

1 Einleitung

Der Leistungselektronik kommt bei allen zukünftigen Bemühungen, elektrische Energie sparsam und bedarfsgerecht einzusetzen sowie alternative Energiequellen effizient zu nutzen, eine Schlüsselrolle zu: Mit Frequenzumrichtern können Antriebe nach den momentanen Erfordernissen geregelt werden, wodurch ihr Gesamtwirkungsgrad steigt und ihre Betriebskosten sinken. Leistungselektronische Stellglieder werden zur Einspeisung von Wind- und Solarenergie in die Versorgungsnetze benötigt. Zur Speicherung elektrischer Energie in Akkumulatoren und Brennstoffzellen muss der Strom zunächst gleichgerichtet und später wieder wechselgerichtet werden.

1.1 Stand der Technik

In den letzten 15 Jahren hat der Pulswechselrichter mit abschaltbaren Halbleitern, vornehmlich mit Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs), eine herausragende Stellung in der Antriebstechnik aber auch in der Energieversorgung eingenommen. Selbst in regelungstechnisch anspruchsvollen Aufgabengebieten verdrängt der Frequenzumrichter-Antrieb den traditionellen Gleichstromantrieb. Einsatzgebiete von Pulswechselrichtern sind:

- Frequenzumrichter für Antriebs- und Servomotoren in der Industrie
- Unterbrechungsfreie Stromversorgungen für Rechenzentren und Relaisstationen
- Traktionsumrichter
- Antriebswechselrichter für Elektro- und Hybridfahrzeuge
- Netzanbindung von Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen und Brennstoffzellen
- Steuerung von Motoren in Haushaltsgeräten

Der Leistungsbereich von 100 W bis 1 MW wird praktisch mit einer einzigen Topologie, der Drehstrom-Brückenschaltung mit abschaltbaren Ventilen abgedeckt.

Es wird beständig daran geforscht, die Eigenschaften der Halbleiterbauelemente hinsichtlich ihrer Durchlass- und Schalteigenschaften zu verbessern. So

1 Einleitung

stehen durch Verwendung von Siliziumkarbid (SiC) als Basismaterial erstmals Dioden mit nahezu idealem Schaltverhalten ohne Rückwärtserholstrom zur Verfügung. In den letzten 15 Jahren konnte die Durchlassspannung von IGBTs stetig verringert werden, zuletzt noch einmal erheblich durch Ausnutzung der Trench-Gate-Technologie.

Auch auf dem Gebiet der Schaltungstechnik wurden in diesem Zeitraum Verbesserungen erzielt: Niederinduktiv aufgebaute Leistungsteile ohne Snubber sind zum Standard für hartschaltende Wechselrichter geworden. Gleichzeitig wurde eine Vielzahl von weichschaltenden Stromrichtertopologien erforscht und vorgestellt. Sie haben das Ziel, die Schaltverluste durch Abwesenheit von Strom und/oder Spannung am Halbleiter im Moment des Schaltens günstigstenfalls zu eliminieren.

Durch Reduktion der Schaltverluste kann Verlustenergie gespart werden, Halbleiterfläche und Kühlaufwand können verringert werden. Alternativ kann eine höhere Schaltfrequenz realisiert werden, wodurch sich Stromrippel und Zusatzverluste in der Last verringern und die Regelgüte steigt. Die weichschaltenden Wechselrichter lassen sich grob in drei Klassen einteilen:

1. **Schwingkreiswechselrichter**, in welchen die Last mit zusätzlichen Kondensatoren und/oder Drosseln zu einem Resonanzkreis erweitert wird. Sie eignen sich nur für einphasige Anwendungen mit einer festen Ausgangsfrequenz, z. B. für Schaltnetzteile, induktive Erwärmung oder Berührungslose Energieübertragung und sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.
2. **Resonant Link Inverters** vermeiden Schaltverluste dadurch, dass mit Hilfe eines Schwingkreises die charakteristische Größe des Zwischenkreises zu Null gezwungen wird, bevor die Schalter der Brücken ihre Schaltzustände wechseln. Besondere Varianten mit Hilfsschaltern im Resonanzkreis sind auch für Pulsweitenmodulation (PWM) geeignet.
3. **Resonant Transition Inverters** besitzen Netzwerke aus Kondensatoren und Drosseln innerhalb der Brücke. Eine Resonanz findet nur während der Schaltvorgänge statt. Damit sind sie prinzipbedingt für PWM geeignet. Die meisten verwenden zusätzliche Halbleiterventile, so genannte Hilfsschalter, durch die bei Bedarf eine weiche Kommutierung eingeleitet wird.

Die Wechselrichter der dritten Klasse wurden in den letzten Jahren intensiv weiterentwickelt, weil sie einen Eins-zu-Eins-Ersatz der verbreiteten hartschaltenden Pulswechselrichter mit Spannungszwischenkreis ermöglichen. Sie eignen sich außerdem besonders gut für hohe Leistungen, da die Hilfsschalter nicht größer dimensioniert werden müssen als die Schalter der Brücke. Als besonders aussichtsreicher Kandidat hat sich immer wieder der Auxiliary Resonant Comutated Pole Inverter (ARCPI) herauskristallisiert, da er in vielen Belangen

dem idealen Resonanzwechselrichter recht nahe kommt. Positive Eigenschaften sind:

- Die Strom- und Spannungsbeanspruchungen der Hauptschalter sind nicht höher als beim hartschaltenden Wechselrichter.
- Es lassen sich alle gängigen Steuerverfahren für hartschaltende Wechselrichter adaptieren, der resonante Kommutierungsvorgang entspricht dabei in etwa einer verlängerten Totzeit.
- Der Hilfszweig wird nur während einer Kommutierung beansprucht und fällt daher relativ klein aus.

Als Nachteile sind die große Zahl an Hilfsschaltern und die komplexe, laststromabhängige Steuerung der Schaltzeiten zu nennen. Zudem entstehen in dreiphasigen Anwendungen Probleme mit der Stabilität des geteilten Zwischenkreises. Ziel dieser Arbeit ist es, systematisch weitere Resonant Commutated Pole Varianten zu finden, welche diese Nachteile vermeiden.

1.2 Vorgehensweise

Nach einem Exkurs in die Technologie moderner Leistungshalbleiter und einer kurzen Einführung in die Themenbereiche hartes und weiches Schalten folgt ein Überblick über die wichtigsten Resonanzstromrichter, der mit einem Vorschlag zur systematischen Klassifizierung abgeschlossen wird.

In den vier weiteren Kapiteln wird je eine Resonant Commutated Pole Kommutierungszelle zunächst analytisch und dann experimentell untersucht. Besonderer Wert wird auf die Beschreibung aller möglichen Kommutierungsmodi gelegt.

Den Ausgangspunkt bildet der klassische ARCPI mit Spannungszwischenkreis. Seine Funktionsweise wird erläutert und es werden die Ergebnisse zusammengefasst, die mit einem optimierten 1-MVA-Versuchsumrichter für den Motorgenerator eines Schwungmassenspeichers erzielt wurden.

Das folgende Kapitel widmet sich dem weniger bekannten Stromzwischenkreis-ARCPI. Eine bestimmte Variante kommt mit nur zwei Hilfsschaltern für einen dreiphasigen Wechselrichter aus und erscheint auch aufgrund der Möglichkeit attraktiv, den kapazitiven Teiler auf einfache Weise über die Last zu stabilisieren. Daher wird ein dreiphasiger Versuchswechselrichter mit einer Scheinleistung von 10 kVA aufgebaut und vermessen.

Nach den Gesetzmäßigkeiten der Netzwerktheorie wird im darauf folgenden Kapitel aus der ARCP-Kommutierungszelle eine neue weichschaltende Kommutierungszelle abgeleitet. Sie wird wegen ihrer symmetrischen Topologie als *Resonant Commutated Twin Pole* (RCTP) bezeichnet. Ihre Funktionsweise wird

1 Einleitung

experimentell in einem einphasigen Aufbau mit Stromzwischenkreis überprüft. Dadurch, dass es in der neuen Zelle keine dezidierten Haupt- und Hilfsschalter mehr gibt, sondern jeder Schalter abwechselnd als Haupt- bzw. Hilfsschalter verwendet werden kann, wird die Symmetrierung des Teilers stark vereinfacht.

Das letzte Kapitel beschreibt die Untersuchung der aussichtsreicheren RCTP-Zelle am Spannungszwischenkreis, die auch einfacher zu steuern ist. Es wird ein dreiphasiger Wechselrichter mit 40-A-IGBTs gebaut, dessen Phasen in unterschiedlicher Technologie realisiert werden. Hartes und weiches Schalten mit und ohne SiC-Dioden wird direkt während des Betriebs an einem Asynchronmotor hinsichtlich der Halbleiter- und Gesamtverluste miteinander verglichen. Eine Beurteilung des neuen Konzepts und ein Ausblick auf mögliche Realisierungen schließen dieses Kapitel ab.

In der Zusammenfassung erfolgt ein Rückblick auf die Ergebnisse dieser Arbeit. Alle Formelzeichen und Abkürzungen werden im Anhang erläutert.

2 Schalten mit abschaltbaren Leistungshalbleitern

Im Gegensatz zum Thyristor, der von sich aus nur im Nulldurchgang des Stromes und somit verlustarm abschaltet, können moderne Leistungshalbleiter Ströme jederzeit unterbrechen. Um Überspannungen zu vermeiden, ergibt sich die Notwendigkeit, dem meist induktiven Strom einen Kommutierungspfad zur Verfügung zu stellen. Das geschieht in aller Regel durch Dioden, die einen so genannten Freilauf für den Strom ermöglichen. Entscheidend für die dabei auftretenden Verluste, die zu reduzieren das Hauptanliegen dieser Arbeit ist, sind die Eigenschaften der verwendeten Schalter und der Dioden.

2.1 Struktur und Eigenschaften aktueller Leistungshalbleiter

In diesem Abschnitt sollen in Kürze die Technologien der Leistungshalbleiter vorgestellt werden, die in dieser Arbeit zur Anwendung kommen. Da die Grundlagen des pn-Übergangs und der MOS-gesteuerten Halbleiter in der Literatur vielfach abgehandelt wurden, wird der Schwerpunkt auf Neuentwicklungen gelegt. Am Ende des Abschnitts wird auch auf Siliziumkarbid als neues Halbleitermaterial eingegangen.

2.1.1 Der Insulated Gate Bipolar Transistor

Historisch gesehen ist der *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) eine Weiterentwicklung des MOSFETs. Im Bereich der Sperrspannungen ab 600 V löste er Anfang der neunziger Jahre den Bipolartransistor als schaltendes Bauelement fast vollständig ab. Er vereint den Vorteil der einfachen und nahezu leistungslosen Steuerbarkeit eines MOSFETs mit der geringeren Durchlassspannung eines Bipolartransistors.

Ersetzt man in der Schichtenfolge eines vertikalen N-Kanal-MOSFETs die unterste (drainseitige) n^+ -Schicht durch eine p^+ -Schicht, entsteht das in Abbildung 2.1a gezeigte Schnittbild durch die Struktur eines konventionellen IGBTs. Genau wie der MOSFET wird der IGBT durch Anlegen einer positiven Spannung zwischen Gate und Source bzw. Emitter eingeschaltet. Die sich in der p^- -Wanne ausbildende n-Inversionsschicht erzeugt einen Kanal, durch den ein

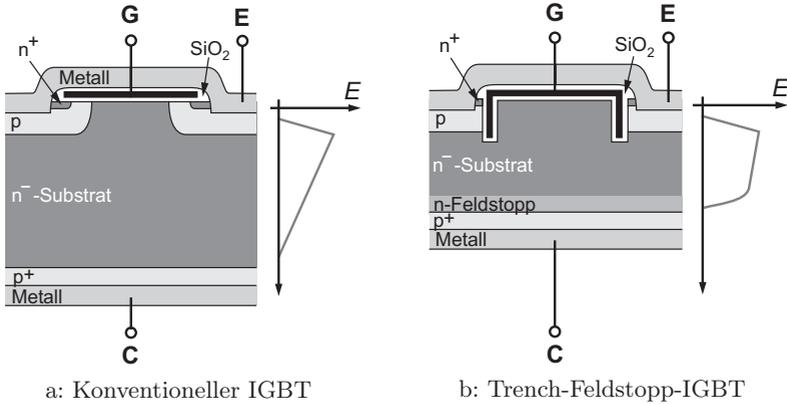


Abbildung 2.1: Aufbau von NPT-IGBTs und Verläufe der elektrischen Feldstärke in vertikaler Richtung unter Sperrspannung

Elektronenstrom vom Emitter in das n^- -Substrat und von dort über den in Durchlassrichtung gepolten pn-Übergang zur rückseitigen Metallisierung, dem Kollektoranschluss, fließen kann. Dabei injiziert die kollektorseitige p^+ -Schicht Löcher in das Mittelgebiet, die die Leitfähigkeit dieser ansonsten schwach dotierten Driftzone anheben. Man spricht von Leitwertmodulation, weil mit den zusätzlichen Löchern weitere Ladungsträger für den Stromfluss zur Verfügung gestellt werden. Die Durchlasskennlinie hat zwar eine geringere Steigung, verschiebt sich gegenüber der eines MOSFETs allerdings um die Schleusenspannung des besagten pn-Übergangs.

Aus dem ursprünglich unipolaren MOSFET wird so ein bipolares Bauelement mit deutlich verbesserter Leitfähigkeit des Mittelgebiets, so dass auch höhersperrende Schalter mit akzeptabler Durchlassspannung hergestellt werden können. Des Weiteren hat die kollektorseitige p-Schicht eine eingeschränkte Rückwärtssperrfähigkeit des Elements zur Folge, die, wie noch gezeigt werden wird, durch besondere Maßnahmen erhöht werden kann. Zumindest kann bzw. muss in Spannungszwischenkreisumrichtern die vom MOSFET her bekannte interne Body-Diode, also der pn-Übergang zwischen p-Wanne und Substrat, nicht mehr als Freilaufdiode genutzt werden. Durch Parallelschalten von geeigneten Leistungsdiode kann die notwendige Rückwärtsleitfähigkeit erzielt, aber auch Einfluss auf das Schaltverhalten genommen werden.

Der Trench-IGBT

In den neunziger Jahren wurden die ersten Trench-IGBTs vorgestellt. Hier sind, wie in Abbildung 2.1b gezeigt, die Gateelektroden senkrecht zur Halbleiteroberfläche in geätzten Gräben (engl.: trenches) untergebracht. Durch die Verkleinerung der p-Wannen kann der Abfluss von Löchern aus der Driftzone begrenzt werden. Gleichzeitig vergrößert sich durch den erhöhten Abstand zwischen den einzelnen Zellen der Wirkungsgrad des n-Emitters, bestehend aus n^+ -Gebiet und leitfähigem Kanal, was insgesamt eine Erhöhung der Konzentration freier Ladungsträger im emittierenden Bereich des Mittelgebiets zur Folge hat. Die Durchlassspannung sinkt, ohne dass das Schaltverhalten wesentlich beeinflusst würde, weil beim Ausschalten hauptsächlich die im unteren Teil der Driftzone vorhandenen freien Ladungsträger ausgeräumt werden müssen.

Das Feldstopp-Prinzip

Neben den Schnittbildern in Abbildung 2.1 sind die Verläufe der elektrischen Feldstärke in vertikaler Richtung für den Fall skizziert, dass die IGBTs volle Sperrspannung aufgenommen haben. Die linke IGBT-Struktur wird mit *Non-Punch-Through* (NPT) bezeichnet, weil das Feld innerhalb der Driftzone komplett abgebaut wird und nicht darüber hinaus „durchgreift“. Der rechts abgebildete Trench-IGBT verfügt über eine zusätzliche n-dotierte Pufferschicht, die sog. Feldstopp-Schicht, in der die Feldstärke auf kürzerem Wege abgebaut wird, als es im schwach dotierten Mittelgebiet möglich wäre. Deshalb kann mit einem dünneren Substrat gearbeitet werden, was die Durchlassspannung weiter verringert.

Die Schichtenfolge gleicht der eines *Punch-Through*-IGBTs (PT), die Herstellung erfolgt aber nicht auf Basis eines p-Substrats mit n-Epitaxieschicht, sondern auf einem n-dotierten Wafer. Daher ist die kollektorseitige p^+ -Schicht viel dünner. Es ergibt sich ebenso ein trapezförmiger Felstärkeverlauf, jedoch mit einem weichen Übergang zwischen n^- - und n-Schicht, weil bei dem hier angewandten Verfahren der Rückseiten-Ionenimplantation keine homogenen Schichten wie bei der Epitaxie erzeugt werden können. Auch wird auf eine Trägerlebensdauereinstellung durch Dotierung mit Fremdatomen verzichtet (vgl. [1], S. 265). Im Gegensatz zu PT-IGBTs besitzen NPT-IGBTs auch mit Feldstopp-Schicht einen positiven Temperaturkoeffizienten, der eine symmetrische Stromaufteilung in einer Parallelschaltung aus mehreren Chips begünstigt. Daher ist die Feldstopp-Technologie im Begriff, die PT-IGBTs gänzlich vom Markt zu verdrängen. Von manchen Herstellern wird dasselbe Prinzip auch als *Soft-Punch-Through* (SPT) oder *Light-Punch-Through* bezeichnet.