

Untersuchung von Methoden zur Identifikation der zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanz

Von der Fakultät für Elektrotechnik der
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

Dissertation
vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Jordan
aus Soltau

Hamburg, 2016

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	ix
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund der Arbeit	2
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	4
1.2.1 Problembeschreibung	4
1.2.2 Schwerpunkt und thematische Abgrenzung	5
1.2.3 Struktur und methodisches Vorgehen	7
2 Analyse von Verknüpfungspunkten zum Elektrizitätsversorgungsnetz	9
2.1 Fourieranalyse	9
2.1.1 Fourierreihe	9
2.1.2 Fourier-Integral	11
2.1.3 Diskrete Fourier-Transformation	13
2.2 Spannungsqualität und Netzurückwirkungen	17
2.2.1 Variation der Netzfrequenz	17
2.2.2 Fluktuation der Spannungsamplitude	19
2.2.3 Periodische Verzerrung der Netzspannung	20
2.2.4 Signalübertragung auf der Versorgungsspannung	22
2.3 Beschreibung und Berechnung von Netzelementen eines Drehstromsystems	24
2.4 Modellierung von Netzverknüpfungspunkten	26
2.4.1 Abschätzung der Längsimpedanzen anhand von Kenndaten	27
2.4.2 Frequenzabhängige Modellierung	28
2.5 Messtechnische Methoden zur Bestimmung der Netzimpedanz	32
2.5.1 Passive Impedanzmessung	32
2.5.2 Invasive Messmethoden	33
2.6 Zusammenfassung der Analyseergebnisse	36
3 Theoretische Untersuchung der Netzimpedanzmessung durch Schalten passiver Lasten	37
3.1 Einphasiges Grundprinzip	37
3.2 Identifikation der Leiterimpedanzen von Dreiphasenwechselstromsystemen	38
3.2.1 Dreileiternetze	38
3.2.2 Vierleiternetze	40
3.2.3 Kopplungen und symmetrische Komponentenerlegung	42
3.3 Netzanregung durch Schalten passiver Lasten	44
3.3.1 Induktive Netzanregung	46
3.3.2 Kapazitive Netzanregung	49
3.3.3 Ohmsche Netzanregung	53
3.4 Phasorenbestimmung	55

3.5	Fehlerquellen im Identifikationsverfahren	56
3.5.1	Fluktuation der Netzparameter	56
3.5.2	Messdatenerfassung und -verarbeitung	57
3.6	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	59
4	Simulative Evaluierung von Testsignalen zur spektralen Netzanregung	61
4.1	Systemtheoretische Betrachtung der Impulsanregung	62
4.2	Spektrale Netzanregung durch periodische Pulssequenzen	67
4.3	Spektrale Netzanregung durch stochastische Pulssequenzen	71
4.3.1	Generierung von binären Zufallsfolgen	72
4.3.2	Rauschreduktion durch korrelative Mittelungsverfahren	75
4.4	Zusammenfassung der Evaluierung	80
5	Praktische Erprobung und Anpassung des Netzimpedanzmessverfahrens	83
5.1	Messaufbau für die Niederspannungsebene	83
5.1.1	Leistungselektronische Schaltung zur Netzanregung	85
5.1.2	Messdatenerfassung und -verarbeitung	86
5.2	Experimentelle Untersuchungen an Netznachbildungen	89
5.2.1	Validierung der Netzimpedanzmessung mit Stromschwingungspaketen	90
5.2.2	Evaluierung der Netzurückwirkungen durch Stromschwingungspakete	92
5.2.3	Validierung der spektralen Netzimpedanzmessung mit Strompulssequenzen	93
5.2.4	Spektralanregung durch überlagerte Strompulssequenzen	98
5.2.5	Untersuchung von Störgrößen in der Netzspannung	100
5.2.6	Verfahren zur Reduzierung von Leakage-Fehlern	105
5.2.7	Robuster Glättungsalgorithmus zur Störsignalunterdrückung	107
5.2.8	Evaluierung der Netzurückwirkungen durch gepulste Stromsequenzen	110
5.3	Netzimpedanzmessungen an Anschlüssen zum öffentlichen Niederspannungsnetz	114
5.3.1	Messungen an einem Vierleiter-Drehstromanschluss	114
5.3.2	Zeit- und frequenzabhängige Netzimpedanzmessung	117
5.4	Aufbau des Messgerätes für die Mittelspannungsebene	121
5.4.1	Mess- und Steuerelektronik	122
5.4.2	Leistungselektronische Schaltung für die Netzanregung	125
5.5	Praktische Erprobung des Mittelspannungsmessgerätes	126
5.5.1	Untersuchungen der Netzurückwirkungen des Mittelspannungsmessgerätes	127
5.5.2	Zeit- und frequenzabhängige Netzimpedanzmessungen	129
6	Zusammenfassung und Ausblick	135
	Literaturverzeichnis	139
A	Anhang	149
A.1	Normen und Richtlinien im Bereich Spannungsqualität	149
A.2	Abschätzung der Flickerstärke anhand typischer Signalverläufe	151
A.3	Messung und Klassifizierung der Netzspannungshöhe nach EN 61000-4-30	152
A.4	Grenzwerte für Oberschwingungsspannungen	153
A.5	Bitmusterstrukturierung eines Rundsteuerers	154
A.6	Maximal zulässige Signalspannungspegel für Rundsteueranlagen	154
A.7	Bezugsimpedanzen für Geräte auf der Niederspannungsebene	155

A.8 Lösungsverfahren zur Bestimmung der äquivalenten Leiterimpedanzen	158
A.9 Transformation von Drehstromsystemgrößen in die symmetrischen Komponenten . . .	159
A.10 Stern-Dreieck-Transformation	160
A.11 Lösungsverfahren DGL erster Ordnung	160
A.12 Lösungsverfahren DGL zweiter Ordnung	161
A.13 Korrelation	163
A.14 Messgerät für die Niederspannungsebene	164
A.15 <i>tricube</i> -Gewichtung	165
A.16 Prüfstand für die Vermessung von Strom- und Spannungssensoren	165
A.17 Mobiles Messgerät für die Mittelspannungsebene	167
B Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	169