

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Einordnung dieser Arbeit | 1 |
| 1.2. Inhaltsübersicht | 3 |
| 2. Aktivfilterung von Stromoberschwingungen | 5 |
| 2.1. Stromoberschwingungen | 5 |
| 2.1.1. Ursachen | 5 |
| 2.1.2. Wirkung | 6 |
| 2.1.3. Gegenmassnahmen | 6 |
| 2.2. Modellierung der untersuchten Regelstrecke | 8 |
| 2.3. Strukturanalyse | 10 |
| 2.3.1. Störgrößenregelung | 11 |
| 2.3.2. Führungsgrößenregelung | 11 |
| 2.4. Bekannte Kompensationsverfahren | 12 |
| 2.4.1. Aktivfilterung anhand der Momentanleistung | 13 |
| 2.4.2. Aktivfilterung in rotierenden Koordinatensystemen | 13 |
| 2.4.3. Aktivfilterung mit Fourierkoeffizienten | 14 |
| 2.4.4. Aktivfilterung mit einem Optimalregler | 15 |
| 2.5. Zusammenfassung | 16 |
| 3. Modellbasierte Prädiktivregelung | 17 |
| 3.1. Funktionsprinzip | 17 |
| 3.2. Regelstreckenmodelle | 18 |
| 3.2.1. Impuls- und Sprungantwort | 18 |
| 3.2.2. Übertragungsfunktion | 20 |
| 3.2.3. Zustandsraumdarstellung | 20 |
| 3.3. Kostenfunktion | 21 |
| 3.3.1. Arten der Regelfehlergewichtung | 22 |
| 3.3.2. Allgemeine quadratische Kostenfunktion | 23 |
| 3.3.3. GPC-basierte quadratische Kostenfunktion | 23 |
| 3.3.4. Dual-Mode-MPC | 25 |
| 3.3.5. Stabilitätssicherung durch unendlich langen Prädiktionshorizont | 25 |
| 3.4. Lösung der Optimierungsaufgabe | 28 |
| 3.4.1. Berücksichtigung von Nebenbedingungen | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.2. Unbeschränkte Lösung | 32 |
| 3.5. Sollwertfolge und stationäre Verläufe | 34 |
| 3.6. Totzeiten | 36 |
| 3.7. Kompensation nicht gemessener Störungen | 37 |
| 3.7.1. Darstellungsarten | 38 |
| 3.7.2. Einsatz von Beobachtern | 39 |
| 3.8. Zusammenfassung | 41 |
| 4. Erweiterung von MPC zur Aktivfilterregelung | 43 |
| 4.1. Hintergrund | 43 |
| 4.2. Sollwertfolge | 44 |
| 4.2.1. Modellierung der Führungsgröße | 44 |
| 4.2.2. Berechnung der stationären Trajektorien | 45 |
| 4.2.3. Bezug der stationären Größen auf die Stellgrößenberechnung | 49 |
| 4.2.4. Anpassung der Kostenfunktion | 50 |
| 4.3. Testumgebung zur simulativen Untersuchung | 51 |
| 4.4. Störkompensation | 53 |
| 4.4.1. Erfassung der Laststromparameter | 54 |
| 4.4.2. Alleinige Messung der Ströme | 55 |
| 4.4.3. Vorsteuerung der Anschlussspannung | 55 |
| 4.4.4. Ergebnisse der Störkompensationsverfahren | 56 |
| 4.5. Auswahl des zu implementierenden Regelgesetzes | 59 |
| 4.5.1. Testbedingungen | 59 |
| 4.5.2. Untersuchte Warmstartmethoden | 60 |
| 4.5.3. Ergebnisse der Methoden | 61 |
| 4.5.4. Schlussfolgerungen | 63 |
| 4.6. Analyse der Aktivfilterstruktur mit Zustandsregler | 63 |
| 4.7. Reglerauslegung | 66 |
| 4.8. Behandlung von Messtotzeiten | 67 |
| 4.9. Stabilitätsbetrachtungen | 70 |
| 4.9.1. Auswirkungen von Modellungenauigkeiten | 72 |
| 4.9.2. Stabilität bei vorhandenen harten Begrenzungen | 73 |
| 4.10. Zusammenfassung | 74 |
| 5. Aufbau eines Aktivfilters | 77 |
| 5.1. Mehrstufiger Umrichter als Stellglied zur Aktivfilterung | 77 |
| 5.1.1. Einzelne H-Brücke | 77 |
| 5.1.2. Reihenschaltung von H-Brücken | 79 |
| 5.1.3. Pulsmustererzeugung | 80 |
| 5.1.4. Vorladen der Speicherkondensatoren | 81 |
| 5.1.5. Dimensionierung | 82 |

| | |
|--|------------|
| 5.2. Ansteuerung | 85 |
| 5.2.1. Rechenhardware | 86 |
| 5.2.2. Aufgabenverteilung | 87 |
| 5.2.3. Datenaustausch | 88 |
| 5.3. Umsetzung der Regelungen | 90 |
| 5.3.1. Stabilisierung der Kondensatorspannungen | 91 |
| 5.3.2. Oberschwingungskompensation | 94 |
| 5.4. Zusammenfassung | 97 |
| 6. Erprobung an einem Netzmodell | 101 |
| 6.1. Netzmodell des Lehrstuhls für Regelungssysteme | 101 |
| 6.1.1. Leitungsimpedanz | 102 |
| 6.1.2. Koppelimpedanz des Aktivfilters | 103 |
| 6.2. Untersuchte Oberschwingungsquellen | 104 |
| 6.2.1. Sechspulsbrückengleichrichter | 105 |
| 6.2.2. Steuerbare Stromquelle | 106 |
| 6.3. Messungen mit nichtlinearen Lasten | 107 |
| 6.3.1. Sechspulsbrückengleichrichter als Last | 110 |
| 6.3.2. Leistungsverstärker als Last | 116 |
| 6.4. Diskussion | 123 |
| 6.5. Zusammenfassung | 124 |
| 7. Zusammenfassung und Ausblick | 125 |
| A. Anzahl an Schaltkombinationen bei einem mehrstufigem Umrichter mit H-Brücken-Topologie | 127 |
| B. Messwerte | 129 |
| B.1. Sechspulsbrückengleichrichter | 129 |
| B.1.1. Ohmsch-induktive Gleichstromlast | 129 |
| B.1.2. Kapazitive Gleichstromlast | 130 |
| B.2. Gesteuerte Stromquelle | 130 |
| B.2.1. Eingeprägte 5., 15. und 40. Oberschwingung | 130 |
| B.2.2. Eingeprägte 5. Oberschwingung | 131 |
| B.2.3. Eingeprägte 15. Oberschwingung | 131 |
| B.2.4. Eingeprägte 40. Oberschwingung | 132 |
| Literaturverzeichnis | 138 |