

Vorgängerarbeit auf dem Gebiet der Umrichter mit resonanter Summenlöschung im Zwischenkreis:

Klaus Bornhardt: „Neue GTO-Umrichter mit erhöhter Schaltfrequenz“ Darmstädter Dissertation 1991 (Übersicht)

Gegenstand der Arbeit ist die Entwicklung von spannungseinprägenden GTO-Umrichtern, deren Schaltverluste so weit reduziert sind, daß ein wirtschaftlicher Betrieb bei höheren Schaltfrequenzen möglich ist. Beim "klassischen" GTO U-WR begrenzen u.a. die in den Halbleitern und vor allem in deren Beschaltung anfallenden Verluste die (-wirtschaftlich sinnvoll-) erreichbare Schaltfrequenz.

Schaltverluste werden minimiert, wenn während der Schalthandlung die Halbleiter spannungs- und/oder stromlos sind und der Schaltungsteil, der den spannungs- und/oder stromlosen Zustand erzeugt seinerseits verlustminimal arbeitet. Hierzu sind Techniken bekannt, die mittels eines L-C-Schwingkreises entweder lastseitige Größen (load-resonant converter) oder Zwischenkreis-Größen (resonant {dc}-link) so erzeugen, daß die Halbleiter spannungs- und/oder stromlos schalten können. Bei der Anwendung in Antriebs-Umrichtern haben obige Techniken jedoch schwerwiegende Nachteile, z.B. hinsichtlich der Spannungs- und Strombeanspruchung der Bauelemente.

In den 70er Jahren, als noch keine abschaltbaren Elemente (GTO's) verfügbar waren, etablierten sich eine Reihe von L-C-Löschsaltungen in zahlreichen industriellen Thyristor-Umrichtern. Bekanntlich kommutieren diese Löschsaltungen den Strom vom Thyristor ab und stellen für ihn die Schonzeit bereit. Die von H. Bornhardt verfolgte Kombination von abschaltbarem Thyristor (GTO) und geeigneter Löschsaltung führt letztendlich zu verlustarmen GTO-Umrichtern, die mit hoher Schaltfrequenz betrieben werden können.

Im ersten Kapitel untersucht H. Bornhardt experimentell den Einfluss einer Reihe von Parametern auf die Ausschaltverluste eines GTO's bei sperrspannungsfreier Löschung. Bekanntlich können Löscheinrichtungen gegliedert werden in solche, die

- a) vor dem Bereitstellen der Schonzeit das zu löschende Haupt-Ventil mit einen zusätzlichen Vorwärts-Strom (Umschwingstrom) belasten und solche, die
- b) die Schonzeit ohne Belastung durch zusätzlichen Vorwärtsstrom bereitstellen (Hilfsventil, Löschartett usw.).

Messungen bestätigen, daß Typ a) aufgrund des unmittelbar vorangegangenen höheren Vorwärtsstromes die höheren Ausschaltverluste im GTO erzeugt. Daher sind die im Kap. 2 realisierten kompletten Umrichter mit einer Löschsaltung vom Typ b) aufgebaut.

Kap.1 schließt mit einer vergleichenden Verlustabschätzung der Löschsaltung einerseits und der klassischen RCD-Beschaltung andererseits. Für einen GTO mit $U_0=3\text{kV}$, $I_0=2\text{kA}$ hat die Löscheinrichtung mit $t_{\text{Schon}}=t_{\text{Schweif}}/2$ nur rund 1/3 der Verluste der klassischen RCD-Beschaltung.

Im zweiten Kapitel werden zwei neue GTO-Umrichterschaltungen mit zusätzlicher Zwangskommütierung vorgestellt. Um den Aufwand für die zusätzliche Zwangskommütierung gering zu halten, werden weder Schaltungen mit Einzellöschung noch mit Phasenlöschung betrachtet sondern die **Summenlöschung** aller GTOs durch eine gleichspannungsseitige Löschsaltung. Während der Kommutierung erzeugt die Umrichterbrücke bei Summenlöschung einen allpoligen Kurzschluß. Daher ist während der Kommutierung eine Entkopplung von Brücke und Zwischenkreis erforderlich. Hierzu untersucht H. Bornhardt zwei Alternativen:

- 1.) Entkopplung durch eine Kommutierungsdrossel und
- 2.) Entkopplung durch einen zusätzlichen Halbleiterschalter.

- 1.) Entkopplung durch Kommutierungsdrossel.

Während der Kommutierung nimmt die Drossel die Gleichspannung U_d auf. In der kommutierungsfreien Zeit muß eine entgegengesetzt gleich große Spannungszeitfläche angelegt werden. Dazu wird eine zusätzliche Gleichspannungsquelle (im Beispiel $0,1U_d$) benötigt. Diese kann je nach speisendem Netz entweder durch einen zusätzlichen Gleichstromsteller in Zwischenkreis oder -wie im Versuchsaufbau ausgeführt- durch einen zusätzlichen netzgeführten Stromrichter realisiert werden.

Liefert das speisende Netz Gleichspannung (z.B. Nahverkehr), dann wird man einen Gleichstromsteller als Hilfsspannungsquelle einsetzen. Im Wechselrichterbetrieb des GTO-Umrichters fließt jedoch durch diesen Steller ein großer Gleichstrom, was entsprechenden Aufwand verursacht.

Liefert das Netz Drehspannung und ist Energierückspeisung verlangt, so kann man -wie bei allen U-Umrichtern- zwei antiparallele Drehstrombrücken als netzseitige Stromrichter verwenden. Setzt man die Drehspannung der rückspeisenden Brücke über einen (Spar-) Trafo um ca. 10% hoch, so kann die Rückspeisebrücke

gleichzeitig die Funktion obiger Hilfsspannungsquelle mit übernehmen, wobei allerdings zusätzlich zum Laststrom ein Kreisstrom zwischen beiden Brücken zirkuliert.

Um die GTO-Ausschaltverluste zu minimieren enthält die Löschschtaltung im Versuchsaufbau ein Löschartett wodurch den GTOs der Umschwingstrom unmittelbar vor ihrem Löschen erspart bleibt. Weiterhin wird das du/dt durch eine kleine RCD-Beschaltung begrenzt.

Die am Versuchsaufbau (15kW, Schaltfrequenz bis 20KHz) gemessenen Systemgrößen stimmen gut mit den zuvor per Simulation ermittelten Verläufen überein.

2.) Entkopplung durch Zwischenkreisschalter.

Im zweiten Versuchsaufbau verwendet H. Bornhardt einen zusätzlichen Schalter bestehend aus GTO und antiparalleler Diode um den Gleichspannungszwischenkreis von der Umrichterbrücke während der Zwangskommutierung abzutrennen. Zwischen Gleichspannungszwischenkreis und diesem Schalter ist die Löschschtaltung angeordnet, die mit einer ersten Teilschwingung den GTO des obigen Schalters löscht um anschließend nach einer Umschwingung die GTOs der Umrichterbrücke zu löschen. Die Umschwingung wird zwecks Entlastung der Hauptventile an der GTO-Brücke vorbei über ein zusätzliches Umschwingventil geführt; ebenso erhält der GTO des Zwischenkreisschalters ein paralleles Umschwingventil. Wie im ersten Versuchsaufbau wird zur weiteren Entlastung eine kleine du/dt Beschaltung für die ganze Umrichterbrücke eingesetzt. Da die Löschschtaltung an die Mittelanzapfung des GS-Zwischenkreises angeschlossen ist, verlaufen die Umschwingungen jeweils nur über $U_d/2$, wodurch die Verluste reduziert werden. Der GTO des Zwischenkreisschalters muß für den 3-fachen Strom eines GTOs der Umrichterbrücke ausgelegt werden. Bei diesem Umrichter gibt es im Gegensatz zum ersten keine Besonderheiten bei Energierückspeisung.

Auch die am zweiten Versuchsaufbau (15kW, Schaltfrequenz bis 20KHz) gemessenen Systemgrößen stimmen gut mit den zuvor per Simulation ermittelten Verläufen überein.

Die zuvor besprochenen Leistungsteile benötigen zum verlustarmen Betrieb auch auf die Summenlöschung angepasste Modulationsverfahren. Im dritten Kapitel werden drei angepasste Modulationsverfahren hergeleitet, schaltungstechnisch realisiert, experimentell verifiziert und miteinander verglichen. Bei den üblichen Umrichtern mit Einzel- oder Phasenlöschung wird jeder Strang zu einem anderen Zeitpunkt geschaltet. Bei Summenlöschung dagegen werden zuerst alle GTOs gelöscht, anschließend leiten nur Dioden. Daraufhin kann in jedem Strang die Diode durch Einschalten des GTOs gelöscht werden. Erst wenn in jedem Strang ein GTO leitet, muß die Löscheinrichtung erneut aktiviert werden. Die drei untersuchten und realisierten Verfahren sind:

- a) Zweipunktstromregler: Einschalten des GTO bei $i_{\text{soll}}=i_{\text{ist}}$, Löschen in festem Raster.
 - b) Verbessertes Unterschwingungsverfahren: Der gewünschte Spannungsmittelwert wird eingestellt indem in jedem 60° -Intervall nur in zwei Strängen geschaltet wird. Das gibt für jeden Strang pro 360° zwei umschaltungsfreie 60° -Intervalle.
 - c) angepasste Raumzeigermodulation: Wird bei Summenlöschung wesentlich komplexer, da weder die Anfangslage des Raumzeigers (nach Löschung aller GTOs) noch die daraus durch Zündung eines GTOs pro Strang folgenden Raumzeiger benachbart zum Soll-Raumzeiger liegen müssen.
- Diese auf die Summenlöschung angepassten Modulationsverfahren erzeugen bei gleicher Schaltfrequenz größere Spannungsüberschwingungen als die üblichen Modulationsverfahren, ein Teil der Verluste wird also vom Umrichter in die Last (Maschine) verlagert. Modulationsverfahren c) liefert die besten Ergebnisse, hat aber den höchsten Realisierungsaufwand, da ein Signalprozessor TMS320-10 bei 20kHz Schaltfrequenz damit voll ausgelastet ist.

Im vierten Kapitel werden Verluste und Aufwand bei bekannten und den neuen Umrichterschaltungen verglichen.

Da die Verlustreduzierung im GTO aufgrund zusätzlicher Zwangskommutierung bereits in Kap.1 erörtert wurde, wird hier nur ein Verlustvergleich der Löschschtaltungen untereinander in bezogenen Größen gegeben. In der als Vergleichsbasis dienenden Löschschtaltung nach Mc.Murray entstehen z.B. bei 12kHz 1% bezogene Verluste während die von H. Bornhardt vorgeschlagenen neuen Schaltungen hier nur ca. 0.5% bezogene Verluste erzeugen [Bild 4.3b]. Andererseits verlagert die Summenlöschung einen Teil der Verluste in die Maschine.

Abschließend wird ein mit den bekannten Schwierigkeiten behafteter Aufwandsvergleich durchgeführt, der zu dem Ergebnis kommt, daß der "Aufwand" für die neuen Schaltungen ca. 1/3 höher ist als beim konventionellen GTO-Umrichter.