

Multifunktionaler Einsatz von Batteriespeichern in elektrischen Verteilnetzen

Optimale Auslegung und Betrieb

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von M. Sc. Stephan Balischewski
geb. am 05.11.1987 in Stendal

genehmigt durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann

Promotionskolloquium am 29. Januar 2020

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	These der Arbeit	3
1.3	Aufbau und Abgrenzung der Arbeit.....	3
2	Speicher in elektrischen Energiesystemen	5
2.1	Notwendigkeit der Flexibilisierung des Energienetzes	5
2.2	Definition, Klassifizierung und Kenngrößen von Energiespeichern	8
2.3	Einsatzgebiet und Anwendungsfallübersicht	15
2.3.1	Netzdienlicher Speichereinsatz	15
2.3.2	Marktdienlicher Speichereinsatz.....	17
2.4	Systemintegration und regulatorischer Rahmen	18
2.4.1	Energiespeicher in der Gesetzgebung.....	18
2.4.2	Entgelte und Gebühreumlage	20
2.4.3	Normung und Standardisierung.....	23
2.5	Lithium-Ionen-Speicher	25
2.6	Derzeitige Auslegungsverfahren und Betriebsmodelle.....	28
3	Modellierung und Auslegung von Batteriespeichern	32
3.1	Einführung	32
3.2	Mathematische Batteriespeichermodellierung	32
3.2.1	Generisches Modell.....	32
3.2.2	Ansätze der Zellmodellierung	33
3.2.3	Modellierung des Alterungsverhalten	38
3.2.4	Netzanschluss und Zusatzkomponenten	46
3.2.5	Modellumsetzung und Parametrierung.....	47
3.3	System- und Komponentenauslegung	56
4	Unifunktionale Betriebsweise und Nutzungsstrategien	59
4.1	Einführung	59

4.2	Anwendungsfall A: Netzstützung	59
4.3	Anwendungsfall B: Industrieinsatz	66
4.4	Anwendungsfall C1: Parallelbetrieb mit Photovoltaikanlagen.....	71
4.5	Anwendungsfall C2: Parallelbetrieb mit Windkraftanlagen.....	76
5	Multifunktionaler BES-Einsatz	82
5.1	Erweiterbarkeit unifunktionaler Anwendungsfälle	82
5.2	Zusätzliche Anwendungsfälle	83
6	Praktische Realisierung am Beispiel einer 1-MW-Testanlage	89
6.1	Smart Grid Energy Storage System - SGEES.....	89
6.2	Versuchsumgebung	90
6.3	Implementierung der Anwendungsfälle.....	92
6.4	Vergleich der Voruntersuchung mit dem Feldversuch.....	93
6.5	Bewertung des Feldversuchs.....	93
6.6	Ansatz eines zyklenbasierten state-of-health-Index	98
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	100
8	Literaturverzeichnis	102
9	Abkürzungsverzeichnis.....	113
10	Abbildungsverzeichnis	115
11	Tabellenverzeichnis.....	119
Anhang A.	Laborversuche zur Speichermodellbildung	121
Anhang B.	Laborversuche zur Speichermodellbildung	122