

ENERGIEWENDE

Die Evolution von HVDC Light®

Seit der ersten Installation von HVDC Light ist ABB führend in der Entwicklung der Spannungszwischenkreis-Stromrichtertechnik (VSC) für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ). Nach mehr als 20 realisierten und im kommerziellen Betrieb befindlichen Projekten ist es an der Zeit für den nächsten Schritt in der Evolution von HVDC Light – mit verbesserter Stromkapazität, Kompaktheit und Regelbarkeit.



01

Magnus Callavik
ABB Power Grids,
Grid Integration
Västerås, Sweden
(zurzeit Peking, China)

magnus.callavik@
se.abb.com (zurzeit
magnus.callavik@
cn.abb.com)

Peter Lundberg
Jürgen Häfner
Hans Björklund
ABB Power Grids,
Grid Integration
Ludvika, Schweden

peter.lundberg@
se.abb.com
jurgen.hafner@
se.abb.com
hans.bjorklund@
se.abb.com

Munaf Rahimo
Franco Dugal
ABB Power Grids,
Grid Integration
Lenzburg, Schweiz

munaf.rahimo@ch.abb.com
franco.dugal@ch.abb.com

Im Jahr 1929 begann das ABB-Vorgängerunternehmen ASEA mit der Entwicklung netzgeführter Stromrichter (Line-Commutated Converter, LCC) seine Tätigkeit auf dem Gebiet der klassischen HGÜ (ABB-Produktname: HVDC Classic). Im Jahr 1954 realisierte ASEA die erste kommerzielle HGÜ-Verbindung der Welt zur Ostseeinsel Gotland. Dieses Erbe wurde später mit der Entwicklung der Spannungszwischenkreis-Stromrichtertechnik (Voltage Source Converter, VSC) fortgesetzt, und im Jahr 1997 markierte ABB mit der Realisierung des ersten VSC-basierten HGÜ-Demonstrationsprojekts im schwedischen Hällsjön die Geburtsstunde von

Da HVDC Light einfach an geltende Netzregeln angepasst werden kann, sind kurze Projektlaufzeiten und zusätzliche Systemdienstleistungen möglich.

HVDC Light. Erstmals wurden Transistoren als Leistungshalbleiter für die HGÜ eingesetzt, was die Regelung von Spannung und Frequenz durch den Stromrichter ermöglicht. Seit der Einführung von HVDC Light wurden weit über 20 Projekte realisiert bzw. befinden sich im Bau. Dank der parallelen

Entwicklung höherer Stromrichterspannungen und -leistungen, verbesserter Halbleiter auf der Basis von IGBTs (Bipolartransistoren mit isoliertem Gate) und Fortschritten auf dem Gebiet der extrudierten Kabel mit Polymerisolierung steigt die Zahl der Anwendungen, in denen die HVDC-Light-Technologie erfolgreich zum Einsatz kommt → 1. Die Integration von HVDC Light in ein Drehstromnetz ermöglicht eine verbesserte Spannungsstützung, Blindleistungskompensation, Schwarzstartfähigkeit und die Erhöhung der Leistungsfähigkeit vorhandener Netzanlagen.





—
01 Stromrichtergebäude der hybriden bipolaren 500-kV-HGÜ-Anlage „Skagerrak“ mit HVDC-Light-Technologie.

—
02 HVDC-Light-Stromrichterventil in einer Power-from-Shore-Anwendung.

Die Evolution von HVDC Light

Die Evolution von HVDC Light begann Mitte der 1990er Jahre mit der Idee, das hervorragende dynamische Leistungsvermögen von VSCs, das sich bereits in Zugantriebssystemen und drehzahlgeregelten Antrieben bewährt hatte, für die Stromübertragung zu nutzen. Zu der Zeit befanden sich wichtige Basistechnologien wie Hochspannungs-Halbleiter und digitale Leitsysteme ebenfalls in einer raschen Entwicklung. Im Jahr 1997 erfolgte dann die Einführung von HVDC Light mit dem Bau

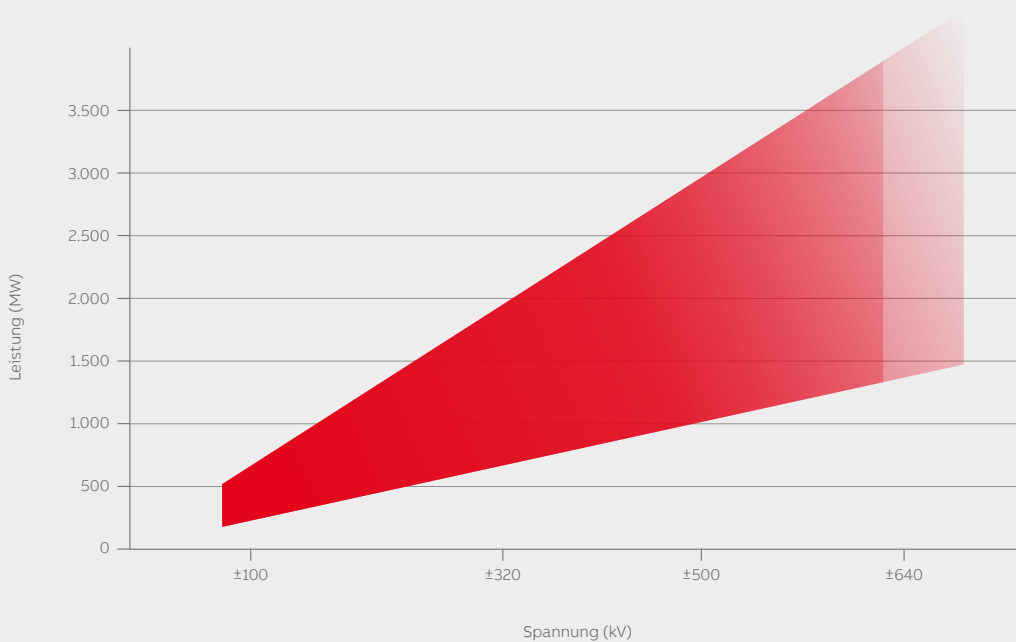
der Pilotanlage in Hällsjön. Dem gingen drei Jahre intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit voraus, die sich unter anderem mit dem Problem der Steuerung von in Reihe geschalteten IGBTs befasste, um eine Hochspannungs-Anordnung

—
HVDC Light ermöglicht Offshore-Anbindungen von über 100 km Länge, was sich mit herkömmlichen AC-Lösungen nur schwer wirtschaftlich realisieren lässt.

zu ermöglichen, die im Kilohertz-Bereich arbeiten konnte. Technologiebereiche wie Systemdesign, Ventildesign, Steuerungs- und Schutzdesign und Anlagendesign wurden auf der Grundlage des Wissens von ABB auf dem Gebiet der klassischen HGÜ für die VSC-Technologie angepasst.

02





03

Die erste kommerzielle HVDC-Light-Verbindung entstand auf der Insel Gotland, wo es darum ging, die Integration von regenerativer Windenergie in ein relativ schwaches Inselnetz zu unterstützen. Hier konnte die HVDC-Light-Technologie ihre Fähigkeit unter Beweis stellen, die Netzstabilität durch Wirk- und Blindleistungsregelung mit hoher Dynamik zu unterstützen. Die Leistung betrug moderate 55 MW bei 80 kV.

Durch die Steigerung auf 1.400 MW bei 525 kV DC können Interkonnektoren mit einer Länge von 300 bis 700 km die in einigen europäischen Netzen zulässige Leistungsgrenze erreichen.

Der nächste Evolutionsschritt war der Einsatz von HVDC Light zur Kopplung asynchroner Netze. Da HVDC Light einfach und ohne negative Auswirkungen auf die vorhandene Netzinfrastruktur an geltende Netzregeln (Grid Codes) angepasst werden kann, sind kurze Projektlaufzeiten und zusätzliche Systemdienstleistungen wie Schwarzstart und AC-Spannungsstützung möglich. Entsprechende Projekte wurden in Australien, Nordamerika und Europa realisiert.

Bei HVDC Light spielen seit jeher auch ökologische Aspekte eine wichtige Rolle, was zu Anwendungen für die Energieversorgung von Bohrinseln vom Festland aus (Power from Shore) sowie für die Anbindung von Offshore-Windenergieanlagen an das Stromnetz führte →2.

Bei letzteren ermöglicht HVDC Light Anbindungen von über 100 km Länge, was sich mit herkömmlichen AC-Lösungen nur schwer wirtschaftlich realisieren lässt. Tatsächlich ist die VSC-basierte HGÜ (auch „selbstgeführte HGÜ“ genannt) ein wichtiger Faktor für die Realisierung von entlegenen Offshore-Windparks. Power-from-Shore-Projekte in Norwegen haben gezeigt, dass mit HVDC Light platzsparende und gewichtsreduzierte Lösungen realisiert werden können, die in ihrer Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit der Gasturbinentechnik überlegen sind.

Ursprünglich wurde HVDC Light stets mit extrudierten Hochspannungs-Gleichstromkabeln mit einer Isolierung aus vernetztem Polyethylen (XLPE) kombiniert, die eine hohe Leistungsdichte bei einer geringen Trassenbreite ermöglichen. Lösungen mit einer Kombination aus Freileitungen und Erd- bzw. Seekabeln oder nur mit Freileitungen wurden aber ebenfalls realisiert, z. B. das Caprivi-Link-Projekt zwischen Namibia und Sambia, das zwei schwache Netze mit einer langen HVDC-Light-Freileitung verbindet. Die Verbindung kann zu einem späteren Zeitpunkt von einer asymmetrischen einpoligen Konfiguration zu einer bipolaren Verbindung erweitert werden. Zu verdanken ist dies der Regelbarkeit von HVDC Light, die eine Anpassung an verschiedene Netzbedingungen durch Veränderung der Regelparameter ermöglicht.

— 03 Möglicher Leistungsbereich von HVDC-Light-Systemen.

— 04 Die neue BIGT-Struktur.

Durch die Leistungssteigerung von HVDC Light auf 1.400 MW bei 525 kV DC können Interkonnektoren mit einer Länge von 300 bis 700 km die in einigen europäischen Übertragungsnetzen zulässige Leistungsgrenze erreichen. Der nächste vorgesehene Schritt sind 3.000 MW bei 500 kV, was den Einsatz von HVDC Light in vielen neuen Punkt-zu-Punkt- und Multiterminal-Systemen ermöglichen und somit

Die Entwicklung von HGÜ-Ventilen wird bestimmt durch ein kompaktes Stromrichterdesign, um kleinere Ventilhallen, eine effiziente Ventilsteuerung, geringere Verluste und eine höhere Zuverlässigkeit zu ermöglichen.

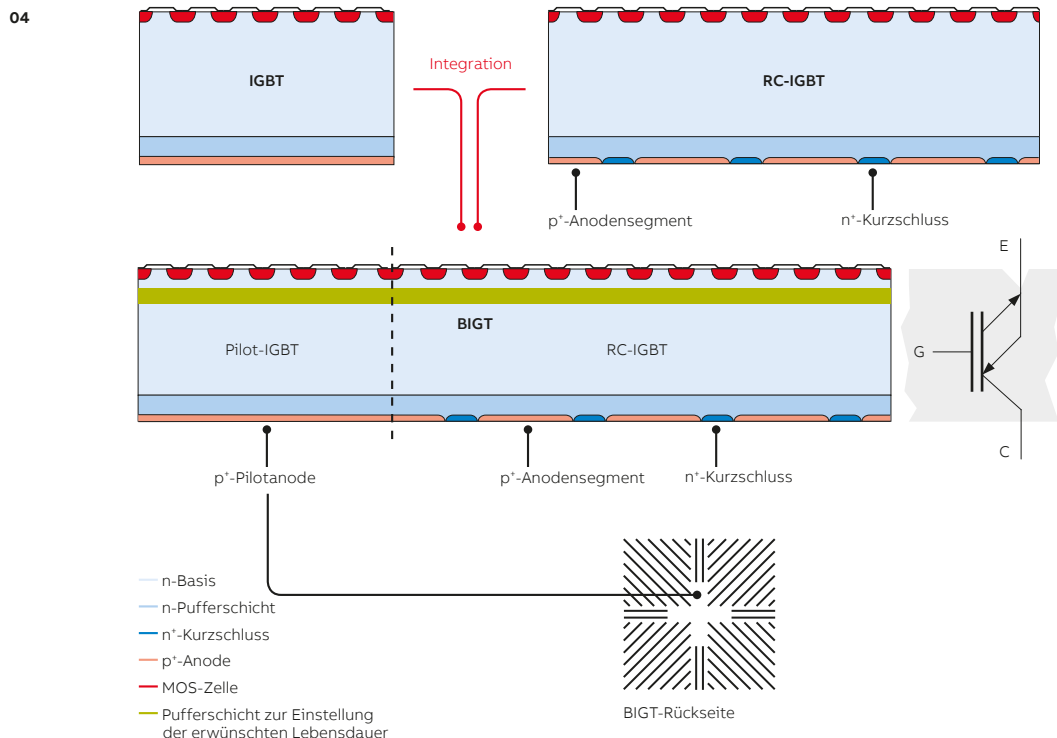
viele Herausforderungen bei der Energieübertragung, insbesondere bei der verbrauchsfernen Erzeugung, lösen würde → 3. Die Einführung moderner Leistungshalbleiter und des Steuerungs- und Schutzsystems MACH, zusammen mit der langen Erfahrung von ABB mit selbstgeführten Umrichtern, sind die Grundlage für den nächsten Schritt in der Evolution von HVDC Light.

Entwicklung von Stromrichterventilen, Systemen und Anlagen

Nach den Anfängen mit einpoligen (monopolaren) Anlagen und DC-Kabeln in relativ kleinem Maßstab eröffnen VSC-Systeme auf der Basis von modularen Mehrpunkt-Stromrichtern heute eine Vielzahl von möglichen Anwendungen und Konfigurationen – z. B. die Hochleistungsübertragung in bipolaren Multiterminal-Systemen mit Freileitungen, Hochleistungsnetze für Offshore-Windparks und Anlagen zur Netzsynchrisation und -stabilisierung.

Bereits realisierte Regelfunktionen wie Schwarzstartfähigkeit, Inselbildung, Netzstabilisierung und Oberschwingungsunterdrückung sowie Entwicklungen im Steuerungs- und Schutzbereich wie hybride DC-Leistungsschalter sichern die Kompatibilität von HVDC-Light-Anwendungen mit den HGÜ-Netzen der Zukunft.

Schwerpunkt des Anlagendesigns sind kompakte Lösungen (ideal für Onshore- und Offshore-Anwendungen), wobei die Aspekte Platzbedarf, Gewicht, elektromagnetische Verträglichkeit und Geräuschemissionen eine bedeutende Rolle spielen. So hat sich der Platzbedarf beispielsweise alle fünf Jahre um einen Faktor von zwei verringert.



Einfaches Layout und entsprechendes Anlagendesign

Die Entwicklung von HGÜ-Ventilen wird bestimmt durch ein kompaktes Stromrichterdesign, um kleinere Stromrichterhallen (Ventilhallen), eine effiziente Ventilsteuerung, geringere Verluste und eine höhere Zuverlässigkeit zu ermöglichen.

Die Leistungsdaten heutiger HVDC-Light-Stromrichter reichen von 80 bis 800 kV und von 100 bis 4.600 MW bei DC-Nennströmen von bis zu 3.000 A. Der Einsatz von BIGTs (Bi-mode Insulated-Gate Transistors) und fortschrittlichen Schaltalgorithmen ermöglichen eine höhere Stromdichte und geringere Stromrichterverluste.

Die Stationsverluste liegen mittlerweile bei unter 1 % pro Station und damit im Bereich der klassischen netzgeführten HGÜ (LCC-HGÜ für die Ultrahochleistungs-Übertragung).

Modernste Prüfmöglichkeiten

Mit der Leistung von HVDC-Light-Stromrichtern steigen auch die Prüfanforderungen. In Leistungsprüfungen werden z. B. die Leistungsfähigkeit von Stromrichterventilen wiederholt unter ungünstigsten Belastungsbedingungen (hinsichtlich Spannung, Strom und Temperatur) getestet und die Wechselwirkungen zwischen der Ventilelektronik und den Stromkreisen geprüft.

Kürzlich hat ABB eine neue 2.900 m² große Prüfanlage für Stromrichterventile mit Nennströmen von mehr als 3.000 A errichtet. In der Prüfanordnung fließt Strom zwischen zwei einphasigen Systemen, die unabhängige Stromrichterstationen darstellen.

Nur die Stromrichterverluste werden in den Prüfkreis eingespeist. Jeder Ventilarms besteht aus sechs Zellen. Die Anordnung entspricht einer Drehstromleistung von 31 MW.

BIGT-StakPak-Module für 5.200 V/3.000 A

In den vergangenen Jahrzehnten haben Fortschritte auf dem Gebiet der Hochspannungs-Halbleiterbauelemente zu enormen Verbes-

Heutige HVDC-Light-Stromrichter erreichen 80 bis 800 kV und 100 bis 4.600 MW bei DC-Nennströmen von bis zu 3.000 A.

serungen im Hinblick auf die Stromtragfähigkeit und Verluste geführt. Ein vornehmliches Entwicklungsziel bei VSC-Topologien war die vollständige Integration des aktiven Leistungshalbleiterschalters und der antiparallelen Freilaufdiode.

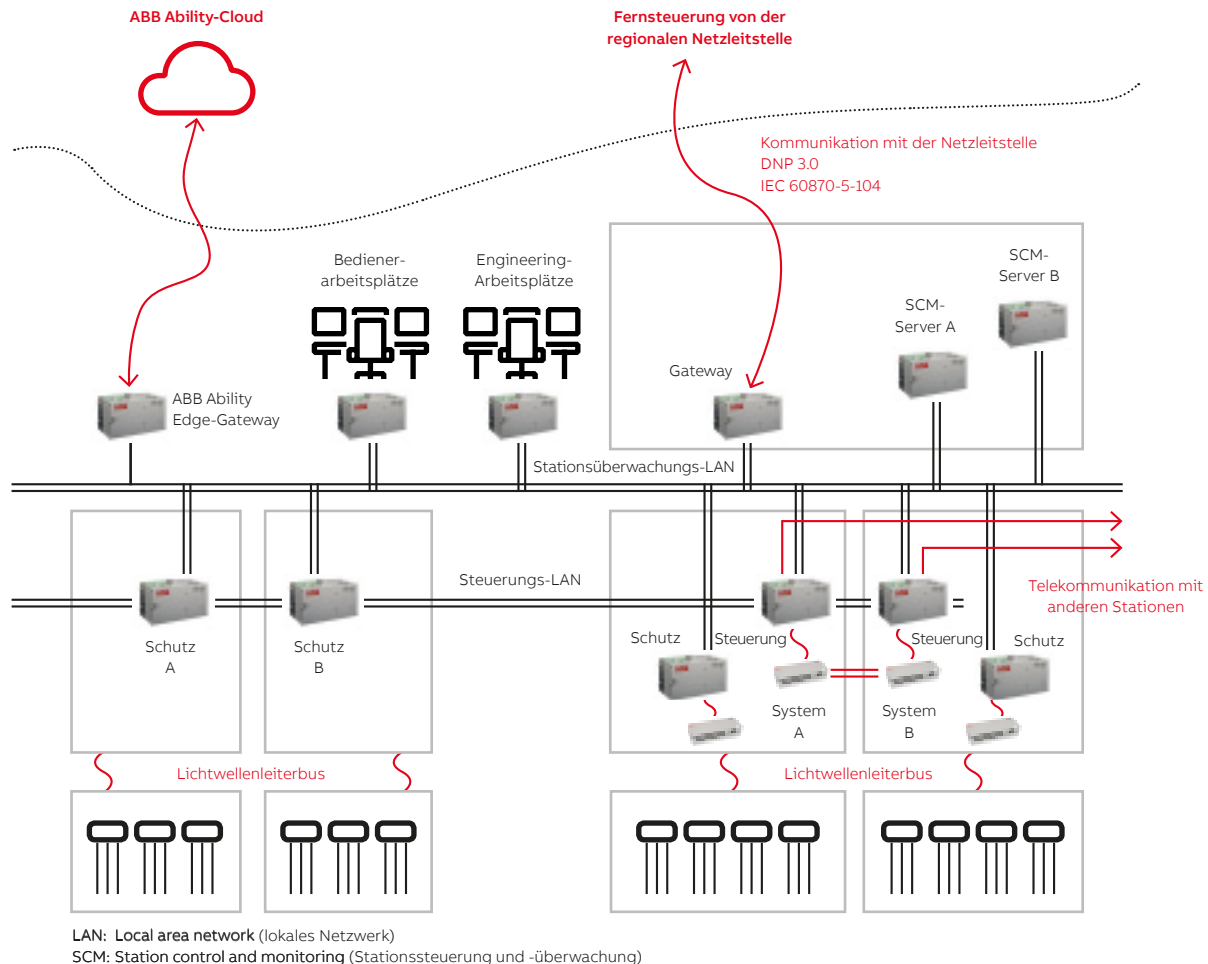
Dies führte zur Entwicklung einer integrierten Lösung aus IGBT und Diode – dem sogenannten rückwärts leitenden IGBT (RC-IGBT). Das Hauptziel bestand darin, höhere Leistungsdichten und kompaktere Systeme zu erreichen und gleichzeitig die Stromtragfähigkeit der Diode im Vergleich zu modernen IGBT/Dioden-Lösungen zu verbessern.

Zunächst wurde ein solches Konzept nur für RC-IGBTs mit geringerer Nennspannung (< 1.200 V) realisiert, die sich für weich schaltende



— 05 BIGT-StakPak-Modul für 3.000 A.

— 06 Aufbau des HGÜ-Steuerungssystems MACH 3 für einen Pol.



06

Anwendungen mit niedrigen Anforderungen an die Schaltleistung im Diodenmodus eignen. Als erstes Unternehmen beherrschte ABB die großen Herausforderungen hinsichtlich Design und

Kürzlich hat ABB eine 2.900 m² große Prüfeinrichtung für Stromrichterventile mit Nennströmen von mehr als 3.000 A errichtet.

Stromtragfähigkeit und entwickelte einen Hochspannungs-RC-IGBT mit einer Nennspannung von bis zu 6.500 V für gängige VSC-Anwendungen wie HVDC Light.

Bei dem fortschrittlichen RC-IGBT-Konzept handelt es sich um den oben genannten BIGT. Der BIGT wurde nach neuesten IGBT-Designkonzepten entwickelt und zeichnet sich durch eine vollständig in dieselbe Struktur integrierte, optimierte Antiparalleldiode aus [1, 2] →4.

Ein 5,2-kV-BIGT-Chip wurde in einer neuen Generation von druckkontaktierten Modulen implementiert. Das neue Modul basiert auf der bekannten StakPak™-Plattform, die ihre außerordentliche Zuverlässigkeit und Robustheit seit vielen Jahren als Hauptschaltelement in ABB HVDC-Light-Anwendungen unter Beweis stellt. Bei dem neu entwickelten StakPak-Modul für 5,2 kV kommt die BIGT-Chip-Technologie zum Einsatz, während gleichzeitig die bewährten aufbau- und verbindungstechnischen Merkmale der vorherigen Generationen erhalten bleiben →5. Das neue StakPak-Modul ist das erste kommerziell erhältliche Hochspannungsmodul, das mit BIGT-Chips ausgestattet ist [3].

Auch bei dem neuen Modul werden einzelne Chipkontakte durch flexible sogenannte Press-Pins hergestellt. Dies ermöglicht eine bessere Kühlung und reduziert die Anforderungen an die Ebenheit des Kühlkörpers. Alle StakPak-Module bestehen



07

aus mehreren standardisierten rechteckigen Submodulen. Die Schaltleistung wird von der Anzahl der Submodule im Gehäuse bestimmt. Da es sich bei dem BIGT um ein integriertes Bauelement handelt, stellen die Anforderungen unterschiedlicher IGBT-Dioden-Verhältnisse kein Problem mehr dar, und es können wesentlich höhere Nennströme bei gleichem Platzbedarf erreicht werden. Die in →5 dargestellte Version mit sechs Submodulen kann

Die Bemessungsleistung von HVDC Light hat sich um mehr als das 60-fache erhöht, während die Anlagen immer kompakter geworden sind.

für bis zu 3.000 A ausgelegt werden, womit sie das leistungsstärkste bisher entwickelte IGBT-Package ist, das sowohl im IGBT-Modus als auch im Diodenmodus betrieben werden kann.

MACH™ 3 – das Gehirn für Steuerung und Schutz

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der HGÜ und der Drehstromübertragung ist, dass der Leistungsfluss in einer AC-Leitung ausschließlich von der Spannung und dem Phasenwinkelunterschied zwischen den Endpunkten bestimmt wird, während der Leistungstransport in einem HGÜ-System vollständig regelbar ist und der Leistungsfluss vom Steuerungssystem bestimmt wird. Diese Eigenschaft ermöglicht viele der herausragenden Systemmerkmale eines HGÜ-Systems, erfordert aber auch ein sehr schnelles und zuverlässiges Steuerungssystem.

Die Einführung von HVDC-Light-Stromrichtern (VSC) Mitte der 1990er Jahre bedeutete einen Quantensprung für die Regelbarkeit von HGÜ-Stromrichtern, da nun nicht nur die Wirkleistung, sondern auch die Blindleistung vollständig regelbar wurde. Das zusammen mit HVDC Light eingeführte Hochleistungs-Steuerungs- und Schutzsystem MACH 2 sorgte dafür, dass die erste Generation von VSC-Stromrichtern ihre herausragende Leistungsfähigkeit entfalten konnte.

Passend zur Weiterentwicklung der HVDC-Light-Technologie im Hinblick auf höhere Leistung, größere Zuverlässigkeit und noch bessere Regelbarkeit hat ABB mit MACH 3 die neueste Generation des Steuerungs- und Schutzsystems auf den Markt gebracht →6.

MACH 3 basiert auf leistungsstarken 64-Bit-Allzweckprozessoren, digitalen Signalprozessoren (DSP) mit acht Kernen und Gleitkommaarithmetik (Floating Point) sowie großen FPGAs (Field-Programmable Gate Arrays) der neuesten Generation. Allein der DSP besitzt eine erstaunliche Rechenleistung von 160 GFLOPS (160 x 10⁹ Gleitkommaoperationen pro Sekunde) →7-8.

MACH 3 bietet außerdem Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsverbindungen zwischen den Einheiten sowie zu und von den verteilten E/A-Einheiten. Lichtwellenleiter ersetzen nahezu alle Steuerungs- und Schutzverdrahtungen aus Kupfer, was die Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Station deutlich erhöht.

—
07 PS700, der neueste Hauptcomputer für das MACH-System.

—
08 Digitale Signalverarbeitungseinheit PS935.

References

[1] Rahimo, M. T. et al.: „The Bi-mode Insulated-Gate Transistor (BIGT) – A Potential Technology for Higher Power Applications“. ISPSD 2009. Barcelona, Juni 2009.

[2] Rahimo, M. T. et al.: „Der Zwei-in-Eins-Chip – Der Bimode Insulated Gate Transistor (BIGT)“. ABB Review 2/2013, S. 19-23.

[3] Dugal, F. et al.: „The Next Generation 4,500 V/3,000 A BIGT Stakpak Modules.“ PCIM 2017. Nürnberg, Mai 2017.

[4] „HVDC Light (VSC)“. Verfügbar unter: <http://new.abb.com/systems/hvdc/hvdc-light>

Mit seinen herausragenden Kommunikationsfähigkeiten ist das MACH 3-System die ideale Plattform zur Realisierung einer vollständig digitalen HGÜ-Station. Alle zeitmarkierten Ereignisse und Alarmer sowie alle wichtigen Messwerte stehen den Steuerungs- und Schutzcomputern sofort zur Verfügung, von wo sie den verschiedenen ABB Ability™-Diensten, die zurzeit eingeführt werden, bereitgestellt werden können.

Zukünftige Verbesserungen – ABB Ability MACH 3

Seit der ersten kommerziellen Installation von HVDC Light hat sich die Bemessungsleistung um mehr als das 60-fache erhöht, während die Anlagen immer kompakter geworden sind und die

—
ABB entwickelte als erstes Unternehmen einen Hochspannungs-RC-IGBT mit einer Nennspannung von bis zu 6.500 V für gängige VSC-Anwendungen.

Stromrichterverluste um das Vierfache gesunken sind. Diese rasche Entwicklung verbunden mit der beispiellosen Regelbarkeit sorgt für ein rasantes Wachstum der VSC-basierten HGÜ weltweit.

In den nächsten zehn Jahren sind weitere Verbesserungen im Bereich der Leistungsfähigkeit und Kompaktheit zu erwarten.

Parallel zur Entwicklung von HVDC Light unternimmt ABB mit ABB Ability den nächsten Schritt in Sachen Konnektivität. ABB Ability vereint branchenübergreifendes digitales Know-how und erstreckt sich vom einzelnen Gerät über den Netzwerkrand bis hin zur Cloud – mit Geräten, Systemen, Lösungen, Services und einer Plattform, die ein besseres Systemwissen, umfassende Funktionalitäten und eine höhere Leistungsfähigkeit durch Konnektivität der Anlagen im Netz ermöglichen.

Der HGÜ kommt dies u. a. durch eine bessere Fernanbindung, eine höhere Cybersicherheit, spezielle Supportfunktionen und -angebote sowie Asset-Health-Systeme zugute. Entsprechende Entwicklungen und Erfahrungen in großen automatisierten Systemen in anderen Industriebereichen lassen eine rapide Entwicklung in diesen Bereichen erwarten. Schließlich sind alle HGÜ-Stationen bzw. -Anlagen seit Jahrzehnten digitalisiert und stellen einige der wichtigsten Anlagen im Netz dar. Da ist ihre Anbindung an das digitale Angebot für Drehstromnetze ein natürlicher nächster Schritt auf dem Weg zu einem verstärkten Einsatz der HGÜ im Netz der Zukunft [4]. ●

08

