
9.3.2	RegMod Harz – Versorgung einer Region durch ein virtuelles Kraftwerk ...	396
9.3.3	DSR-Projekte in den USA .....	400
9.3.4	Das südkoreanische Smart-Grid-Versuchsfeld auf der Insel Jeju .....	403
9.4	Literatur .....	406
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>409</b>
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>414</b>
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>414</b>