

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Abkürzungen, Indizes und Formelzeichen</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Struktur und Methodik der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>9</b>
2.1 Einleitung . . . . .	9
2.2 Bedeutung der Netzimpedanz . . . . .	10
2.3 Klassifikation, Ursachen und Folgen verschiedener Netzzrückwirkungen . . . . .	14
2.4 Netzimpedanzmessverfahren . . . . .	16
2.5 Vereinfachte Impedanzbestimmung im Vierleitersystem . . . . .	20
2.6 Impedanzberechnung im Dreileitersystem . . . . .	22
2.7 Ausgewählte Normen und Richtlinien . . . . .	23
2.7.1 DIN EN 50160 . . . . .	24
2.7.2 BDEW-Richtlinie . . . . .	26
2.7.3 DIN EN 61000-2-2 und DIN EN 61000-2-12 . . . . .	28
2.8 Frequenzverlauf der Netzimpedanz . . . . .	29
2.8.1 Skin-Effekt . . . . .	31
2.8.2 Resonanzen in der Energieversorgung . . . . .	32
2.8.3 Freileitungen und Kabel . . . . .	34
2.8.4 Transformatoren . . . . .	36
2.8.5 Kompensationsanlagen . . . . .	37
<b>3 Modellbildung</b>	<b>39</b>
3.1 Bestimmung der Netzimpedanz durch Taktung einer ohmschen Last	40
3.2 Erweiterte Impedanzbestimmung im Vierleitersystem . . . . .	41
3.3 Impedanzbestimmung im Mittelspannungsnetz . . . . .	44
3.3.1 Verfahren mit virtuellem Sternpunkt . . . . .	44
3.3.2 Verfahren mit zyklischer Netzanregung . . . . .	44

3.3.3	Vergleich der Verfahren bei asymmetrischen Netzverhältnissen	46
3.4	Sternpunktbetrachtungen . . . . .	49
3.5	Mittelspannungsanschluss der HSU . . . . .	50
3.6	Bestimmung der Impedanzmatrix . . . . .	54
3.7	Mess- und Auswerteverfahren . . . . .	56
3.7.1	Fourieranalyse . . . . .	57
3.7.2	LTI-Systeme . . . . .	58
3.7.3	Digitale Filter . . . . .	59
3.7.4	Störeinflüsse . . . . .	60
3.7.5	Auswerteprogramm . . . . .	61
3.7.6	Analyse der Genauigkeit . . . . .	65
3.8	Bestimmung von induktiven und kapazitiven Kopplungen . . . . .	67
3.8.1	Netzimpedanzen im Vierleitersystem . . . . .	68
3.8.2	Kapazitive Kopplungen . . . . .	70
3.8.3	Bestimmung induktiver Kopplungen . . . . .	74
3.9	Bestimmung von Eingangskopplungen . . . . .	76
3.9.1	Einphasige Eingangskopplungsbetrachtung . . . . .	77
3.9.2	Dreiphasige Eingangskopplungen bei symmetrischem Netzaufbau . . . . .	80
3.9.3	Dreiphasige Eingangskopplungen bei asymmetrischem Netzaufbau . . . . .	81
<b>4</b>	<b>Flexible Netzanregung</b>	<b>83</b>
4.1	Einfluss der Schaltflanken/Pulsmuster auf die Netzanregung . . . . .	85
4.2	Netzanregeschalter mit SiC-JFETs . . . . .	87
4.2.1	Vorteile der SiC-Halbleiterschaltstrecke . . . . .	89
4.2.2	Symmetrierung . . . . .	90
4.2.3	Auslegung des SiC-JFET-Netzanregeschalters und der Snubberschaltung . . . . .	90
4.2.4	Entwicklung des Gate-Treibers . . . . .	94
4.2.5	Messergebnisse . . . . .	98
4.2.6	Schutz der Leistungselektronik . . . . .	101
4.2.7	Thermische Untersuchungen . . . . .	102
4.3	Dimensionierung der Lastwiderstände . . . . .	104
4.3.1	Wärmeübertragung . . . . .	104
4.3.2	Röhrenwiderstand . . . . .	106
4.3.3	Keramikscheibenwiderstand . . . . .	109
<b>5</b>	<b>Realisierung des mobilen 20-kV-Messcontainers</b>	<b>111</b>
5.1	Auslegung des Messcontainers . . . . .	112
5.1.1	Spannungsauslegung . . . . .	114
5.1.2	Klimatisierung und Spannungsversorgung . . . . .	116

5.1.3	Mess- und Steuerelektronik . . . . .	116
5.2	Schutzkonzept . . . . .	118
5.2.1	Berechnung der möglichen Fehlerströme . . . . .	119
5.2.2	Erdungskonzept des Messcontainers . . . . .	121
5.3	Thermische und mechanische Auslegung der Komponenten . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>127</b>
6.1	Messergebnisse auf der Niederspannungsebene . . . . .	127
6.1.1	Einfluss der Energieflussrichtung . . . . .	132
6.1.2	Messergebnisse zum Einfluss der Energieflussrichtung auf der Niederspannungsebene . . . . .	135
6.2	Messergebnisse auf der Mittelspannungsebene . . . . .	137
<b>7</b>	<b>Netzintegration von Erneuerbaren Energieanlagen</b>	<b>141</b>
7.1	Windenergieanlagen . . . . .	141
7.1.1	Aufbau und Funktionsweise von Windenergieanlagen . . . . .	142
7.1.2	Oberschwingungsemission von Windenergieanlagen . . . . .	145
7.1.3	Einfluss der Regelung auf Harmonische . . . . .	150
7.1.4	Flicker von Windenergieanlagen . . . . .	151
7.1.5	Filteranlagen und -auslegung . . . . .	154
7.1.6	Einfluss der Netzimpedanz auf Stromregler und deren Sta- bilität . . . . .	156
7.2	Ausbreitung von Harmonischen im elektrischen Energieversorgungs- netz . . . . .	158
7.3	Addition von Harmonischen . . . . .	164
7.4	Verbesserte Netzintegration Erneuerbarer Energieanlagen . . . . .	165
7.5	Optimierungspotentiale . . . . .	168
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>169</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>173</b>
A.1	Netzkurzschlussleistungen . . . . .	173
A.2	Grenzwerte für Oberschwingungsspannungen in Nieder- und Mit- telspannungsnetzen . . . . .	174
A.3	Skin-Effekt . . . . .	175
A.4	Analytische Betrachtung der Schaltvorgänge . . . . .	176
A.5	Transformation der symmetrischen Komponenten . . . . .	177
A.6	Korrelationsanalyse . . . . .	178
A.7	Ergebnisse des Auswerteverfahrens . . . . .	179
A.8	Berücksichtigung induktiver Kopplungen . . . . .	186
A.9	Netzimpedanzen bei asymmetrischem Netzaufbau . . . . .	187
A.10	Spektren von Strömen zur Netzanregung . . . . .	188
A.11	Lastwiderstände . . . . .	189

A.12 Technische Daten sowie Bilder des Netzimpedanzmesscontainers . . . . .	190
A.13 Zulässige Isolationsabstände in Luft nach DIN EN 61936-1 . . . . .	195
A.14 Oberschwingungsemissionen von Windenergieanlagen . . . . .	196
A.15 Design-Prozess eines LCL-Filters . . . . .	197
A.16 Netzimpedanzmessung auf der 110-kV-Hochspannungsebene . . . . .	199
<b>B Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis</b>	<b>201</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>205</b>