

1 Einleitung

Klassische Antriebsstränge bestehen aus hart am Netz betriebenen elektrischen Maschinen, einem System, das nur geringfügige Stelleingriffe erlaubt oder, sofern eine Regelung notwendig ist, aus der elektromechanischen Verkopplung mehrerer Maschinen besteht. Als Beispiel sei hier der Leonard-Umformer genannt. Kurz nach der Entwicklung des Bipolartransistors wurde 1957 der Thyristor von General Electric unter dem Namen *silicon controlled rectifier (SCR)* als erstes steuerbares Leistungshalbleiterbauelement auf den Markt gebracht. Vergleichbar zu der raschen Entwicklung der Anwendungen von Transistoren in der Nachrichtentechnik führten die Thyristoren zu einer revolutionären Entwicklung in der Leistungselektronik. Elektrische Maschinen wurden zunehmend von Stromrichtern gespeist, so dass relativ kostengünstig ein drehzahlvariabler Antrieb mit gutem Wirkungsgrad und geringerem Aufwand als bisher zur Verfügung stand. Der *insulated-gate bipolar transistor (IGBT)*, 1979 erfunden, etablierte sich bald wegen seiner guten Eigenschaften, insbesondere bezüglich des Abschaltverhaltens und der geringen Ansteuerleistung als das maßgebliche Leistungshalbleiterbauelement für Antriebe geringer bis mittlerer Leistung. Aufgrund der genannten und weiteren positiven Eigenschaften bestand fortan die Möglichkeit hochfrequent taktende Pulsrichter zu konstruieren, die durch entsprechende Regelungen ausgestattet und Asynchronmaschinen speisend, heutzutage die Antriebsqualität von Systemen mit Gleichstrommaschinen erreichen. Während die Schaltzeiten der Thyristoren eher im μs -Bereich angesiedelt sind, wurden die Schaltzeiten der IGBT kontinuierlich kürzer und liegen heutzutage bei 100 - 200 ns, wobei die Anstiegszeiten, als kritische Größe, noch geringer sind. Zwar kommt diese Eigenschaft der Verringerung von Schaltverlusten zu Gute, wodurch eine Bauraumverkleinerung und Schaltfrequenzerhöhung ermöglicht wird, doch treten beachtliche parasitäre Effekte auf, die die Lebensdauererwartung der Maschine drastisch verringern können und die zunächst unterschätzt wurden. Das durch die steilen Schaltflanken hervorgerufene hohe Oberschwingungsspektrum führt, sofern die Motorleitung eine bestimmte Ausdehnung, eine kritische Länge, erreicht oder überschreitet dazu, dass die Motorleitung selber als elektrisch ausgedehntes System nicht mehr durch ein einfaches Netzwerk konzentrierter Elemente oder gar als ideale elektrisch leitende Verbindung zwischen Wechselrichter und Motor dargestellt werden kann. Vergleichbare Umstände liegen in der Maschine, seitens der Maschinenwicklung vor. Zur Beschreibung der transienten Vorgänge müssen gemäß eines verteilten elektrischen Systems, bei dem die elektrischen Größen eine Ortsabhängigkeit erhalten, leitungs- oder feldtheoretische Ansätze verfolgt werden. Dabei zeigt sich, dass an der Maschine Spannungen auftreten, deren Amplituden ein vielfaches der Zwischenkreisspannung des Umrichters entsprechen. In der Maschinenwicklung erfolgt zusätzlich eine unsymmetrische Spannungsverteilung, die lokale elektrische Feldüberhöhungen zur Folge haben kann und somit das

Problem durch die äußere Überspannung weiter verschärft. Herkömmliche Maschinen, die für den Betrieb am 50 Hz oder 60 Hz Drehstromsystem ausgelegt waren, hielten diesen Belastungen nicht stand. Ein Wicklungsschaden durch einen Totaldurchschlag erfolgte unverzüglich oder infolge von Teilentladungen nach einer bestimmten Betriebsdauer. Daraufhin wurde die maximal zulässige Spannungsanstiegsgeschwindigkeit für Niederspannungsmotoren international auf $500 \text{ V}/\mu\text{s}$ festgelegt, ein Wert der in der Literatur und auch sehr häufig bei Produktbeschreibungen zu Motorfiltern wiederzufinden ist. In der DIN EN 60034 wurde dieser Wert durch eine Grenzkennlinie der maximalen Spannung über der Anstiegszeit ersetzt, nach der höhere Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten als $500 \text{ V}/\mu\text{s}$ zulässig sind. Für Motoren, die speziell für den Umrichterbetrieb konstruiert wurden, existiert mittlerweile eine eigene Norm, die ebenfalls Grenzkennlinien enthält, nach denen solche elektrische Maschinen noch belastbarer seitens Überspannungen und Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten sind.

Die Weiterentwicklung der Maschinenisolationssysteme hat zu deutlich robusteren Motoren geführt, stellt jedoch keine absolute Lösung der Überspannungsproblematik dar. Nach wie vor werden kostenintensive und geometrisch große Systeme, die in der Regel aus Filterschaltungen bestehen, verwendet um die zulässigen Grenzwerte einzuhalten. Die Initiierung der Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet beruhte auf diversen Anfragen bezüglich der Möglichkeiten Überspannungen zu reduzieren. Auch zeigte sich in zahlreichen Gesprächen, dass zum Einen sehr viel Unkenntnis auf diesem Gebiet besteht und zum Anderen nach wie vor kostengünstige Lösungen gesucht werden. Dies gilt auch für Mittelspannungsantriebe, bei denen man meinen möchte, dass die zusätzlichen Kosten etablierter Gegenmaßnahmen verschwindend gering im Vergleich zu den Gesamtsystemkosten sind. Den Forschungsanstrengungen folgte die Entwicklung des sogenannten Schirmabschlussverfahrens, dessen Dokumentation in dieser Arbeit ausführlich durchgeführt wird. Es stellt wegen einiger besonderer Eigenschaften nicht nur eine Alternative zu den üblich verwendeten Verfahren dar. Hervorstechend sind die unerhebliche zusätzliche maschinenseitige Masse, der kleine notwendige Bauraum und die geringen Verluste, die das Verfahren besonders für die nachträgliche Integration in einen bestehenden Antriebsstrang, unter der Verwendung geschirmter Leitungen, favorisieren. Auch in bewegten Systemen, deren Trägheitsmoment möglichst gering bleiben sollte, bietet sich der Einsatz des Schirmabschlussverfahrens an.

Das vorwiegende Ziel dieser Arbeit sei die Dokumentation des Schirmabschlussverfahrens hinsichtlich der Wirkungsweise, der Auslegung und der Analyse an Beispielsystemen zur Erlangung greifbarer Eigenschaften zum direkten Vergleich mit anderen Verfahren. Des Weiteren werden existierende Technologien und Systeme zur Reduktion der transienten schädlichen Wirkungen an wechselrichter gespeisten Maschinen zusammengestellt und detailliert beschrieben. Die Ausführlichkeit die-

ses Kapitels, das als „Stand der Technik“ definiert werden könnte, begründet sich in der zu diesem Thema sehr raren und häufig unvollständigen Fachliteratur.

Die Vorgehensweise sieht zunächst eine kurze Einführung in die Leitungstheorie vor, die so strukturiert ist, dass wesentliche, für die Beschreibung des Schirmabschlussverfahrens notwendige Aussagen behandelt werden. Der Beschreibung des eigentlichen Problems und seinen Auswirkungen folgt die Zusammenstellung bekannter Gegenmaßnahmen. Der darauf folgende Beweis der Funktionalität des Schirmabschlussverfahrens und seinen Messungen an Beispielsystemen geschieht unter bewusster Abgrenzung zu einem RC-Anpassnetzwerk, mit dem das Schirmabschlussverfahren zwar verwandt ist, jedoch nicht von diesem abgeleitet werden kann. Ein Vergleich stellt am Ende der Arbeit ausgewählte gängige Verfahren in Relation, vorwiegend um eine Abwägung zwischen jeweils diesen und dem Schirmabschlussverfahren durchführen zu können.