

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Ziel der Arbeit	5
3	Anforderungen an Spannungsquellen für Hochspannungsprüfungen	7
3.1	Spannungsart und Spannungsform	7
3.2	Leistungsbedarf bei der Prüfung von Transformatoren	8
3.3	Kompensierter Punkt	12
3.4	Leerlaufverhalten eines Leistungstransformators	16
3.5	Teilentladungsgrundstörpegel	18
4	Grundlagen	19
4.1	Leistungselektronische Frequenzumrichter	19
4.1.1	Frequenzkonverter mit Spannungszwischenkreis (U-Umrichter)	21
4.1.1.1	Gleichrichter	22
4.1.1.2	Zwischenkreis	23
4.1.1.3	Wechselrichter	23
4.1.1.4	Sinusfilter	25
4.1.2	Frequenzkonverter mit Stromzwischenkreis (I-Umrichter)	26
4.1.2.1	Gleichrichter	27
4.1.2.2	Zwischenkreis	27
4.1.2.3	Clamping-Kreis	27
4.1.2.4	Wechselrichter	27
4.2	Teilentladungen (TE)	28
4.2.1	Detektion von Teilentladungen	29
4.2.2	Klassische TE-Interpretation	30
5	Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis (U-Umrichter)	33
5.1	Ausgangsspannungsform	35

5.2	Echtzeitregelung der Ausgangsspannung	36
5.2.1	Regelkonzept	36
5.2.1.1	Schaltzustände des Wechselrichters	37
5.2.2	Reglersynthese	40
5.2.2.1	Stromregelung	43
5.2.2.2	Spannungsregelung	52
5.2.2.2.1	Reglerentwurf bei ohmscher Last	53
5.2.2.2.2	Reglerentwurf bei ohmsch-induktiver Last	58
5.2.2.2.3	Reglerentwurf bei ohmsch-kapazitiver Last	63
5.2.2.2.4	Universeller Reglerentwurf	64
5.2.2.3	Ansteuerlogik und Verriegelung	64
5.2.2.3.1	Ansteuerlogik	64
5.2.2.3.2	Verriegelung	65
5.3	Simulation	66
5.3.1	Simulationsmodell	66
5.3.1.1	Wechselrichter	68
5.3.2	Simulationsergebnisse	69
5.4	Realisierung der Echtzeitregelung	75
5.5	Realisierung der Echtzeitregelung in analoger Schaltungstechnik	76
5.6	Digitale Realisierung	77
5.7	Ergebnisse zur Regelung der Ausgangsspannung	79
5.7.1	Leerlauf	79
5.7.2	Ohmsche Last	81
5.7.3	Induktive Last	82
5.7.4	Ohmsch-Induktive Last	83
5.7.5	Ausgangsfrequenzen bis 200 Hz.	84
5.7.6	Stabilität der Ausgangsspannung	85
5.7.7	Leistungsaufnahme des Ausgangsfilters	86
5.7.8	Zusammenfassung	86
6	Frequenzumrichter mit Stromzwischenkreis (I-Umrichter).	87
6.1	Entwurf und Realisierung des I-Umrichters	88
6.1.1	Gleichrichter	88
6.1.2	Zwischenkreis	89
6.1.3	Wechselrichter	90
6.1.3.1	Steuerung und Regelung	90
6.1.3.2	Schaltzustände des Wechselrichters	92

6.1.3.3	Ansteuerlogik und Verriegelung	94
6.1.4	Gesamtsystem	95
6.2	Simulation	96
6.2.1	Spannungsqualität in Abhängigkeit von der Kapazität, der Ausgangsfrequenz und dem Zwischenkreisstrom	96
6.2.2	Spannungsqualität in Abhängigkeit von der Hysteresen- breite	99
6.2.3	Spannungsqualität in Abhängigkeit von der Last	100
6.3	Messergebnisse	102
6.3.1	Analyse der Spannungsform	102
6.3.2	Analyse des Sprungs am Nulldurchgang	104
6.3.3	Belastung mit induktiver Last	104
6.3.4	Zusammenfassung	105
6.4	Teilentladungsmessung	105
6.5	Zusammenfassung	106
7	Vergleich zwischen Umrichter mit Spannungs- und Strom- zwischenkreis	107
8	Dreiphasigkeit des Wechselrichters.	109
8.1	Drei Einphasensysteme.	109
8.2	Drehstrombrückenschaltung	110
8.2.1	Schaltungstopologie	110
8.2.2	Regelkonzept.	111
8.2.3	Simulationsergebnisse	113
8.3	Zusammenfassung	115
9	Teilentladungs-Störunterdrückung	117
9.1	Analyse der Störsituation	118
9.2	Analyse der Störsignale	119
9.3	Lösungsansätze zur TE-Problematik	121
9.3.1	Optimierter Aufbau des TE-Messkreises.	121
9.3.2	Hochfrequente Störunterdrückung	125
9.3.3	Hochleistungs-Tiefpassfilter	126
9.3.4	Weitere Lösungsansätze	128
9.3.4.1	Umrichteroptimierte Gating-Systeme	128
9.3.4.2	Schmalbandige TE-Messung	129
9.3.4.3	Offline-Diagnose	129
9.4	Abweichende TE-Messergebnisse in umrichtergespeisten Prüfkreisen	130

10 Hochspannungsprüfungen an Transformatoren	133
10.1 Wechselspannungsprüfungen an Transformatoren	133
10.1.1 Messung der Kurzschlussverluste und der Kurzschlussspannung	134
10.1.2 Messung der Leerlaufverluste	135
10.1.3 Prüfung mit induzierter Wechselspannung	137
10.1.4 Kompensierter Punkt	139
10.2 Zusammenfassung	140
11 Weltweit erstes mobiles Hochspannungsprüfsystem für Transformatoren	141
12 Zusammenfassung und Ausblick.	145
12.1 Zusammenfassung	145
12.2 Ausblick	147
Anhang	149
A Digitale Realisierung der Echtzeitregelung.	149
A.1 Digitale Realisierung der Regelglieder	149
A.1.1 P-Glied	149
A.1.2 Summationsglied	149
A.1.3 I-Glied	150
A.1.4 PT_1 -Glied.	150
A.2 DSP-Software	151
A.2.1 Programmstruktur	152
A.2.2 Regelung.c	153
A.2.3 Convert.c	155
A.2.4 eCAN.c	156
A.2.5 Convert.h	157
A.2.6 Pi_reg.h	157
A.2.7 Digitale, DSP-interne Sollwertvorgabe	157
A.3 Hardware	159
A.4 Ansteuerlogik und Verriegelung	159
A.4.1 Ansteuerlogik	160
A.4.2 Verriegelung	161
Abbildungen	165
Tabellen	171
Literaturverzeichnis	173
Abkürzungsverzeichnis.	183
Stichwortverzeichnis.	187