

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Steigender Einfluss von DC-Systemen durch Wachstum der erneuerbaren Energien	1
1.2	Erforderliche Veränderungen in der DC-Strommesstechnik	2
1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen	3
2.1	Die Maxwell'schen Gleichungen	3
2.1.1	Elektrische Ladungen als Quelle des elektrischen Feldes	3
2.1.2	Quellenfreiheit des magnetischen Feldes	4
2.1.3	Zweite Maxwell'sche Gleichung / Induktionsgesetz	5
2.1.4	Erste Maxwell'sche Gleichung / Durchflutungsgesetz	5
2.2	Ampère'sches Gesetz	6
2.3	Biot-Savart-Gesetz	7
2.4	Lorentzkraft und Coulombkraft	8
2.5	Hall-Effekt	9
2.6	Fluxgate-Magnetometer	10
3	Stand der Technik der Strommesssensorik	13
3.1	Direkte Shunt-basierte Strommessung	13
3.2	Indirekte magnetfeldbasierte Strommessung	14
3.2.1	Messung auf der Basis des Faraday'schen Induktionsgesetzes	14
3.2.1.1	Stromwandler	14
3.2.1.2	Rogowskispule	16
3.2.2	Faraday'scher magnetooptischer Effekt	17
3.2.3	Magnetfeldsensoren	17
3.2.3.1	Open-Loop-Strommessprinzip	18
3.2.3.2	Closed-Loop-Strommessprinzip	19
3.2.3.3	Weitere auf Magnetfeldsensoren basierte Methoden	20
3.2.3.4	Fluxgate-Magnetfeldsensor	20
3.3	Vergleich aktueller Strommessverfahren	20
4	Strommessung auf der Grundlage des Ampère'schen Gesetzes	23
4.1	Diskretisierung des Ampère'schen Gesetzes	23
4.2	Einfluss der Sensitivität der Magnetfeldsensoren	25
4.3	Messumgebung	26
4.3.1	Messkomponenten und ihre Umgebung	26
4.3.2	Messablauf	27

4.3.3	DRV425-Fluxgate-Sensor von Texas Instruments	28
4.3.4	A1369-Hall-Sensor von Allegro	29
4.4	Einfluss der Leiteranordnung auf die Strommessung	30
4.4.1	Kalibrierung der Sensoren	31
4.4.2	Einfluss eines Fremdfeldes auf den Strommessfehler	34
4.4.2.1	Einfluss des Winkels bei Störleiters	38
4.4.2.2	Einfluss der Distanz des Störleiters	44
4.4.2.3	Einfluss der Anzahl an Sensoren bei einem Störleiter	44
4.4.2.4	Zusammenfassung zum Einfluss des Störleiters auf den Messfehler	45
4.4.3	Einfluss der Position des Leiters auf den Strommessfehler	46
4.4.3.1	Einfluss der Distanz des Leiters zum Sensormittelpunkt	50
4.4.3.2	Einfluss des Winkels bei nicht zentrischer Position des Leiters	53
4.4.3.3	Einfluss der Anzahl an Sensoren bei nicht zentrischer Position des Leiters	58
4.4.3.4	Zusammenfassung zum Versatz des Leiters	58
4.4.4	Einfluss der Leitergeometrie auf den Strommessfehler	59
4.4.4.1	Einfluss der Breite des Leiters	62
4.4.4.2	Einfluss des Winkels zwischen Sensor und Leiter	64
4.4.4.3	Einfluss der Anzahl an Sensoren bei einem Flachleiter	68
4.4.4.4	Zusammenfassung zur Leitergeometrie	69
4.4.5	Zusammenfassung zur Strommessung auf der Grundlage des Ampère'schen Gesetzes	70
5	Möglichkeiten durch intelligente Verarbeitung der Sensordaten	71
5.1	Fehlerreduktion durch Bereichsumschaltung	71
5.1.1	Algorithmus zur Bereichsumschaltung	73
5.1.2	Einfluss der Einzel-, Paar- und Gruppensummschaltung auf den Strommessfehler	78
5.1.3	Zusammenfassung zur Bereichsumschaltung	83
6	Zusammenfassung und Ausblick	85
6.1	Zusammenfassung	85
6.2	Ausblick	87
	Literaturverzeichnis	89
	Abbildungsverzeichnis	95
	Tabellenverzeichnis	99