

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Magnetische Energiespeicherung mit supraleitenden Spulen</b>	<b>4</b>
2.1	Anwendungen der supraleitenden magnetischen Energiespeicherung	4
2.2	Die Modellspeicheranlage München	5
2.2.1	Anordnung des Torusringes und Aufbau der Feldspulen	6
2.2.2	Supraleiter	10
2.2.3	Magnetische Induktion	12
2.2.4	Elektrische Daten der Modellspeicheranlage	13
2.2.5	Kühlkreislauf	14
2.2.6	Thermische Energie der Feldspulen	19
<b>3</b>	<b>Betrieb supraleitender magnetischer Energiespeicher</b>	<b>21</b>
3.1	Fahrplangesteuerter Speicher	21
3.1.1	Beispiel: Spitzenlastausgleich im Energieversorgungsnetz	21
3.1.2	Beispiel: Stoßleistungserzeugung für ein Protonensynchrotron	22
3.2	Stand-by-Betrieb mit sporadischer Schnellentladung	23
3.2.1	Beispiel: Serieller Kompensator zur Spannungsstützung bei Erdkurzschlüssen	23
3.2.2	Beispiel: Vorhaltung der Sekundenreserve in Verbundnetzen	25
3.3	Allgemeiner Netzbetrieb	25
3.3.1	Beispiel: Lastgangglättung in Unterwerken elektrischer Bahnen	26
3.3.2	Beispiel: Ausgleich der durch Industrieabnehmer verursachten Stoßbelastungen	29
3.4	Versuchsbetrieb der Modellspeicheranlage München	30

<b>4</b>	<b>Schutzeinrichtungen für Energiespeicheranlagen mit supraleitenden Spulen</b>	<b>33</b>
4.1	Netzanbindung und Schutz der konventionellen Betriebsmittel	33
4.2	Die supraleitenden Spulen im Normalbetrieb	37
4.2.1	Der kritische Strom harter Hochfeld-Supraleiter	37
4.2.2	Supraleiterverluste und Temperaturprofil der Wicklung	39
4.2.3	On-line-Überwachung des kritischen Stromes	40
4.3	Schutz der supraleitenden Spule bei Störfällen	43
4.3.1	Entstehung und Ausbreitung normalleitender Zonen	43
4.3.2	Quencherkennung	48
4.3.3	Spulenschutz mittels schaltbarem Bypass	51
4.3.4	Spulenheizer	53
4.4	Schutzabschaltung mit Widerstandsentsladung	57
4.5	Kurzschluß- und Fehlerstrom-Erfassung	58
4.6	Schutz des Kühlkreislaufes	60
<b>5</b>	<b>Schaltbarer Bypass zum Schutz supraleitender Spulen</b>	<b>61</b>
5.1	Analytische Untersuchung der Spulenüberbrückung	61
5.1.1	Ersatzschaltbild	61
5.1.2	Induktivitäten und magnetische Kopplungen	62
5.1.3	Spulenwiderstand bei Quench	63
5.1.4	Berechnung der Ströme in Spule und Bypass	64
5.1.5	Thermische Belastung der Spule bei Schutzentsladung mit und ohne Bypass	79
5.2	Leistungshalbleiter für den Spulenschutz	83
5.2.1	Halbleiter bei Tiefsttemperaturen	83
5.2.2	Meßeinrichtung für Tiefsttemperaturversuche an Leistungshalbleitern	88
5.2.3	Meßergebnisse	92
5.2.4	Schlußfolgerung und Ausblick	97
5.3	Mechanische Belastung der Spulen bei Überbrückung	98

<b>6</b>	<b>Numerische Analyse eines Quenches und der Maßnahmen zum Schutz der Spulen</b>	<b>99</b>
6.1	Modellierung der Wicklung und Simulationsalgorithmus	99
6.2	Quench bei maximalem Strom	103
6.3	Schnellentladung des Speichers	107
6.4	Sofort-Entlastung der gestörten Spule durch Überbrückung	108
6.5	Die Wirkung des Spulenhizers	110
6.6	Speicher-Notentladung	112
6.7	Quench an beliebiger Stelle im Wickelgebiet	113
6.8	Schlußfolgerungen	113
<b>7</b>	<b>Konzept für das Schutzsystem der Modellspeicheranlage München</b>	<b>115</b>
7.1	Schutzziele und -strategie	115
7.2	Grundprinzip der Zentraleinheit für Überwachung und Schutz (ZUS)	116
7.2.1	Bypass-Freigabe	118
7.2.2	Bypass-Überwachung	119
7.2.3	Berechnung der Spulenverluste (Wsp-Bildner)	120
7.2.4	Schutzentladung und Speicher-Schutzabschaltung	120
7.2.5	Betriebsmittel-Überwachung	122
7.3	Schutzlogik	124
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>130</b>
<b>Anhang</b>		
A	Maximaler Speicher-Betriebsstrom (Tabelle)	133
B	Maximaler Speicher-Energieinhalt (Tabelle)	135
C	Spulenerwärmungskurven (Tabelle)	137
D	Koeffizienten zu Stromzeitverläufen in Kap. 5.1.4	139
E	Speicherinduktivität bei überbrückten Feldspulen	141
F	Berechnungsformeln für Supraleiterverluste	142
G	Herleitung der effektiven Supraleiter-Isolationsdicken	149
H	Stromwärme-Temperatur-Diagramm für Supraleiter-Matrixkupfer	150
I	Literatur	151