

Dipl.-Ing. Götz Lipphardt, Darmstadt

**Ein Beitrag zur Anwendung
zwangskommutierter
Schaltungen in Systemen der
Hochspannungs-Gleichstrom-
Übertragung**

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **224**

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	IX
1 Einführung	1
1.1 Probleme von HGÜ-Systemen in „klassischer Technik“ . . .	1
1.2 Eine mögliche Lösung: HGÜ mit Zwangskommutierung . . .	3
1.3 Weitergehende Motivierung für HGÜ mit Zwangskommu- tierung	3
1.4 Ziel und Beitrag der Arbeit	4
1.5 Aufbau der Arbeit	5
1.6 Verwendete Werkzeuge	6
2 Einordnung der Arbeit	8
2.1 Historischer Exkurs	8
2.2 Aktueller Stand	9
2.3 Einsatzvarianten von HGÜ-Systemen	17
2.4 Referenz: HGÜ-Systeme mit NWR bzw. UWR	17
2.4.1 Vergleichsbasis HGÜ mit NSR	17
2.4.1.1 Zweipunkt-HGÜ-Systeme	17
2.4.1.2 Mehrpunkt-HGÜ-Systeme	19
2.4.2 Vergleichsbasis HGÜ mit UWR	19
3 Der IWR in HGÜ-Anwendungen	20
3.1 Analyse des IWR	20
3.1.1 Grundfunktion der Schaltung	20
3.1.2 Oberschwingungen und 12-pulsiger Betrieb	23
3.1.3 Stationäre Zeitverläufe des IWR	26
3.1.4 Steuer- und Regelverfahren des IWR	26
3.1.5 Vorbemerkung zu den Kapiteln 3.1.6 und 3.1.8	30
3.1.6 Grundgleichungen und Kennlinien des quasi-stationären Betriebs	31
3.1.7 Stabilität des IWR am schwachen Netz	37
3.1.8 Dynamisches Modell des IWR	41
3.1.8.1 Dreiphasiges Ersatzschaltbild (in RST - Koordinaten):	42
3.1.8.2 Transformation $RST \rightarrow dq$ -Koordinaten:	43
3.1.8.3 Linearisierungen	45
3.1.8.4 Reduzierung des Modells	47
3.1.8.5 Linearisiertes, reduziertes Modell in dre- henden Koordinaten	48

3.2	Entwurf und Auslegung der Regelung	48
3.2.1	Entwurf geeigneter Regelstrategien	48
3.2.1.1	Regelstrategie für das ZPHGÜ-System	48
3.2.1.1.1	Sonderfall: Passive AC-Last am IWR	50
3.2.1.2	Regelstrategie für das MPHGÜ-System	51
3.2.1.3	Regelstrategie für das ZPHGÜ _{tapping} -System	52
3.2.2	Realisierung der Regelstrategie	52
3.2.3	Auslegung der Regler	53
3.2.3.1	Regelung des Gleichstroms	53
3.2.3.2	Regelung der AC-Sammelschienenenspannung	56
3.2.3.3	Entkopplung der Regelkreise	59
3.3	Dynamisches Verhalten des IWR-HGÜ-Systems	62
3.3.1	Das hybride Zweipunktsystem	63
3.3.1.1	Simulationsmodell	63
3.3.1.2	Hochlauf	63
3.3.1.3	DC-Fehler	67
3.3.1.3.1	Erkennung des Gleichstromfehlers	67
3.3.1.3.2	Fehlerbehandlung beim System mit NSR	67
3.3.1.3.3	Fehlerbehandlung beim System mit IWR	68
3.3.1.4	AC-Fehler	70
3.3.1.4.1	Symmetrischer Kurzschluß am WR	70
3.3.1.4.2	Unsymmetrischer Kurzschluß am WR	75
3.3.1.5	Verhalten bei passiver AC-Last	80
3.3.2	Das parallele Mehrpunktsystem	82
3.3.2.1	Simulationsmodell	82
3.3.2.2	Hochlauf und stationärer Betrieb	82
3.3.2.3	AC- und DC-Fehler	83
3.3.3	Das System mit Serienanzapfung	86
3.3.3.1	Simulationsmodell	86
3.3.3.2	Hochlauf	88
3.3.3.3	Störungen im AC-Netz des IWR	88
3.3.3.3.1	Laständerung	89
3.3.3.3.2	Sammelschienenkurzschluß	91
3.3.3.4	Störungen im ZPHGÜ-System	91
3.3.3.4.1	AC-Spannungsabsenkung am NGR	93

3.4	Technische Realisierung und Kostenbetrachtungen	95
3.4.1	Technische Realisierung des IWR-HGÜ-Systems	95
3.4.1.1	Aufbau der IWR-Station für das ZPHGÜ- und das MPHGÜ-System	95
3.4.1.2	Aufbau der IWR-Station für das ZPHGÜ _{tapping} - System	102
3.4.2	Abschätzung der Kosten	103
3.4.2.1	Kosten der IWR-Station für das ZPHGÜ- und das MPHGÜ-System	103
3.4.2.2	Kosten der IWR-Station für das ZPHGÜ _{tapping} - System	107
4	Vergleich ausgewählter HGÜ-Systeme	109
4.1	Definition der Vergleichs- und Bewertungskriterien	109
4.2	Vergleich und Bewertung	111
4.2.1	Allgemeine Eigenschaften	111
4.2.2	Bewertung der Varianten	112
4.2.3	Betrieb der Varianten am schwachen Netz	118
5	Zusammenfassung, Schlußfolgerungen und Ausblick	121
A	Berechnung der Oberschwingungen des IWR	127
A.1	Berechnung der Oberschwingungen im Ausgangsstrom	127
A.1.1	Beschreibung des Steuersatzes	127
A.1.2	Berechnung der Oberschwingungen	128
A.1.3	Verfahren der harmonischen Elimination	128
A.2	Berechnung der Oberschwingungen im Netzstrom	129
B	Bewertung der Variante IWR mit Blocktaktung	130
C	Herleitung des dynamischen Modells des IWR	132
C.1	Systemgleichungen in RST -Koordinaten	132
C.2	Transformationsmatrizen	132
C.3	Systemgleichungen in $\alpha\beta$ -Koordinaten	135
C.4	Systemgleichungen in dq -Koordinaten	135
C.5	Zusammenhang zwischen AC- und DC-Seite	135
D	Herleitung der Übertragungsfunktionen des IWR	136
D.1	Methode des linearen Gleichungssystems	136
D.2	Zustandsgleichung des linearisierten, reduzierten Modells	136
D.2.1	Führungsübertragungsfunktionen	138

D.2.1.1	$\Delta I_{dc}/\Delta m$:	138
D.2.1.2	$\Delta U_t/\Delta \varphi_{i0}$:	140
D.2.2	Störübertragungsfunktionen	143
D.2.2.1	$\Delta i_{dc}/\Delta \varphi_{i0}$:	143
D.2.2.2	$\Delta U_t/\Delta m$:	144
D.3	Methode der komplexen Rechnung	144
D.3.1	Erläuterung des Verfahrens	144
D.3.2	Anwendung des Verfahrens auf den IWR	145
E	Parameter der Simulationsrechnungen	150
E.1	Parameter für das hybride Zweipunktsystem	150
E.2	Parameter für das parallele Mehrpunktsystem	153
E.3	Parameter für das System mit Serienanzapfung	154
F	Verwendetes System der bezogenen Größen	154
	Synopsis of thesis	158
	Literatur	163