

Götz Lipphardt : „Ein Beitrag zur Anwendung zwangskommutierter Schaltungen in Systemen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung“ Darmstädter Dissertation 1997 (Übersicht)

Die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) hat heute einen relativ stabilen und hochentwickelten technischen Stand erreicht. Dieser ist im Leistungsstellglied gekennzeichnet durch 12-pulsige, netzgeführte Thyristor-Stromrichter, meistens mit wassergekühlten Ventilen im Innenraum - Aufstellung. Die Entwicklung der HGÜ-Thyristoren in den zurückliegenden 20 Jahren führte dazu, daß die Sperrfähigkeit zu immer höheren Spannungen hin wuchs, so daß die Anzahl der in Reihe zu schaltenden Thyristoren deutlich reduziert werden konnte, während die Stromgradfähigkeit der HGÜ-Thyristoren schon seit längerer Zeit so groß ist, daß auf Parallelschaltung von Thyristoren in einem HGÜ-Ventil verzichtet werden kann.

Die informationsverarbeitenden Funktionen von Steuerung, Regelung und Schutz werden vornehmlich durch Mikrorechner realisiert. Diese ermöglichen Verbesserungen des dynamischen Verhaltens, z.B. beim „Wieder-Hochfahren“ nach Fehlerfällen. Hierzu wurde mit der am hiesigen Institut entstandenen Dissertation „Verbesserung des Verhaltens einer HGÜ nach drehstrom- und gleichstromseitigen Netzstörungen“ (Zong, 1992) ein wichtiger Beitrag geleistet.

Trotz des hohen Reifegrades der netzgeführten Thyristor-Stromrichter gibt es einige wenige prinzipbedingte Punkte, deren Verbesserung wünschenswert ist. Insbesondere bei Wechselrichtern am schwachen Drehstromnetz ist die Anfälligkeit für Kippungen bei netzgeführten Stromrichtern ein Problem, das durch zwangskommutierte HGÜ-Wechselrichter beseitigt werden kann. Für den seltenen Fall des reinen Inselnetzes ohne Eigenerzeugung kommen ebenfalls nur zwangskommutierte HGÜ-Wechselrichter in Frage. Eine weitere, im Prinzip unerwünschte Eigenschaft sowohl der HGÜ-Gleichrichter als auch der HGÜ-Wechselrichter ist deren arbeitspunktabhängiger Bedarf an Grundsicherungs- Blindleistung. Als ein weiteres Ziel kann die Reduzierung der Stromüberschwingungen angesehen werden, die von den heutigen netzgeführten 12-Puls-Stromrichtern dem Netz eingepreßt werden, und die anschließend mit Hilfe von passiven Filterkreisen reduziert werden müssen. Zur Reduzierung der niederfrequenten Stromüberschwingungen (11., 13. Oberschwingung) könnten in fernerer Zukunft möglicherweise auch die HGÜ-Stromrichter selbst herangezogen werden, was den Übergang auf selbstgeführte, mit höherer Schaltfrequenz betriebene HGÜ-Stromrichter erfordern würde.

In der Vergangenheit wurden bereits zahlreiche Untersuchungen über selbstgeführte Stromrichter in HGÜ-Systemen durchgeführt, unter anderem am hiesigen Institut mit der Dissertation „Anwendung von zwangskommutierten Schaltungen bei HGÜ-Anlagen“ (Michel, 1982). Zu der damaligen Zeit war der zwangskommutierte Thyristor-Wechselrichter mit geeigneten Löschkreisen der einzig sinnvolle Untersuchungsgegenstand.

Vornehmlich durch die Drehstrom-Antriebstechnik in der Traktion, neuerdings noch zusätzlich durch Bahnstromspeisungen, haben sich GTO-Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis mit einer Leistung von mehreren MW etabliert. Verfügbar sind heute GTOs mit einer Sperrspannung von 4,5 kV und einem abschaltbaren Strom von 1...2kA. Eine weitere Erhöhung der Sperrspannung wird nicht lange auf sich warten lassen. Daher scheint es sinnvoll zu sein, die Frage der Anwendbarkeit von selbstgeführten Stromrichtern in HGÜ-Systemen vor dem Hintergrund der zu erwartenden GTOs erneut zu diskutieren. Mit dieser Aufgabe haben sich auch einige aus der Literatur bereits bekannte Arbeiten befaßt, allerdings wird dabei bevorzugt der Wechselrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung behandelt.

Ziel der Arbeit von Herrn Lipphardt ist es nun nicht, die bereits in der Literatur analysierten Schaltungen erneut im Detail zu behandeln. Vielmehr wird zunächst eine Übersicht über den Stand der Untersuchungen zu selbstgeführten Stromrichtern für HGÜ-Anwendungen gegeben. Dabei geht es vor allem darum die verschiedenen bisher betrachteten Schaltungsvarianten zu klassifizieren und grob zu bewerten. Es ergeben sich folgende 3 Gruppen:

- 1) GTO-Wechselrichter mit konstanter Gleichspannung (GTO-UWR)
- 2) Thyristor-Wechselrichter mit Kommutierungsschaltungen und eingepreßtem Gleichstrom und
- 3) GTO-Wechselrichter mit eingepreßtem Gleichstrom (GTO-IWR)

Die meisten Untersuchungen aus der Literatur beziehen sich auf die klassische Schaltung des 2-Stufen-GTO-UWR. Eigene Untersuchungen von Herrn Lipphardt vergleichen damit den 3-Stufen-UWR, der auch in einer schwedischen Dissertation für HGÜ-Anwendungen diskutiert wird. Die Weiterführung des 3-Stufen-Prinzips zum allgemeinen N-Stufen-UWR dürfte aufgrund der schnell wachsenden Komplexität dieser Schaltungen kaum ein praktikabler Weg sein.

Die Schaltungsvielfalt bei den Thyristor-Wechselrichtern mit eingepreßtem Gleichstrom ist wesentlich größer. Herr Lipphardt vergleicht hierzu grob acht Schaltungsvarianten. Als derzeit aussichtsreichste Schaltung scheint

auf diesem Gebiet die Schaltung mit Reinkompensation zu sein, die bereits auf Arbeiten aus dem Jahre 1954 zurückgeht. Aktuell dürfte diese Schaltung deshalb sein, weil sie durch ABB unter dem Schlagwort „HVDC 2000“ propagiert wird.

Die 3 Varianten des GTO-Wechselrichters mit eingprägtem Gleichstrom unterscheiden sich vornehmlich hinsichtlich der Kondensatoren, welche die in den Streuinduktivitäten des Stromrichtertransformators gespeicherte magnetische Energie während des Kommutierungsvorganges aufnehmen müssen.

Da der selbstgeführte, mit GTOs aufgebaute, stromeinprägende Wechselrichter vergleichsweise wenig in der Literatur behandelt ist, greift Herr Lipphardt diese Schaltung auf, um sie hinsichtlich ihres stationären und dynamischen Verhaltens detailliert zu untersuchen, und zwar für folgende HGÜ-Topologien:

- 2-Punkt-HGÜ
- Parallele Mehrpunkt-HGÜ
- 2-Punkt-HGÜ mit Serienanzapfung.

Herr Lipphardt untersucht das Systemverhalten, während WR- interne Fragen, insbesondere die notwendige Reihenschaltung der GTOs, nicht Gegenstand der Arbeit ist. Zunächst ist das zur Kommutierung erforderliche netzseitige Filter auszulegen. Die Eigenfrequenz dieses LC-Filters muß einerseits deutlich über der Netzfrequenz und andererseits deutlich unter den Frequenzen, die aufgrund des Stromrichters erzeugt werden, liegen. Damit wird das Produkt aus L und C festgelegt. Zur Bestimmung der Kapazität dient die Vorgabe einer maximal zulässigen Spannungsänderung.

Eng verknüpft mit dieser Auslegung ist die Wahl des Steuerverfahrens für den GTO-IWR. Dabei wird eine maximale Schaltfrequenz der GTOs von 400 Hz angesetzt. Das einfachste Steuerverfahren ergibt sich, wenn man das vom UWR her bekannte Unterschwingungsverfahren (Schnittpunkt von Sinus und Dreieck) auf den IWR überträgt. (Diss. Jenni, ETH 1989). Dieses hier als modifizierte symmetrische PWM bezeichnete Verfahren liefert netzseitige Stromüberschwingungen mit Ordnungszahlen 5, 7, 11, 13...

Wie beim netzgeführten Thyristorwechselrichter wird auch hier beim GTO-IWR die gleichstromseitige Reihenschaltung zweier Brücken bei drehstromseitiger Parallelschaltung über Transformatoren mit einer Phasenschwenkung von 30° durchgeführt. Sammelschienenseitig werden damit die Stromüberschwingungen der Ordnungszahlen 5 und 7 eliminiert. Es verbleiben als niedrigste Stromharmonische die 11-te und 13-te. Konsequenterweise versucht Herr Lipphardt die Elimination einer dieser Stromharmonischen durch ein entsprechendes Steuerverfahren. Bei einer Pulszahl von 8 ($50 \text{ Hz} \times 8 = 400 \text{ Hz}$) enthält das Pulsmuster 2 unabhängige Schaltwinkel. Die beiden damit gegebenen zwei Freiheitsgrade können genutzt werden um 1.) die Grundschriftungsamplitude einzustellen und 2.) eine Oberschwingung zu eliminieren. Beim IWR muß sowohl in der oberen Ventilgruppe als auch in der unteren Ventilgruppe zu jedem Zeitpunkt genau ein Ventil leiten. Dies führt zu Randbedingungen für die Bereiche, in denen die Schaltwinkel liegen müssen. Zur Elimination der 11. oder 13. Oberschwingung müßten die Schaltwinkel in Bereichen liegen, die obige Randbedingungen verletzen. Daher ist es nicht möglich die 11. oder 13. Stromüberschwingung durch das Pulsmuster zu eliminieren. Wohl aber könnten die 5. oder die 7. eliminiert werden.

In Tabelle 3.1 (Seite 29) werden Regel- und Steuerverfahren für den GTO-IWR, so wie sie aus der Antriebstechnik bekannt sind, gegenübergestellt. Je nach Art der Behandlung der Zustandsgrößen (U_C , I_D) des zur Kommutierung erforderlichen Filters lassen sich die aus der Literatur bekannten Verfahren in 4 Gruppen einteilen. Im einfachsten Fall, den letztendlich Herr Lipphardt dann auch weiter verwendet, werden die netzseitigen Zustandsgrößen überhaupt nicht in die Regelung zurückgeführt. Die 2. Gruppe berücksichtigt die Zustandsgrößen des netzseitigen Filters in der überlagerten Regelung. In der 3. Gruppe wird die Kondensatorspannung direkt im Steuerverfahren berücksichtigt. Ein neues und interessantes Steuerverfahren bildet die 4. Gruppe. Ausgangspunkt ist dabei ein off-line optimiertes Pulsmuster. Dieses dient nur als Richtschnur, Abweichungen der Schaltzeitpunkte von diesem optimierten Pulsmuster werden on-line so errechnet, daß der Energieinhalt des L-C-Filters minimal wird. (Vogel, EPE 1995). Da dieses Verfahren erst gegen Ende der Arbeit von Herrn Lipphardt bekannt wurde, war eine Berücksichtigung in den Simulationsrechnungen nicht mehr möglich.

Im darauf folgenden Abschnitt werden die stationären Kennlinien anhand einer vereinfachten einphasigen Grundschriftungs-Ersatzschaltung hergeleitet. Mit den beiden unabhängigen Stellgrößen Aussteuergrad „m“ und Phasenwinkel „ Φ_{10} “ können zwei Regelziele erreicht werden:

Die Regelung des Gleichstroms I_D mit Hilfe von „m“ und die Regelung der Sammelschienenspannung U_t oder alternativ die Regelung der Blindleistung $Q=0$ mit Hilfe der Stellgröße „ Φ_{10} “. Es ergeben sich U_t - I_D -Kennlinien mit positiver Steigung, d.h. positivem Widerstand, so daß eine Verbesserung der Stabilität gegenüber dem netzgeführten Wechselrichter zu erwarten ist. Der Betrieb mit $Q=0$ ist natürlich nur oberhalb eines Mindestgleichstromes möglich. Dieser Mindestgleichstrom muß in der Lage sein, die Kondensatoren genügend zu laden, so daß sie nicht vom Netz her geladen werden müssen.

Ein Kriterium zur Beurteilung der Stabilität des GTO-IWR stellt die „Maximale Verfügbare Leistung (Maximum available Power, MAP) dar. Dabei wird der Zusammenhang $P_{dmax}=f(I_d)$ ermittelt. Herr Lipphardt vergleicht die MAP-Kurven des netzgeführten Wechselrichters mit denen des GTO-IWR. Beim netzgeführten Wechselrichter nimmt die Gleichspannung mit wachsendem Gleichstrom kontinuierlich ab. Die maximale Leistung wächst zunächst mit wachsendem Gleichstrom, erreicht dann ein Maximum bei typisch 1,3-fachem Nenngleichstrom und hat dann einen Kennlinienast mit negativer Steigung (instabiler Bereich). Beim GTO-IWR steigt die Gleichspannung mit wachsendem Gleichstrom zunächst steil an und nimmt dann einen relativ flachen Verlauf ein. Die Leistung wächst fast im gesamten Betriebsbereich nahezu linear mit dem Gleichstrom. Damit hat die Leistung beim IWR kein Maximum, jenseits dessen der Betrieb instabil wäre sondern die Stabilität ist im gesamten Bereich sichergestellt.

Nach der Ermittlung der stationären Kennlinien wird ein dynamisches Grundschwingungsmodell aufgestellt. Ziel ist es, für die später zu entwerfenden Regler das Übertragungsverhalten der Regelstrecke zu gewinnen. Der GTO-IWR wird netzseitig durch Grundschwingungs-Stromquellen modelliert, die den kommutierungsbedingten Filter speisen. Die dreiphasige, netzseitige Konfiguration wird auf netzsynchron umlaufende d-q-Koordinaten transformiert. Damit ergibt sich ein Strukturbild (Seite 46), bei dem netzseitig 4 Zustandsgrößen (Kondensatorspannung und Induktivitätsstrom in d und q Achse) auftreten und die gesteuerten Quellen des GTO-IWR durch zahlreiche multiplikative Verknüpfung mit den Steuergrößen modelliert sind. Diese Nichtlinearitäten müssen für die weitere Behandlung zunächst linearisiert werden. Dabei wird als Arbeitspunkt $\varphi_{i0} \rightarrow 0$ angenommen. Mit dem linearisierten Schaltbild (3.19) wird das Übertragungsverhalten der Regelstrecke ermittelt.

Als Regelstrategie für die 2-Punkt HGÜ kann das Grundprinzip des bekannten Marginalstromverfahrens auch beim GTO-IWR angewandt werden. Der Stromregler des GTO-IWR erhält einen um das Marginal kleineren Stromsollwert und geht im Normalbetrieb deshalb an den Anschlag. Dies entspricht der maximalen Aussteuerung $m=1$, welche die maximale wechsellrichterseitige Gleichspannung erzeugt. Mit dem 2. Freiheitsgrad, dem Phasenwinkel „ φ_{i0} “ kann entweder die Sammelschienenspannung (bei schwachem Netz) oder Blindleistung geregelt werden. Für den Sonderfall des GTO-IWR mit passiver AC-Last werden die Stellgrößen des Wechselrichters zu $m=1$ und $\varphi_{i0}=0$ fest vorgegeben. Der Wechselrichter arbeitet in diesem Sonderfall also rein gesteuert. Geregelt wird als innerste Regelschleife der Strom des Gleichrichters. Der Sollwert für diesen Gleichrichterstrom stammt von einem wechsellrichterseitigen Sammelschienenspannungsregler.

Auch beim parallelen Mehrpunkt-HGÜ-System kann die Regelstrategie, die bei netzgeführten Thyristorstromrichtern eingesetzt wird, auf den GTO-IWR übertragen werden. Der leistungsstärkste WR wird zur gleichspannungsbestimmenden Station, während die übrigen Stationen stromregelnd arbeiten und ihre Stromsollwerte von einem übergeordneten Stromsollwertabgleicher erhalten.

Zur Reglerauslegung werden sowohl die Bode-Diagramme als auch die Wurzelortkurven zunächst der Regelstrecke und dann des offenen bzw. geschlossenen Regelkreises angegeben. Damit wird sehr schön nachvollziehbar, wie die Pole und Nullstellen letztendlich plaziert werden. Durch Einführung einer stationären Entkopplung der beiden Regelkreise („ m “ und „ φ_{i0} “) werden Übergangsvorgänge deutlich besser gedämpft.

Nach Auslegung der Regler folgt ein längerer Abschnitt von Simulationen für die 2-Punkt HGÜ, die parallele Mehrpunkt HGÜ und die HGÜ mit Serienanzapfung.

Wie zu erwarten kann mit dem GTO-IWR ein beliebig schwaches oder passives Netz problemlos versorgt werden.

Die zu ergreifenden Maßnahmen und das daraus resultierende dynamische Verhalten bei gleichstromseitigen und drehstromseitigen Fehlern wird erläutert. Ein gleichstromseitiger Kurzschluß muß alleine durch den Gleichrichter, der in die WR-Endlage umgesteuert wird, bereinigt werden. Der Wechselrichter selbst wird während der Fehlerdauer gesteuert betrieben mit $m=1$ und einem, auf dem Wert vor dem Fehler festgehaltenen Phasenwinkel φ_{i0} . Während der Fehlerdauer muß mit einer erhöhten Wechselrichtersammelschienenspannung von bis zu 1,4pu gerechnet werden, da die Filterkondensatoren jetzt eine kapazitive Netzlast darstellen. Nach der Bereinigung des gleichstromseitigen Fehlers werden beide Stationen gesteuert wieder hochgefahren. Dies kann relativ schnell geschehen, allerdings treten bei schnellem Hochfahren an den Kondensatoren und damit auch an den Ventilen unerwünscht hohe Spannungen auf.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß das Verhalten bei gleichstromseitigen Fehler ein entscheidender Vorteil des stromeinprägenden GTO-IWR gegenüber dem spannungseinprägenden GTO-UWR ist. Beim gleichstromseitigen Fehler des UWR wird der große gleichspannungsseitige Kondensator auf die Fehlerstelle entladen, was zu erheblichen Problemen führen kann. Zusätzlich speisen die antiparallelen Dioden des UWRs die Fehlerstelle von der Drehstromseite her, der Fehler wird also zusätzlich auf die Drehstromseite abgebildet.

Zur Fehlerbereinigung müssen beim GTO-UWR sowohl gleichstrom- als auch drehstromseitig Schalter betätigt werden.

Als erster drehstromseitiger Fehler wird der seltene Fall des 3-poligen Sammelschienenkurzschlusses behandelt. Diese Fehlerart führt beim klassischen, netzgeführten Wechselrichter natürlich zur Kippung. Beim GTO-IWR kommen wechselrichterseitig zwei Eingriffsmöglichkeiten in Frage:

1.) Herstellen eines Ventilnebenwegs mit möglichst wenig Schalthandlungen zum frühestmöglichen Zeitpunkt. Durch Wegfall der Gegenspannung kommt es zu einem vorübergehenden Anstieg des Gleichstromes auf rund 1,7pu. Anschließend kann der Regler des Gleichrichters den Gleichstrom auf 1pu halten. Der vorübergehende erhöhte Gleichstrom muß von den GTOs, die im Wechselrichter den Nebenweg bilden, nicht geschaltet sondern nur geführt werden. Während der Fehlerdauer kommt es zur schwach gedämpften Resonanzschwingung des wechselrichterseitigen LC-Filters (ca. 200 Hz). Während der Fehlerdauer wird die Aussteuerung des GTO-IWR auf $m=1$ gesetzt. Nach Fortschalten des Kurzschlusses bewirkt die Maßnahme $m=1$, daß die Kondensatorspannungen des GTO-IWR auf rund 1,9 pu hochschwingen, ohne diese Maßnahme würden Spannungen in der Größenordnung 2,5 pu auftreten. Der Hochfahrvorgang ist in weniger als 300ms abgeschlossen.

2.) Anstatt einen Nebenweg zu schalten, kann man auch in Erwägung ziehen, die GTOs zum frühest möglichen Zeitpunkt zu blockieren. Damit wird die wechselrichterseitige Gleichspannung schnell auf den Schutzpegel der Ableiter ansteigen. Der Energieinhalt der Drossel kann durch die Ableiter aufgenommen werden. Eine Simulation für diese Fehlerbehandlungsstrategie wurde jedoch nicht durchgeführt.

Häufiger als der 3-polige Kurzschluß an der Sammelschiene tritt der 1-polige Kurzschluß entweder stationsnah oder stationsfern im Wechselrichternetz auf. In beiden Fällen wird nicht in die Steuerung des GTO-IWR eingegriffen, d.h. der Aussteuergrad bleibt bei $m=1$. Mit Erkennen des 1-poligen Kurzschlusses wird die Regelung der Sammelschienen Spannung ausgesetzt und die Stellgröße Φ_{i0} wird auf ihrem vorhergehendem Wert festgehalten.

Während der 1-polige Kurzschluß bei dem klassischen netzgeführten Thyristorwechselrichter in der Regel Kippungen hervorruft, ist dies beim GTO-IWR natürlich nicht der Fall, sondern es wird beim 1-poligen Kurzschluß direkt an der Sammelschiene die übertragene Leistung auf 0,5pu reduziert und eine 100 Hz Schwingung, vor allem in die wechselrichterseitige Gleichspannung eingeprägt. Nach Beendigung des Fehlers kann die Übertragungsleistung bereits nach 100ms wieder auf 100% hochgefahren werden.

Beim 1-poligen, stationsfernen Kurzschluß sind die Verhältnisse noch günstiger. Im simulierten Beispiel bricht die Sammelschienen-Spannung der kurzschlußbehafteten Phase auf 50% zusammen. Dies würde beim klassischen, netzgeführten Thyristorwechselrichter zur Kippung führen. Beim GTO-IWR können während der Fehlerdauer immer noch 75% der ursprünglichen Leistung übertragen werden, wobei allerdings die Gleichspannung einen schwingenden Anteil mit doppelter Netzfrequenz enthält. Das Hochfahren auf die volle Leistung nach Fehlerende läßt sich in 100ms erreichen.

In ähnlicher Weise, wie eben für die 2-Punkt-HGÜ besprochen, werden die gleich- und die drehspannungsseitigen Fehlerfälle auch beim parallelen Mehrpunkt-HGÜ-System durch den GTO-IWR beherrscht. Gerade bei Mehrpunkt-Systemen mit einem Wechselrichter am schwachen Netz zeigen sich die Vorteile des selbstgeführten Wechselrichters deutlich. Beim klassischen, netzgeführten Thyristor-Wechselrichter führen Drehspannungsabsenkungen sehr leicht zu Kippungen. Die Folge einer Kippung im Mehrpunkt-System ist, daß alle übrigen Stationen ebenfalls keine Energie mehr austauschen können. Da der selbstgeführte GTO-IWR nicht kippt, sondern, wie zuvor bei der 2-Punkt-HGÜ schon gezeigt, immer noch ein Teil der Leistung übertragen kann, sind diese Störungen für das gesamte Mehrpunkt-System nahezu harmlos. Auch ein 3-poliger Sammelschienenkurzschluß beim GTO-IWR bleibt dann für die übrigen Stationen weniger kritisch, wenn die GTOs schnellstmöglich blockiert werden und die Energie aus der Gleichstromdrossel in den Ableitern aufgenommen wird. Man sieht also, daß insbesondere beim parallelen Mehrpunkt-System der selbstgeführte Wechselrichter vorteilhaft ist, welches allerdings durch einen hohen Mehraufwand in der Ventiltechnik erkaufte werden muß.

Ein weiterer Block mit Simulationsrechnungen zeigt das Verhalten der Serienangezapften HGÜ und zwar beim Hochfahren des Systems, bei Laständerungen und bei drehstromseitigen Fehlerfällen. Es zeigt sich, daß alle Betriebszustände erwartungsgemäß und problemlos funktionieren.

Für den GTO-IWR wird in Kapitel 3.4 eine grobe Vorstellung über die Realisierung und darauf aufbauend über die zu erwartenden Kosten entwickelt. Hier sind große Unsicherheiten mit enthalten, so daß die Zahlen bestenfalls als Anhaltswerte dienen können. Die von Herrn Lipphardt abgeschätzten Gesamtkosten einschließlich der kapitalisierten Verlustleistung ergeben, daß die Station mit GTO-IWR die teuerste Lösung ist, ihr folgt die GTO-UWR-Station.

Zusammenfassend zeigt sich, daß der GTO-IWR das günstigste Verhalten bei Störungen hat: Alle Fehler werden ohne zusätzliche Betriebsmittel beherrscht. Beim GTO-UWR dagegen sind zusätzliche Betriebsmittel insbesondere DC-Schalter sowie ein zusätzlicher Ventilzweig mit Thyristoren und Widerständen als „energy

dumper“ erforderlich. Beim parallelen Mehrpunkt HGÜ-System sind beim GTO-IWR im Fall der drehstromseitigen Störungen die Rückwirkungen auf das Gesamtsystem am geringsten, sodaß die Leistung weitgehend unterbrechungsfrei übertragen werden kann.

Ein großer Nachteil beim GTO-IWR liegt in der höheren Ventilsperrenspernung und vor allem darin, daß man symmetrisch sperrende GTOs braucht. Diese haben nach heutigem Stand der Halbleiterentwicklung einen höheren Durchlaßspannungsabfall und gegebenenfalls auch ein schlechteres Schaltverhalten. Dies mag zum Teil daran liegen, daß die heutigen Hochleistungs-GTOs vornehmlich in großen GTO-UWR-Schaltungen eingesetzt werden, so daß die Halbleiter-Hersteller sich auf den unsymmetrischen GTO konzentrieren. Andererseits ist aber auch nicht auszuschließen das der symmetrisch sperrende GTO prinzipiell in einem der beiden Punkte nämlich Durchlaßspannungsabfall und Schalteigenschaften dem unsymmetrischen unterlegen ist. Es ist zu befürchten, daß die Weiterentwicklung der symmetrisch sperrenden GTOs hinter den Anstrengungen, die man bei unsymmetrisch sperrenden GTOs macht, zurückbleibt.

P.Mutschler