

Dipl.-Ing. Johannes Teigelkötter, Herzogenaurach

Schaltverhalten und Schutzbeschaltungen von Hochleistungshalbleitern

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **206**

| Inhalt | V |
|--|----|
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Prüfstand für Hochleistungshalbleiter | 3 |
| 2.1 Leistungsteil des Prüfstands | 3 |
| 2.2 Sicherheits- und Schutzkonzept | 5 |
| 2.3 Betriebsarten des Prüfstands | 6 |
| 2.3.1 Doppelpulsbetrieb | 6 |
| 2.3.2 Dauerbetrieb | 8 |
| 2.4 Aufbau für GTO-Prüfungen | 12 |
| 2.4.1 Einstellung der Temperatur am Prüfling | 13 |
| 3 Meßtechnik | 14 |
| 3.1 Meßeinrichtung des Prüfstands | 15 |
| 3.2 Anforderungen an die Grenzfrequenz der Meßglieder | 16 |
| 3.3 Ermittlung der Schaltverlustenergie | 17 |
| 3.3.1 Einfluß von Störgrößen | 18 |
| 3.3.2 Einfluß der Quantisierung des Analog / Digital-Umsetzers | 19 |
| 4 Analyse von Schutzbeschaltungen für Hochleistungs-GTO-Thyristoren in Traktionswechselrichtern | 22 |
| 4.1 Anforderungen an Schutzbeschaltungen | 22 |
| 4.2 Funktionsweise gebräuchlicher Schutzbeschaltungen | 24 |
| 4.2.1 RCD-Beschaltung mit Überlaufkondensator | 26 |
| 4.2.1.1 Einschalten | 26 |
| 4.2.1.2 Ausschalten großer Lastströme | 28 |
| 4.2.1.3 Ausschalten kleiner Lastströme | 30 |
| 4.2.2 Unsymmetrische Schutzbeschaltung nach Marquardt und Undeland | 32 |
| 4.2.2.1 Einschalten positiver Lastströme | 33 |
| 4.2.2.2 Ausschalten großer positiver Lastströme | 34 |
| 4.2.2.3 Ausschalten kleiner positiver Lastströme | 36 |
| 4.2.2.4 Einschalten negativer Lastströme | 37 |
| 4.2.2.5 Ausschalten großer negativer Lastströme | 39 |
| 4.2.2.6 Ausschalten kleiner negativer Lastströme | 40 |
| 4.2.3 Symmetrische Schutzbeschaltung nach Wagner und McMurray | 42 |
| 4.2.3.1 Einschalten | 43 |
| 4.2.3.2 Ausschalten großer Lastströme | 44 |
| 4.2.3.3 Ausschalten kleiner Lastströme | 46 |
| 4.3 Vergleich der verlustbehafteten Schutzbeschaltungen | 48 |
| 4.3.1 Überspannung beim Ausschalten als Funktion der minimalen Ausschaltzustandszeit | 49 |
| 4.3.2 Nachladestrom in den Beschaltungsdioden | 50 |
| 4.3.2.1 RCD-Schutzbeschaltung mit Überlaufkondensator | 51 |
| 4.3.2.2 Schutzbeschaltung nach Marquardt und Undeland | 52 |
| 4.3.2.3 Schutzbeschaltung nach Wagner und McMurray | 53 |
| 4.3.2.4 Vergleich der Nachladeströme | 53 |
| 4.3.3 Verluste der Schutzbeschaltungen | 54 |
| 4.4 Einfluß des Rückstroms von Rückarbeitsdioden auf die Einschaltverlustenergie der Schutzbeschaltungen | 57 |
| 4.5 Verlustleistungen der verschiedenen Schutzbeschaltungen | 60 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5 | Schaltverhalten von Hochleistungs-GTO bei verschiedenen Schutzbeschaltungen | 62 |
| 5.1 | Schaltverhalten bei unsymmetrischer Schutzbeschaltung | 63 |
| 5.1.1 | Einschaltverhalten - ohne Strom in den Beschaltungsdioden | 64 |
| 5.1.2 | Einschaltverhalten - bei Strom in den Beschaltungsdioden | 66 |
| 5.1.3 | Ausschaltverhalten | 68 |
| 5.2 | Schaltverhalten bei symmetrischer Schutzbeschaltung | 70 |
| 5.2.1 | Einschaltverhalten | 71 |
| 5.2.2 | Ausschaltverhalten | 72 |
| 5.3 | Vergleich der Schaltvorgänge | 73 |
| 6 | Schaltverhalten von Rückarbeitsdioden bei verschiedenen Schutzbeschaltungen | 76 |
| 6.1 | Einschaltverhalten der Rückarbeitsdioden | 76 |
| 6.2 | Ausschaltverhalten der Rückarbeitsdioden | 77 |
| 6.3 | Simulation des Ausschaltvorgangs | 79 |
| 6.3.1 | Stationäre Ladungsträgerverteilung | 89 |
| 6.3.2 | Ladungsträgerverteilung während der Kommutierungs- und Verzugszeit | 81 |
| 6.3.3 | Beschreibung des Spannungsaufbaus | 82 |
| 6.3.4 | Vergleich der Simulation mit den Meßergebnissen | 84 |
| 7 | Schaltverluste von Hochleistungs-GTO | 86 |
| 7.1 | Schaltverluste konventioneller Hochleistungs-GTO bei unsymmetrischer Schutzbeschaltung | 87 |
| 7.1.1 | Einschaltverluste - ohne Strom in den Beschaltungsdioden | 88 |
| 7.1.2 | Einschaltverluste - bei Strom in den Beschaltungsdioden | 90 |
| 7.1.3 | Ausschaltverluste | 91 |
| 7.2 | Schaltverluste von Feinstruktur-(F-)GTO bei symmetrischer Schutzbeschaltung | 93 |
| 7.2.1 | Einschaltverluste | 93 |
| 7.2.2 | Ausschaltverluste | 96 |
| 8 | Schaltverhalten von Hochspannungs- IGBT | 98 |
| 8.1 | Aufbau und Funktionsprinzip der IGBT | 98 |
| 8.2 | Einschaltverhalten von Hochspannungs-IGBT | 100 |
| 8.2.1 | Einfluß der Rückarbeitsdiode auf den Einschaltvorgang | 102 |
| 8.3 | Ausschaltverhalten von Hochspannungs-IGBT | 105 |
| 8.3.1 | Begrenzung der Spannungssteilheit durch die Ansteuerung | 107 |
| 8.4 | Kurzschlußverhalten von Hochspannungs-IGBT | 109 |
| 9 | Zusammenfassung | 111 |
| 10 | Anhang | 113 |
| 10.1 | Hochspannungskreis des Prüfstands | 113 |
| 10.2 | Meßbereich und notwendige Grenzfrequenz der Meßglieder bei der Messung des Schaltverhaltens von GTO und IGBT | 115 |
| 10.3 | Äquivalente Ersatzschaltungen | 116 |
| 10.4 | Prinzipieller Aufbau der Prüfschaltungen | 117 |
| 10.5 | Meßverfahren zur Bestimmung parasitärer Induktivitäten von Beschaltungsmaschen in Schutzbeschaltungen | 118 |
| 10.6 | Strombegrenzung eines NPT-IGBT im Kurzschlußfall | 119 |
| 10.7 | Verzeichnis der untersuchten Leistungshalbleiter | 122 |
| 11 | Literaturverzeichnis | 123 |