ABB review

1 | 14 de

review

Innovations-Highlights 6
Strom messen mit Licht 13
Kombinierte Simulationen 45
Netzsteckdose mit USB-Anschluss 55

100 ABB review since 1914

Die technische Zeitschrift des ABB Konzerns

Power and productivity for a better world™

ABB

In ihrem Jubiläumsjahr blickt die *ABB Review* sowohl nach vorn als auch zurück. Ein Blick auf die Geschichte ermöglicht ein besseres Verständnis der Gegenwart und der Auswirkungen, die fortwährende Innovationen im Laufe der Jahre auf das Unternehmen, den Markt und auch die Gesellschaft hatten. Die Titelseite dieses Hefts zeigt einen ABB-Roboter bei der Fertigung von ABB-Schaltanlagen in Peking, China.
Das Bild auf dieser Seite zeigt die Strömberg Maschinenfabrik im finnischen Vaasa in den 1940er Jahren.

Innovations-Highlights

6 **Innovations-Highlights**
Bedeutende ABB-Innovationen für 2014

Überwachung

13 **Strom messen mit Licht**
Faseroptischer Stromsensor in einem Hochspannungs-Leistungsschalter

18 **Hilfreiche Einblicke**
Ein integrierter Ansatz zum Asset-Health-Management

Stromwandlung

24 **Frischer Wind**
Konstruktion und Test eines Antriebsstrangs für eine 7-MW-Windenergieanlage

28 **Sinnvolle Ergänzung**
Streckenseitige Gleichstromsysteme zur Steigerung der Energieeffizienz im Schienennahverkehr

Simulationen

34 **Need for Speed**
Echtzeitsimulation für Leistungselektronik in Eisenbahn-anwendungen und darüber hinaus

40 **Turbo-Boost**
ACTUS – die neue Simulationssoftware von ABB für große aufgeladene Verbrennungsmotoren

45 **Geschickt kombiniert**
Besseres Design von Antriebssträngen durch Kombination elektromagnetischer und mechanischer Simulationen

50 **Modelle mit Mehrwert**
Modularisierte Simulationskonzepte zur Analyse und Optimierung von Leistungsschaltern

Strom-versorgung

55 **Clevere Steckdosen für Smartphones**
SCHUKO®-Steckdosen mit integriertem USB-Anschluss

59 **Leistungsträger**
Der ABB PCS100 RPC – mehr als nur ein Blindleistungs-kompensator

Pionier-leistungen

65 **Im Einklang**
Rückblick auf die fruchtbare parallele Entwicklung von Hochleistungsgleichrichtern und Halbleitern

Innovation

Claes Rytoft

Liebe Leserin, lieber Leser,

2014 ist ein besonderes Jahr für die *ABB Review*. Vor genau 100 Jahren erschien unser direktes Vorgängermagazin, die *BBC Review*, zum ersten Mal. Ein Jahrhundert ist eine lange Zeit, und die technischen Entwicklungen, die unsere Zeitschrift in dieser Zeit erlebt hat, sind eine faszinierende Dokumentation von 100 Jahren fortwährender Innovation. In unserem Jubiläumsjahr möchten wir mit Ihnen (manchmal vor dem Hintergrund moderner Entwicklungen) einen Blick auf die Vergangenheit und die Gegenwart werfen.

In der ersten Ausgabe dieses Jahres zum Thema Innovation blicken wir sowohl in die Zukunft als auch in die Geschichte. Passenderweise befasst sich einer der Hauptartikel mit einer neuen Möglichkeit zum Messen von Strömen, die sich eine sehr alte Entdeckung zunutze macht. Im Jahr 1845 entdeckte Michael Faraday, dass Magnetfelder die Polarität von Licht beeinflussen – ein Phänomen, dessen praktischer Nutzen lange Zeit verborgen blieb. Nun hat ABB diesen Effekt als Mittel zur präzisen, kontaktlosen Strommessung kommerzialisiert.

ABB weiß, dass Kunden nicht nur modernste Technologie benötigen, um erfolgreich zu sein. Sie müssen auch in der Lage sein, diese über einen langen Zeitraum zuverlässig und wirtschaftlich zu betreiben. Ein Artikel über Asset-Health-Management zeigt, warum dies ein Bereich mit wachsender Bedeutung ist und wie ABB ihren Kunden dort einen Mehrwert bieten kann.

Im letzten Jahr erschien in der *ABB Review* eine Reihe von Artikeln über Simulationen, die zeigten, wie die Forscher bei ABB modernste Technologien einsetzen, um immer ausgeklügeltere Produkte zu entwickeln. In diesem Heft befassen sich vier weitere Artikel mit Simulationen in so unterschiedlichen Bereichen wie der Leistungsschalteranalyse und Turboladern. Ein weiterer Artikel über die Konstruktion und das Testen von Windenergie-Generatoren zeigt ein Fallbeispiel für eine sich entfaltende Innovation.

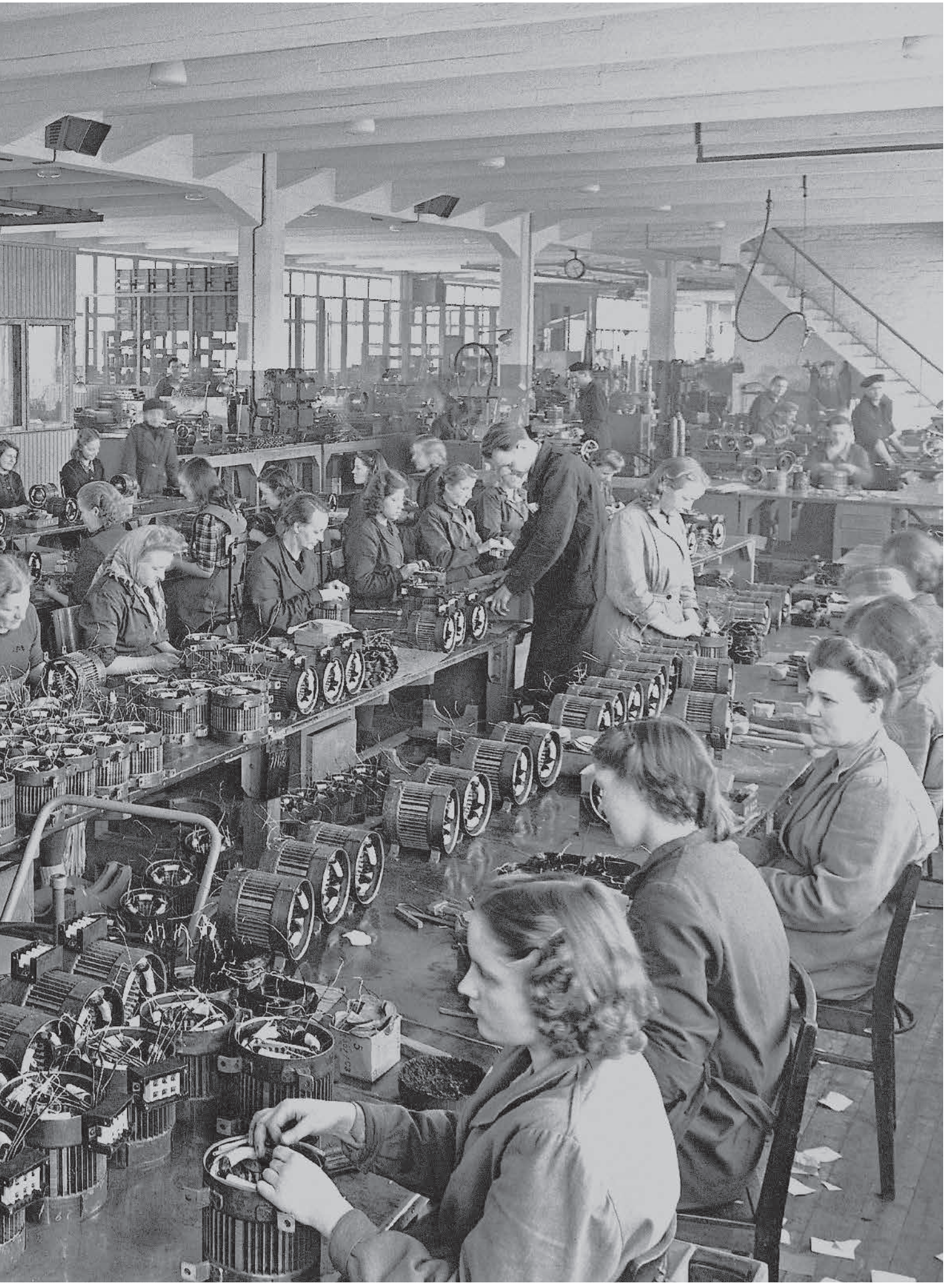
USB-Geräte sind in unserem privaten und beruflichen Alltag mittlerweile allgegenwärtig. Doch die dazugehörigen Ladegeräte bringen häufig unser Gepäck durcheinander und nehmen wertvollen Platz ein. Wer hat sich nicht schon eine bequemere Lademöglichkeit gewünscht? Wir präsentieren eine elegante Lösung: Steckdosen mit einem integrierten USB-Anschluss.

Abgerundet wird diese Ausgabe der *ABB Review* mit einem Blick in die Geschichte. In Heft 2/2013 berichteten wir über die 100-jährige Tätigkeit von ABB auf dem Gebiet der Leistungselektronik. Schwerpunkt des Artikels waren die verwendeten Schaltelemente wie Quecksilberdampfventile oder Halbleiter. Dieses Mal beleuchten wir die gleiche Geschichte, aber aus Sicht der Gleichrichter.

Zum Schluss möchte ich die Gelegenheit nutzen, unsere Leser daran zu erinnern, dass die *ABB Review* außer in der gedruckten Fassung auch in elektronischen Formaten als PDF und in einer interaktiven Version für Tablets verfügbar ist. Mehr hierüber erfahren Sie unter www.abb.com/abbreview.

Eine interessante Lektüre wünscht Ihnen

Claes Rytoft
Chief Technology Officer &
Group Senior Vice President
ABB Group



Innovations-Highlights

Bedeutende ABB-Innovationen für 2014

ABB arbeitet kontinuierlich daran, ihr Produktangebot zu stärken und neue Technologien zu entwickeln, um innovative Spitzenprodukte anbieten zu können.

Die folgende Auswahl zeigt einen Querschnitt der innovativen Errungenschaften des Unternehmens. Viele dieser Innovationen und weitere technologische Erfolge werden ausführlich in dieser und in kommenden Ausgaben der *ABB Review* behandelt.

Verlängerte Batterie-lebensdauer

ABB entwickelt drahtlose Messinstrumente, die ihre Energie aus der Umgebung gewinnen.

Um der kurzen Lebensdauer von Batterien in drahtlosen Messinstrumenten – insbesondere bei hohen Aktualisierungsraten – entgegenzuwirken, entwickelt ABB Geräte mit geringer Leistungsaufnahme, die von einer gewöhnlichen Monozelle gespeist werden, aber gleichzeitig Energie aus dem zu messenden Prozess gewinnen, um die Lebensdauer der Batterie zu verlängern. Dies geschieht mithilfe einer in die Messumformer eingebetteten, hocheffizienten Peltierzelle, die das Wärmegefälle zwischen dem Prozess und der Umgebung nutzt.

Der ABB-Messumformer wird von einem thermoelektrischen Mikrogenerator (Mikro-TEG) gespeist, der durch den Temperaturunterschied zwischen dem Prozess und der Umgebung betrieben wird. Das Gerät ist in der Lage, bei einem Temperaturunterschied von etwa 35 °C batterieunabhängig zu arbeiten.

Die Thermo-Harvester werden in Temperaturmessumformern integriert und als externe Option für Druckmessumformer angeboten, ohne dass ein zusätzlicher mechanischer Anschluss oder Elektronik für die Energieumwandlung und Anpassung erforderlich ist.

Darüber hinaus arbeitet ABB an einer intelligenten Energiemanagement-Plattform für externe Stromquellen, die den Anschluss verschiedener Harvester (für Schwingungen, Solar usw.) zur Versorgung der Geräte erlaubt. Die Plattform soll dann auf andere Produktreihen wie Füllstands- und Durchflussmessumformer erweitert werden.

Die Geräte kommen im Frühjahr 2014 in den entsprechenden Serien 266 Pressure, TTF300 und TSP3xx Temperature auf den Markt.

USB und Tee

Das ABB-Unternehmen Busch-Jaeger hat eine SCHUKO®-Steckdose mit einem integrierten USB-Anschluss entwickelt.

Das preisgekrönte Produkt löst auf elegante Weise ein ewiges Problem: Hat man endlich ein USB-Ladegerät und -kabel gefunden, stellt sich die Frage, welches vorhandene Gerät ausgestöpselt werden kann, um eine freie Steckdose zu bekommen. Angesichts der zunehmenden Zahl von Haushaltsgeräten, die per USB-Anschluss aufgeladen werden müssen, ist die SCHUKO-Steckdose mit integriertem USB-Anschluss für viele Verbraucher eine willkommene Erleichterung.

Die Unterputz-Steckdose liefert einen Ladestrom von bis zu 700 mA und verfügt über einen integrierten erhöhten Berührungsschutz. Da sie die gleiche Form und Größe besitzt wie vorhandene SCHUKO-Steckdosen, lässt sie sich problemlos nachrüsten.

Passend zur SCHUKO USB-Steckdose hat das Unternehmen zwei weitere USB-Ladeprodukte entwickelt: ein USB-Netzteil und eine USB-Ladestation. Ersteres bietet zwei USB-Ladeanschlüsse mit je 700 mA (oder einen mit 1.400 mA), letztere verfügt über einen rutschfesten Gerätehalter und liefert per Micro-USB-Anschluss einen Ladestrom von 1.400 mA – genug auch für leistungshungrige Tablets.

Die SCHUKO USB-Steckdose wurde mit mehreren internationalen Preisen,

darunter der Usability Park Publikumspreis auf der IFA in Berlin, ausgezeichnet.

Mehr erfahren Sie im Artikel „Clevere Steckdosen für Smartphones“ auf Seite 55 dieses Hefts.

Mehr Energieeffizienz für Gleichstromzüge

Schienenfahrzeuge recyceln Bremsenergie über ihre Traktionsmotoren, die als Generatoren arbeiten. Meist versorgt ein kleiner Teil dieser Energie bordseitige Verbraucher, während der Rest in das Netz gespeist und von anderen Zügen zum Beschleunigen genutzt wird. Ist dies nicht möglich, wird die überschüssige Energie über bord- oder streckenseitige Widerstände abgeführt. Dank des ABB ENVILINE™-Energierückgewinnungssystems ERS kann dies vermieden und der Gesamtenergieverbrauch ohne Investitionen in neues Rollmaterial oder Netzleitsysteme um 10 bis 30 % gesenkt werden.

Das ENVILINE ERS besteht aus einem IGBT-Wechselrichter, der mit vorhandenen Diodengleichrichtern im Gleichstrom-Unterwerk parallelgeschaltet ist und Energie vom DC-Bahnnetz in das Wechselstromnetz zurückspeist. Das ERS recycelt nicht nur überschüssige Bremsenergie, es kann auch Blindleistung mindern, als aktiver Filter die Auswirkungen von Oberschwingungen reduzieren und vorhandene Gleichrichter unterstützen.
Kommt eine Rückspeisung überschüssiger Energie nicht infrage, bietet ABB das ENVILINE-Energiespeichersystem ESS. Das ESS ist das kleinste, modularste und flexibelste Energiespeichersystem der Branche und mit Superkondensatoren zur kurzzeitigen Speicherung oder mit Batterien zur Bereitstellung großer Leistungsmengen erhältlich. Darüber hinaus trägt das ESS zur Spannungsstützung bei Spannungseinbrüchen, Steigerung der Traktionsleistung beim Beschleunigen und Reduzierung von Strafen für hohe Bedarfsspitzen bei. Das ESS kann als permanent installiertes oder mobiles Standalone-Bahnstromsystem eingesetzt werden, das herkömmliche netzgekoppelte Systeme ersetzt. In Verbindung mit Batterien kann das ESS zudem zur Notstromversorgung oder zur Umsatzgenerierung durch Teilnahme an lokalen Energiemärten eingesetzt werden, wie das Projekt von ABB und der SEPTA (South East Pennsylvania Transit Authority) in den USA zeigt.
Das ERS von ABB gewann 2013 in London den Railtex Award in der Kategorie Elektrifizierung.

Mehr erfahren Sie im Artikel „Sinnvolle Ergänzung“ auf Seite 28 dieses Hefts und unter http://www.abb.com/railway.

Ein See als Batterie

Eine der größten Stärken der Wasserkraft ist, dass Energie gespeichert und in Spitzenlastzeiten genutzt werden kann. Pumpspeicherwerke gehen noch einen Schritt weiter: Sie pumpen Wasser bergauf und können somit sowohl Bedarfsspitzen als auch -täler ausgleichen. Pumpspeicherwerke spielen eine zunehmend wichtige Rolle bei der Netzregulierung und der langfristigen Sicherung der Stromversorgung.

ABB hat 2013 den weltweit leistungsstärksten Frequenzumrichter für eine Wasserkraftanwendung im Pumpspeicherwerk Grimsel 2 der Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) in der Schweiz installiert. Das Werk verbindet den Oberaarsee mit dem über 400 m tiefer gelegenen Grimselsee.

Bisher konnte der Pumpbetrieb nur über die Anzahl der laufenden Pumpen (bis zu vier) geregelt werden. Mit dem leistungselektronischen 100-MW-Frequenzumrichter kann die Drehzahl einer dieser Pumpen entsprechend der verfügbaren überschüssigen Energie geregelt werden. Die Pumpe kann nun schneller angefahren, betrieben und abgefahren werden, Wasser effizienter und flexibler zur Stromerzeugung genutzt und der Beitrag des Kraftwerks zur Netzstabilität verstärkt werden.

Trotz des Fortschritts bei anderen Speichertechnologien bleibt die Pumpspeicherung die einzige ausgereifte und erschwingliche Technologie zur Energiespeicherung, die sich zur Netzregulierung eignet, weshalb ihr eine bedeutende Rolle in der Erzeugungslandschaft von morgen zukommt. Der neue Umrichter am Grimselsee ist ein Beitrag zur Schweizer Energiestrategie 2050, deren Ziel die langfristige Sicherstellung der Energieversorgung und die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien ist.

Mehr über den Grimsel-Frequenzumrichter lesen Sie in einer der kommenden Ausgaben der *ABB Review*.

Schnellladung am Bus

Die beiden größten Hindernisse für eine verbreitete Nutzung von Elektrofahrzeugen sind lange Ladezeiten und die Notwendigkeit zum häufigen Laden. Besonders im öffentlichen Personenverkehr kann die durch das Aufladen der Batterien entstehende Ausfallzeit die wirtschaftliche Tragfähigkeit eines elektrischen Betriebs gefährden. Außerdem steigt durch die Größe und das Gewicht der bordseitigen Batterien der Energieverbrauch, und die Fahrgastkapazität verringert sich. Eine elegante Lösung für dieses Problem bietet der TOSA-Bus, der zurzeit in Genf als Demonstrator unterwegs ist.

Dank der Schnellladetechnik von ABB kann der Bus binnen 15 s wiederaufgeladen werden. Da dies während der planmäßigen Stopps an den Haltestellen erfolgt, bleiben Fahrpläne unbeeinflusst. Sobald der Bus hält, fährt automatisch ein Kontakt auf dem Dach aus, der sich lasergesteuert mit einer festen Stromschiene verbindet. Eine Schnellladestation liefert dann 400 kW für 15 s.

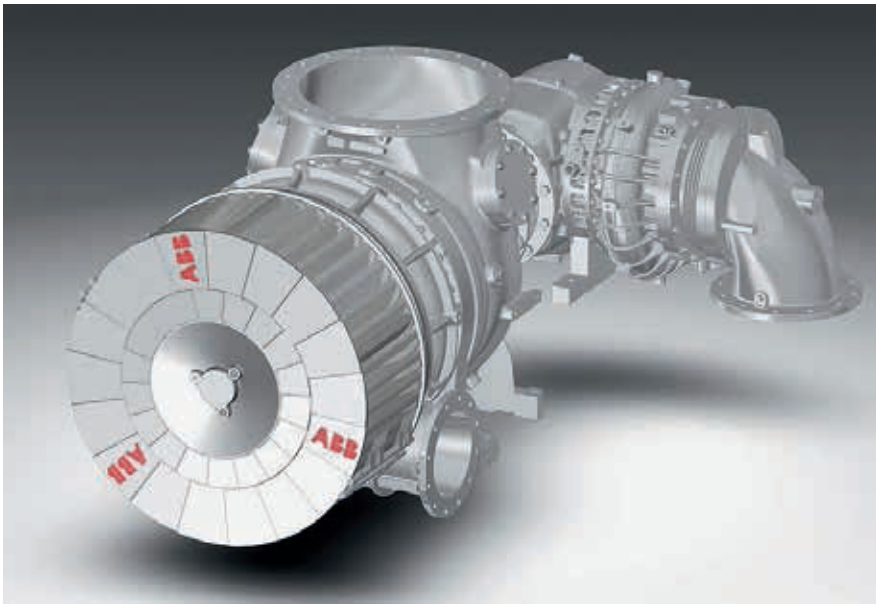
Die bereitgestellte Energie reicht zum Nachladen und trägt zur Reduzierung der erforderlichen Batteriekapazität bei. Weitere kurze Nachladungen erfährt der Bus durch Energierückgewinnung beim Bremsen. Ein längeres und vollständiges Aufladen erfolgt im Depot, wo der Bus 3 bis 5 min lang mit 200 kW über denselben dachmontierten Kontakt geladen wird.

Da das Schnellladen mit 400 kW eine Belastung für das lokale Stromnetz darstellen kann, ist die Ladestation mit

Superkondensatoren ausgestattet, die Stromspitzen glätten und die Belastung des Netzes reduzieren. Im Gegensatz zu Lösungen, die ein Aufladen über Nacht vorsehen, eignet sich TOSA für die Nutzung von Sonnenenergie.

Mehr erfahren Sie im Artikel „Einsteigen und Aufladen: Schnellladung als Fahrkarte für einen sauberen Nahverkehr“ auf Seite 64 der *ABB Review* 4/2013.

Power2 – neuer Schub für Turbolader



Die zweistufige Turboaufladung verspricht einen reduzierten Kraftstoffverbrauch und geringere Emissionen bei gleichzeitiger Erhöhung der Motorleistungsdichte. Mit der Baureihe Power2 800-M präsentiert ABB die zweite Generation von zweistufigen Turboladern für große Viertakt-Diesel- und -Gasmotoren.

Die wichtigsten Antriebsfaktoren für die Entwicklung moderner mittelschnell laufender Viertaktmotoren sind eine hohe Gesamteffizienz, niedrige Betriebskosten und eine hohe Leistungsdichte bei gleichzeitiger Erfüllung immer strengerer Emissionsvorschriften. Power2 von ABB ist ein zweistufiges Turboladersystem mit Ladedrücken von bis zu 12 bar, das Motorenbauern dabei hilft, diese Ziele zu erfüllen.

Alle Power2-Komponenten wurden für den Betrieb eines zweistufigen Systems in Schiffs-, Offshore- und Kraftwerksanwendungen optimiert.

Das System besitzt einen neuen herausnehmbaren Rotorblock mit speziellen Werkzeugen zur leichteren Demontage und Wartung sowie neue, für den kombinierten Betrieb in einem zweistufigen System optimierte Verdichter- und Turbinenstufen. Die Gesamtgröße des Systems wurde reduziert, um den Platzbedarf zu minimieren und trotzdem eine optimale Leistungsfähigkeit zu gewährleisten.

Große Industrieroboter – die nächste Generation

Seit über 30 Jahren entwickelt ABB große Industrieroboter für die Anforderungen der modernen Fertigung. Nun präsentiert ABB das bisher robusteste Exemplar. Die siebente Generation großer Industrieroboter, der IRB 6700, weist eine Vielzahl von Verbesserungen auf, die das Ergebnis enger Kundenbeziehungen und umfangreicher technischer Studien sind.

Die Roboter der neuen Generation zeichnen sich durch eine verbesserte Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und deutlich reduzierte Betriebskosten aus. Die Roboter der Reihe IRB 6700 besitzen eine höhere Handhabungskapazität und größere Reichweite und sind gleichzeitig schneller, leichter und genauer – bei einem um 15 % reduzierten Energieverbrauch.

Jeder Roboter der IRB 6700-Familie ist als Lean-ID-Version mit teilweise in den Roboter integrierten Kabeln und Schläuchen erhältlich. Ein mit Lean ID ausgestatteter IRB 6700 ist durch vorhersagbare Kabelbewegungen einfacher zu programmieren und zu simulieren. Außerdem besitzt er eine kompaktere Stellfläche und verlängerte Wartungsintervalle durch verringerten Verschleiß.

Bei der Konzeption des neuen Roboters spielte die Wartungsfreundlichkeit eine entscheidende Rolle für die Senkung der Betriebskosten. So wurden die Serviceroutinen verkürzt und die Wartungsintervalle verlängert. Auch die Zugänglichkeit der Motoren wurde verbessert. Die ersten sechs Roboter

der Familie mit Handhabungskapazitäten von 150 bis 235 kg und Reichweiten von 2,6 bis 3,2 m wurden Ende 2013 eingeführt. Zwei weitere Varianten mit Handhabungskapazitäten bis 300 kg werden zurzeit entwickelt und sollen Ende 2014 auf den Markt kommen.

Schnell und einfach: die AC500-S Sicherheits-SPS

Die AC500-S Sicherheits-SPS ist das neueste Produkt in der Familie der speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) vom Typ AC500. Sie bietet Ingenieuren flexible und leistungsstarke Funktionen, die eine schnelle und einfache Entwicklung sicherer Steuerungslösungen auch für die komplexesten Steuerungsanwendungen ermöglichen.
Die SPS ist bereits erfolgreich in Kranen, Hebezeugen, Robotern und Windenergieanlagen im Einsatz.

Die AC500-S basiert auf einer Dual-Prozessor-Architektur, die den funktionalen Sicherheitsstufen SIL3/PLe entspricht. Die Programmierung erfolgt mithilfe des Automation Builder, der integrierten Engineering-Suite von ABB für AC500 SPSs, CP600 Bedienpanel, Antriebe, Bewegungssteuerungen und Roboter.

Die SPS bietet viele neue, für den Sicherheitsmaschinenmarkt interessante Merkmale wie die Programmierung mithilfe von strukturiertem Text (ST), Kontakt- und Funktionsplänen. Die Unterstützung der ST-Programmierung ist einzigartig in der SPS-Welt und vereinfacht die Entwicklung, wenn komplexe Algorithmen und komplexe Mathematik beteiligt sind.

Die AC500-S Sicherheits-SPS bietet eine Reihe von SIL3/PLe-zertifizierten Sicherheits-E/A-Modulen einschließlich digitaler Ein- und Ausgänge sowie ein spezielles analoges Eingangsmodul für 0–20 mA (bzw. 4–20 mA).

Zur Vereinfachung des Systemdesigns und Steigerung der Produktivität können die Sicherheits-E/A-Module als Teil der SPS-Hauptlösung installiert oder in einem dezentralen E/A-Baugruppenträger untergebracht und über das PROFINET/PROFIsafe-Protokoll verbunden werden.

Die neue AC500-S Sicherheits-SPS ist perfekt in die skalierbare AC500-SPS-Plattform integriert. Dies ermöglicht dem Kunden die Wahl des zur Zielanwendung passenden Leistungsniveaus und beinhaltet den Betrieb in rauen Umgebungen und extremen klimatischen Bedingungen.

SafeRing Air – eine kompakte Lösung

ABB hat eine Ringkabelschaltanlage (RMU) entwickelt, die genauso kompakt ist wie die traditionelle SF_6-isolierte RMU, aber Luft als alternatives, umweltfreundliches Isoliergas nutzt und somit die intensive Verwendung von Epoxidwerkstoffen vermeidet.

SafeRing Air nutzt ein Isoliergas, das aus atmosphärischen Komponenten besteht, ohne dass dafür größere physische Abmessungen erforderlich sind.

Die Anlage ist für bis zu 12 kV in Leistungs- und Lasttrennschalterkonfigurationen erhältlich und für RMU-Anwendungen vorgesehen, die alternative Lösungen erfordern.

Das Design der Schaltanlage basiert auf einem vollständig gekapselten System mit einem Edelstahlbehälter, der alle spannungsführenden Teile und Schaltfunktionen enthält. SafeRing Air ist ideal für den Einsatz in kompakten Ortsnetzstationen, der Leichtindustrie, Gebäude- und Infrastrukturanwendungen. SafeRing Air bietet vollständige Dreiwege-Funktionalität mit der gleichen Stellfläche wie die aktuelle SF_6-isolierte Version und eignet sich optimal für Neuinstallationen und Nachrüstungen.

Das Design der Schaltanlage basiert auf dem bestehenden SafeRing/SafePlus-Portfolio, d. h. die Benutzerschnittstelle, Stellfläche, Ersatzteile und der Betrieb in Nachrüstungen sind identisch.

Digitale Schaltanlagen

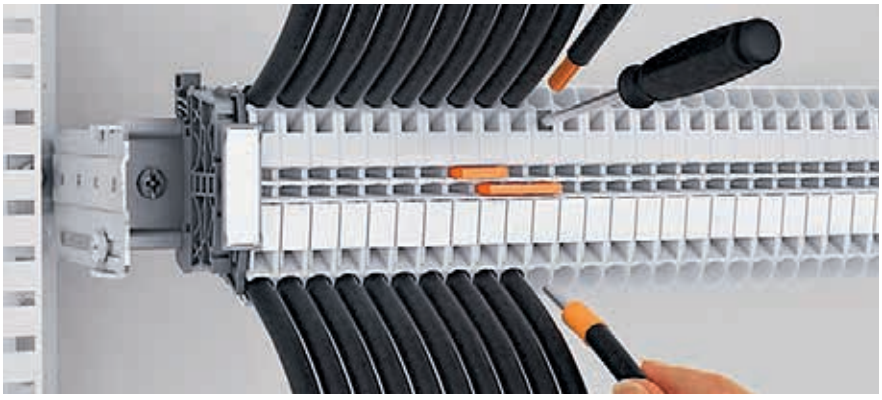
Dank innovativer Technologien befasst sich ABB seit fast einem Jahrhundert mit der kontinuierlichen Entwicklung von Schaltanlagen. UniGear Digital ist das neueste Produkt im Bereich der luftisolierten Mittelspannungs-Schaltanlagen.

UniGear Digital kombiniert das bewährte UniGear-Schaltanlagendesign mit einer einzigartigen Lösung für Schutz, Steuerung, Messung und digitale Kommunikation. Das neue Design beinhaltet modernste digitale Strom- und Spannungssensoren in jedem Schaltfeld sowie Multifunktionsrelais (IEDs) vom Typ ABB Relion, die die Kompatibilität mit dem digitalen Kommunikationsprotokoll IEC 61850 sichern.

Die Integration von Schalt- und Kommunikationsfunktionen verkürzt die Lieferzeiten um bis zu 30 %, vereinfacht Installation, Inbetriebnahme und Prüfung und ermöglicht Energieeinsparungen von bis zu 150 t CO_2-Äquivalent verglichen mit einer konventionellen UniGear-ZS1-Schaltanlage mit 14 Feldern und einer Betriebsdauer von 30 Jahren.
IED-Konnektivitätspakete sorgen für eine schnelle und einfache Anbindung der digitalen Schaltanlage an ein kundenseitiges SCADA-System. Neue Hochleistungsanwendungen wie Sammelschienen-Schnellumschaltung und schneller Lastabwurf werden durch den digitalen Ansatz ermöglicht. UniGear Digital lässt sich ohne komplexe zusätzliche Verdrahtung flexibel erweitern.
Der Einsatz von Strom- und Spannungssensoren erhöht die Sicherheit deutlich, da keine Gefahr von offenen Stromkreisen oder Ferroresonanzen in den Spannungswandlern besteht. Außerdem ermöglichen die Sensoren durch

standardisierte Varianten eine Verkürzung der Lieferzeit um bis zu 30 %, da keine individuellen Messwandler erforderlich sind. Die auf der IEC 61850-9-2 basierende Kommunikation garantiert äußerst zuverlässige Schutz- und Steuerungsfunktionen.
UniGear Digital ist zurzeit für bis zu 17,5 kV, 4.000 A und 50 kA erhältlich. Eine Erweiterung des digitalen Konzepts auf das gesamte UniGear-Portfolio für 12–24 kV ist vorgesehen.

Reihenklemmen mit schraubenloser Anschlusstechnik



Schaltschränke werden in immer mehr Industrieumgebungen zum gewohnten Bild. Nicht selten laufen Dutzende (in größeren Anlagen auch Tausende) von Kabeln in diesen Schränken zusammen. Dabei muss jedes Kabel korrekt angeschlossen werden, denn eine einzige falsche Verbindung kann die Funktionstüchtigkeit der gesamten Anlage gefährden. Um die Anschlusszuverlässigkeit zu erhöhen, hat ABB eine neue patentierte Reihenklemme mit PI-Federanschluss für Standard- und Premiumanwendungen auf den Markt gebracht.
Die Reihenklemmen mit PI-Federanschluss ermöglichen den Steckanschluss von starren und flexiblen Leitern mit Aderendhülse. Flexible Leiter ohne Aderendhülse können durch Betätigung der Feder mit einem Schraubendreher beim Einführen angeschlossen werden. Damit ist der Kabelabschluss um 50 % schneller als mit herkömmlichen Technologien.
Die PI-Federanschlüsse sind unempfindlich gegen Vibrationen, Stöße und aggressive Atmosphären, und globale Zertifizierungen eröffnen den Zugang zu weltweiten Märten und vielen industriellen Anwendungen einschließlich explosionsgefährdeter und maritimer Umgebungen.
Da die Einsteck- (Push-in) und die Federanschlusstechnik in einem einzigen Standardprofil zur Verfügung stehen, kann die Lagerhaltung um 50 % reduziert werden. Außerdem ist das Zubehör dasselbe wie für die ABB SNK Reihenklemmen mit Schraubanschluss, und die Abschlussplatten passen auf viele Klemmen, was den Logistikaufwand weiter reduziert.
Die asymmetrische Bauform ermöglicht eine direkte Sichtprüfung auf falsch gesetzte Klemmen. Die große Markierungsfläche erleichtert eine schnelle Vormarkierung mit dem Stift vor der endgültigen Beschriftung. Der Leitereintrittswinkel von 30° sorgt für eine Höhenersparnis von 15 % und ermöglicht gleichzeitig einen großzügigen Biegeradius.

Mehr über die ABB PI-Federanaschluss-Reihenklemmen lesen Sie in einer der kommenden Ausgaben der *ABB Review*.

Strom messen mit Licht

Faseroptischer Stromsensor in einem Hochspannungs-Leistungsschalter

KLAUS BOHNERT, RICHARD THOMAS, MICHAEL MENDIK – **Strom- und Spannungsmessungen sind zwei Schlüsselfunktionen für die Steuerung und den Schutz von elektrischen Netzen. Traditionell werden hierfür sogenannte Messwandler verwendet – recht voluminöse und schwere Geräte, die mehrere Tonnen wiegen können. Seit Langem ist bekannt, dass Sensoren auf Lichtwellenleiterbasis, die den Faraday-Effekt nutzen, großes Potenzial als attraktive neue Technologie für die Strommessung besitzen. Die bemerkenswerten Fortschritte, die in den letzten 20 Jahren auf dem Gebiet der optischen Telekommunikation erzielt wurden, haben Komponenten wie Lichtquellen, Lichtwellenleiter, Modulatoren und Fotodetektoren hervorgebracht, die auch zur Herstellung von zuverlässigen und kommerziell attraktiven faseroptischen Stromsensoren (Fiber-Optic Current Sensors, FOCSs) verwendet werden können. Darüber hinaus profitierten FOCSs von der raschen Entwicklung faseroptischer Kreisel in den vergangenen Jahren, die ähnliche physikalische Effekte nutzen.**

Titelbild
Viele Jahrzehnte lang war die Strommessung in Hochspannungsanlagen von voluminösen Messwandlern abhängig, die mehrere Tonnen wiegen können. Diese können nun durch den faseroptischen Stromsensor von ABB ersetzt werden, der Dank seiner geringen Größe in Primärgeräte wie Leistungsschalter integriert werden kann.

Vor über 40 Jahren erkannte man, dass der Faraday-Effekt in Lichtwellenleitern als Grundlage für eine neue – und bessere – Technologie zur Strommessung genutzt werden könnte.

Bisher werden Ströme in Hochspannungsanlagen mithilfe von voluminösen und schweren Stromwandlern gemessen. Diese nutzen das Prinzip der elektromagnetischen Induktion, um aus dem Primärstrom einen kleinen Sekundärstrom – typischerweise 1 A oder 5 A bei Nennstrom – abzuleiten, der dann als Eingangsgröße für Schutzrelais oder Energiezähler dient. Solche Messtransformatoren stellen seit vielen Jahren den Stand der Technik dar und arbeiten zuverlässig unter den rauen Bedingungen in Freiluftanlagen. Doch neben ihrer Größe und ihrem Gewicht weisen sie eine Reihe weiterer Schwächen auf. So ist der Sekundärstrom aufgrund magnetischer Sättigung und begrenzter Bandbreite zum Beispiel häufig kein genaues Abbild des Primärstroms.

Vor über 40 Jahren erkannte man, dass der Faraday-Effekt in Lichtwellenleitern als Grundlage für eine neue – und bessere – Technologie zur Strommessung genutzt werden könnte. Doch erst in den letzten 20 Jahren hat sich die Technik so weit entwickelt, dass sie als kommerziell interessante Basis für FOCS-Anwendungen eingesetzt werden kann. Der bemerkenswerte Fortschritt im Bereich der optischen Kommunikation hat viele Komponenten wie Lichtquellen, Lichtwellenleiter, Modulatoren und Fotodetektoren hervorgebracht, die auch für FOCSs verwendet werden können.

Darüber hinaus profitierten FOCSs von der Entwicklung faseroptischer Kreisel, die heute in zahlreichen Navigationssystemen z. B. in der Luft- und Raumfahrt im Einsatz sind. Diese Kreisel nutzen ähnliche Verfahren wie FOCSs, um die differenzielle Phasenverschiebung von Lichtwellen zu messen. Während die Phasenverschiebung bei optischen Kreiseln durch Rotation verursacht wird (Sagnac-Effekt), wird sie bei optischen Stromsensoren durch das Magnetfeld des zu messenden Stroms erzeugt.

Geschichte des FOCS

Im Jahr 2005 brachte ABB einen hochgenauen faseroptischen Stromsensor zur Messung von Gleichströmen (DC) bis 600 kA auf den Markt, insbesondere für Anwendungen in der elektrolytischen Metallgewinnung [1, 2] → 1. Die Genauigkeit des Sensors liegt über einen Bereich von 1 % bis 120 % des Nennstroms und für Temperaturen von –40 °C bis +80 °C innerhalb von 0,1 %. Mittlerweile ist der Sensor weltweit in Aluminiumhütten, Kupfergewinnungsanlagen, Chlorfabriken und sogar Kernfusions-Forschungsanlagen im Einsatz.

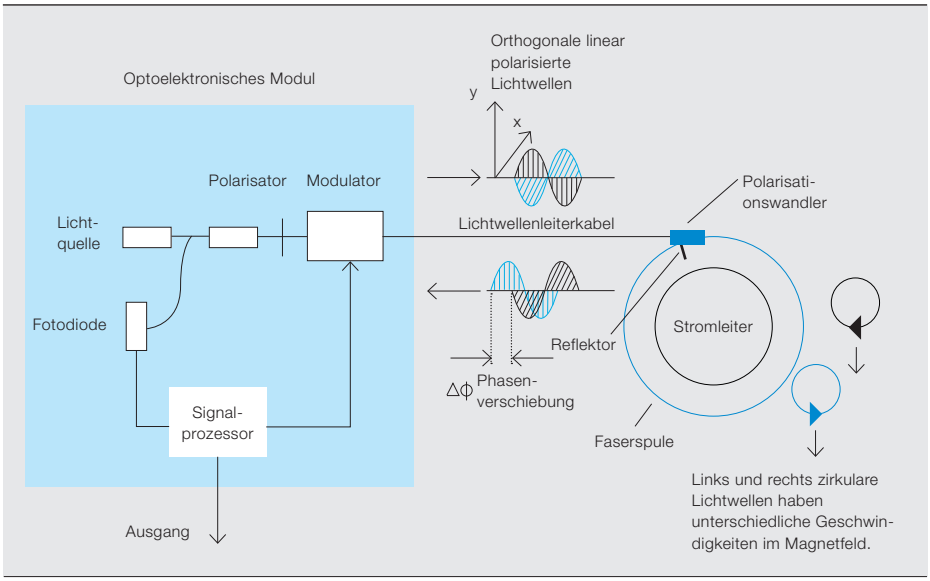
In der letzten Zeit hat ABB den Sensor im Hinblick auf den Einsatz in Hochspannungs-Schaltanlagen weiterentwickelt. Aufgrund seiner geringen Größe und seines flexiblen Formfaktors muss ein optischer Stromsensor nicht wie ein herkömmlicher Messwandler als freistehendes Instrument ausgeführt sein, sondern kann stattdessen in primäre Hochspannungskomponenten wie Leistungsschalter integriert werden. Dies ermöglicht erhebliche Platz- und Kosteneinsparungen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der neuen Technologie ist ihre Fähigkeit zur digitalen Kommunikation mit Steuer- und Schutzgeräten über einen optischen Prozessbus. Der Prozessbus ersetzt eine Vielzahl von Kupferkabeln und bietet mehr Flexibilität bei der Konfiguration einer Schaltanlage.

1 Faseroptischer Stromsensor für hohe Gleichströme

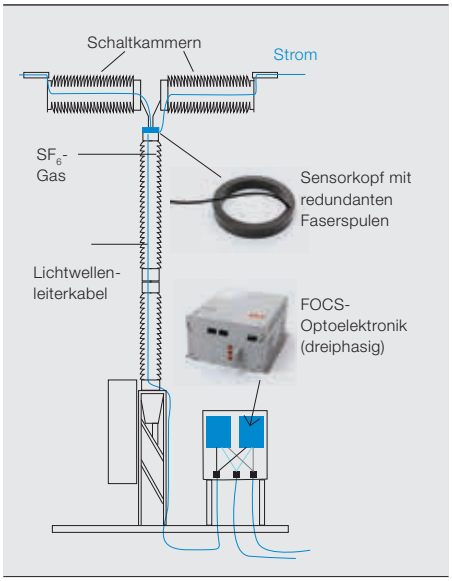
Funktionsweise

Der FOCS nutzt den Faraday-Effekt. Dieser beschreibt das Phänomen, dass sich links und rechts zirkular polarisierte Lichtwellen in einem Medium unter Einwirkung eines Magnetfelds mit etwas unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten. Um diesen Effekt zu nutzen, wird eine linear polarisierte Welle in zwei solche zirkular polarisierte Komponenten zerlegt. Diese werden dann in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt, der einem Magnetfeld ausgesetzt ist (letzteres wird in dem hier beschriebenen Fall von dem zu messenden Strom verursacht). Der durch den Faraday-Effekt hervorgerufene Geschwindigkeitsunterschied und die relative Phasenverschiebung zwischen den beiden Komponenten bewirkt

2 Faseroptischer Stromsensor



3 Integration eines FOCS in einen Freiluft-leistungsschalter (LTB)



eine Drehung der linearen Polarisation der Welle. Hieraus kann die Größe des Stroms abgeleitet werden.

Die Hauptbestandteile des FOCS sind ein optoelektronisches Modul (OE-Modul) auf Erdpotenzial und eine Sensorfaserspule, die den Stromleiter umschließt → 2. Das OE-Modul beinhaltet eine Halbleiter-Lichtquelle und eine Detektionseinheit. Letztere ist ein geschlossener Regelkreis bestehend aus einem faseroptischen Polarisator, einem optischen Phasenmodulator, einer Photodiode und einem digitalen Signalprozessor. Das Modul sendet zwei Lichtwellen mit zueinander senkrechter linearer Polarisation zur Sensorfaserspule. Eingangs der Spule wandelt ein faseroptischer Polarisationswandler die linearen Wellen in eine links und eine rechts zirkular polarisierte Welle um. Aufgrund des Faraday-Effekts bewegen sich diese wie oben erläutert mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch die im Magnetfeld des Stroms befindliche Sensorfaser, wodurch sich ein optischer Phasenunterschied ergibt. Am Ende der Faser werden die Wellen reflektiert und gelangen auf gleichem Weg zurück zum OE-Modul, wo sie im Polarisator zur Interferenz gebracht werden. Das daraus resultierende Signal ist abhängig vom Phasenunterschied und wird von der Fotodiode erfasst. Der geschlossene Regelkreis kompensiert die durch den Strom hervorgerufene Phasenverschiebung mithilfe des Phasenmodulators, sodass der Phasenunterschied der Wellen bei ihrer Interferenz im Polarisator stets gleich null ist. Das Rückstellsignal zum Modulator ist ein Abbild des Primärstroms, von dem das digitale Sensorausgangssignal abgeleitet wird. Der geschlossene Regelkreis hat den besonderen Vorteil, dass das Signal über den gesamten Messbereich exakt proportional zum Primärstrom ist.

Der Phasenunterschied der beiden Lichtwellen nach dem zweifachen Umlauf durch die Faserspule ist proportional zur Anzahl der Faserwindungen und dem Linienintegral des Magnetfelds entlang des durch die Sensorfaser beschriebenen Wegs. Geometrische Parameter wie der Spulendurchmesser oder die Position des Leiters innerhalb der Faserspule beeinflussen das Signal nicht. Gleiches gilt auch für Ströme außerhalb der Spule.

Der Betrieb der Sensorfaser im Reflexionsmodus hat den Vorteil, dass der Sensor mechanischen Störungen gegenüber unempfindlich wird. Am verspiegelten Spulenende tauschen die Lichtwellen ihre Polarisation. Dadurch heben sich vibrationsbedingte Phasenverschiebungen der Wellen bei einem zweifachen Umlauf gegenseitig auf, während sich die nicht reziproken magneto-optischen Phasenverschiebungen verdoppeln. Das Grundkonzept des Sensors wurde 1992 bei ABB erfunden und ist später auch von anderen übernommen worden.

Über die Anzahl der Faserwindungen kann der Messbereich an die jeweilige Anwendung angepasst werden. Der Messbereich des hier beschriebenen Sensors beträgt

Der bemerkenswerte Fortschritt im Bereich der optischen Kommunikation hat viele Komponenten hervorgebracht, die auch für FOCSs verwendet werden können.

±180 kA. Der Betriebstemperaturbereich des Sensorkopfs reicht von unter –40 °C bis 105 °C. Das OE-Modul ist für den Betrieb in einem beheizten Freiluftgehäuse ausgelegt. Um alle drei Stromphasen abzudecken, kann es mit drei Faserspulen betrieben werden.

Vorteile des FOCS

Zu den besonderen Vorteilen des FOCS gehören:

Hohe Genauigkeit

Innerhalb der durch die Ausgangsdatenrate bestimmten Bandbreite liefert der Sensor ein getreues Bild der Wellenform des Primärstroms, das nicht durch magnetische Sättigung oder Remanenz beeinträchtigt wird. Die Gleichstromanteile eines Stroms werden korrekt erfasst. Der

4 Dreiphasiges FOCS-System (redundant)

5 REL670-Relais mit IEC-61850-9-2-Kommunikation

FOCSs profitierten auch von der Entwicklung faseroptischer Kreisel.

Sensor kann sowohl für den Netzschutz als auch die Energiezählung eingesetzt werden.

Geringere Umweltbelastung

Der FOCS kommt weitgehend ohne das Aluminium, Kupfer, Isoliermaterial und Transformatorenöl aus, das einen entsprechenden konventionellen Stromwandler ausmacht. Ein herkömmlicher Stromwandler für 550 kV kann z. B. 3,5 t wiegen und 500 kg Öl enthalten.

Platzsparende Integrationsmöglichkeit

Der Sensor muss nicht als freistehendes Gerät ausgeführt sein, sondern kann in andere Komponenten einer Schaltanlage wie Leistungsschalter oder Hochspannungsdurchführungen integriert werden ➔ 3.

Betriebssicherheit

Die Gefahr eines Ausfalls durch Explosion (z. B. bei Erdbeben) oder Sicherheitsrisiken aufgrund eines offenen Sekundärkreises sind ausgeschlossen. Die Elektronik ist galvanisch von der Hochspannung getrennt.

Digitale Kommunikation

Ein faseroptischer Prozessbus nach IEC 61850-9-2LE verbindet den FOCS mit Schutz- und Steuergeräten auf Schaltfeldebene und ersetzt Mengen an Kupferkabeln. Darüber hinaus bietet er mehr Flexibilität bei der Konfiguration bzw. späteren Neukonfiguration einer Schaltanlage. Die digitalen Messwerte werden, abhängig von der Netzfrequenz (50 bzw. 60 Hz), mit einer Frequenz von 4 bzw. 4,8 kHz ausgegeben. Höhere Datenraten (z. B. bis zu 100 kHz), die für andere Anwendungen interessant sein können, sind mit alternativen Schnittstellenoptionen möglich.

FOCS in Freiluftleistungsschaltern

Dank der geringen und leicht anpassbaren Größe der Faserspule kann der Sensor in andere Komponenten einer Unterstation integriert werden. So lässt sich ein redundantes dreiphasiges FOCS-System z. B. in einen ABB-Zweikammerschalter vom Typ HPL550B2 für 55 kV integrieren ➔ 3–4. Jedes der drei in der Abbildung gezeigten ringförmigen Sensorkopfgehäuse enthält zwei Faserspulen und wird am oberen Ende des entsprechenden Stützisolators montiert. Der Strompfad wird so verändert, dass der Strom wie dargestellt durch die Spulen fließt. Die beiden Lichtwellenleiter zu den Spulen befinden sich in einem speziellen Schutzkabel, das für die Gasatmosphäre im Leistungsschalter (Live Tank Breaker, LTB) geeignet ist. Das Kabel verläuft durch das Gasvolumen zum unteren Isolatorende und verlässt den Isolator auf Erdpotenzial durch eine gasdichte Durchführung. Die beiden dreiphasigen OE-Module befinden sich in einem Gehäuse in Schalternähe oder am Traggerüst des Schalters. Redundante IEC-61850-9-2LE-Verbindungen verbinden die Sensoren mit Schutzrelais wie dem ABB REL670 im Stationsgebäude ➔ 5. Diese Lösung bietet viele Vorteile:

- Installation im Werk: Die Integration der Sensorköpfe in den LTB und der OE-Module in deren Gehäuse erfolgt im Werk. Die einzig verbleibende Installationsarbeit vor Ort ist die Montage des Gehäuses für die OE-Module und die Verlegung der Lichtwellenleiterkabel.
- Der Sensorkopf ist Teil des LTB-Stützisolators und behindert die Montage des Schalters vor Ort nicht. Tatsächlich sind nur geringe Veränderungen des LTB-Montageverfahrens erforderlich.
- Es ist kein separater Isolator erforderlich, um die Lichtwellenleiter von Hochspannung auf Erdpotenzial zu führen.
- Keine zusätzliche Stellfläche: Der für einen herkömmlichen oder einen freistehenden optischen Stromwandler erforderliche Stellplatz entfällt. Dies reduziert die Größe der Schaltanlage und spart Grundstückskosten, besonders wenn die Sensoren mit Leistungstrennschaltern kombiniert werden [3].
- Das Fundament und das Traggerüst für den Stromwandler werden nicht mehr benötigt.
- Die Platzierung der OE-Module in der Nähe des LTB minimiert die Länge der erforderlichen Sensorfaserkabel.
- Die Übertragung von digitalen optischen Signalen von der Sensorelektronik zur Schaltanlagensteuerung über die redundante IEC-61850-9-2LE-Verbindung ist unempfindlich gegen Störungen.

Das Design des LTB mit integriertem FOCS wurde anhand der relevanten Typprüfungen gemäß IEC-Normen verifiziert.

6 Freiluftleistungsschalter für 420 kV mit integriertem FOCS

7 LTB mit integriertem FOCS

Dazu gehörten Hochspannungsprüfungen, T100-Prüfungen (d. h. Prüfung der Schaltfunktion bei hohen Strömen und Spannungen), Erwärmungsprüfungen (Erwärmung bei einem Effektivstrom von 4.000 A) sowie mechanische Dauerprüfungen mit über 10.000 Schaltzyklen. Die korrekte Funktion des Sensors wurde vor, während und nach den Tests überprüft. Außerdem wurden Prüfungen zur Feststellung der elektromagnetischen Störfestigkeit des Sensors durchgeführt.

Sicherung der Zuverlässigkeit

Die FOCS-Technologie hat sich bereits seit mehreren Jahren in den rauen Umgebungen der elektrolytischen Metallgewinnung bewährt. Doch die Anforderungen an die Zuverlässigkeit in Hochspannungs-Schaltanlagen sind noch strenger – so sollte z. B. während der Lebensdauer keine besondere Wartung oder Neukalibrierung vor Ort erforderlich sein. Daher wird die Zuverlässigkeit des FOCS und seiner Komponenten durch beschleunigte Alterungsprüfungen und Langzeitversuche im Labor geprüft. Selbstdiagnosefunktionen überwachen kontinuierlich die Funktion des Sensors. Außerdem werden vorkommerzielle Feldinstallationen dazu genutzt, Installations- und Inbetriebnahmeerfahrung mit der neuen Technologie zu sammeln und ihre Zuverlässigkeit unter den Bedingungen in einer Unterstation nachzuweisen.

Technologie-Pilot

Eine FOCS-Pilotinstallation wurde in Zusammenarbeit mit dem schwedischen Übertragungsnetzbetreiber Svenska Kraftnät in einer 420-kV-Schaltanlage eingerichtet ➔ 6, ➔ 7. Die Installation besteht aus einem dreiphasigen LTB mit einem redundanten dreiphasigen FOCS-System. Die beiden OE-Einheiten sind im Antriebsschrank des Schalters für die Phase B montiert. Zwei IEC-61850-9-2-Verbindungen verbinden die OE-Einheiten mit zwei digitalen Relais vom Typ ABB REL670 im Stationsgebäude. Ein konventioneller Stromwandler mit Schutz- und Messkernen dient als Referenz. Eine PPS-Quelle (Puls pro Sekunde) synchronisiert das System. Für einen langfristigen Vergleich werden die Daten in regelmäßigen Abständen aufgezeichnet. Darüber hinaus zeichnet das System den Stromverlauf bei Netzstörungen auf. Neben der Verifizierung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Sensors unter Feldbedingungen diente der Pilot zur Überprüfung der Montageverfahren im Werk sowie der Installation und Inbetriebnahme vor Ort.

Das System ist seit April 2010 störungsfrei in Betrieb. Die Leistungsfähigkeit liegt innerhalb der Vorgaben. Darüber hinaus zeigt sich deutlich die Überlegenheit eines FOCS gegenüber herkömmlichen Stromwandlern im Falle transienter Fehlerströme. Dies könnte in Zukunft zur Entwicklung effizienterer Schutz- und Steuerungsfunktionen führen.

Blick in die Zukunft

Die FOCS-Technologie wird als Plattform für andere Hochspannungsanwendungen dienen. Der variable Durchmesser des Sensorkopfs ermöglicht eine einfache Anpassung des Sensors z. B. an gasisolierte Schaltanlagen (GIS) oder Generatorschalter. Durch die entsprechende Wahl der Anzahl von Faserwindungen lässt sich auch bei niedrigen Strömen (z. B. bei Nullstrommessungen) eine hohe Genauigkeit erreichen. Das schnelle Ansprechverhalten des FOCS und seine präzise Messung sowohl von Wechselströmen als auch von transienten Gleichströmen könnten den Grundstein für neue oder verbesserte Schutz- und Überwachungsfunktionen für Schaltanlagen legen.

Klaus Bohnert
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Schweiz
klaus.bohnert@ch.abb.com

Richard Thomas
ABB Power Products
Ludvika, Schweden
richard.thomas@se.abb.com

Michael Mendik
ehemals ABB Power Products
Mt. Pleasant, PA, USA
michael.mendik@sma-america.com

Literaturhinweise

[1] Bohnert, K., Guggenbach, P.: „Eine Revolution in der Gleichstrommessung“. *ABB Technik* 1/2005: 6–10.

[2] Bohnert, K. et al. (2007): „Highly Accurate Fiber-Optic DC Current Sensor for the Electrowinning Industry“. IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 43, No. 1: 180–187.

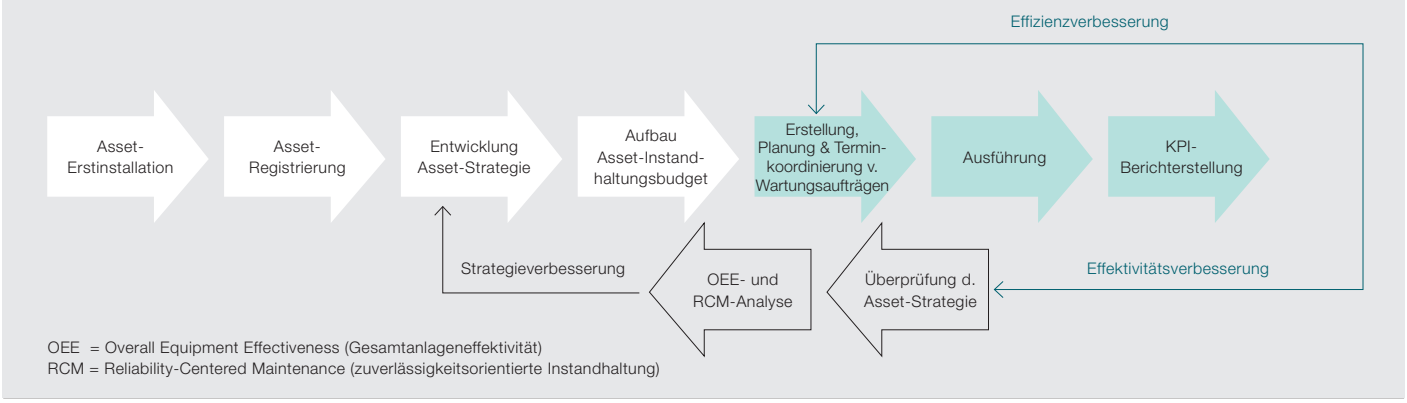
[3] Jing, L. et al.: „Small footprint, high performance: Design of an air-insulated switchgear substation based on new technology“ *ABB Review Special Report: Dancing with the dragon*: 38–42.

Hilfreiche Einblicke

Ein integrierter Ansatz zum Asset-Health-Management

KAREN SMILEY, SHAKEEL MAHATE, PAUL WOOD, PAUL BOWER, MARTIN NAEDELE – Anlagenintensive Branchen stehen zunehmend unter dem Druck, die Nutzung und Instandhaltung ihrer Betriebsmittel zu verbessern. Aufgrund der großen Auswirkungen, die anlagenbezogene Entscheidungen auf die Profitabilität, Compliance und Kundenzufriedenheit haben können, gewinnt Asset-Health-Management als entscheidender Unternehmensprozess zunehmend an Bedeutung. Das ABB Asset Health Center (AHC) verbindet Business-Intelligence- und Asset-Analysen mit Expertenwissen über industrielle Betriebsmittel und Branchen, um fundiertere Entscheidungen zu ermöglichen und unnötige Kosten zu vermeiden. Zurzeit nutzt ABB ihr Know-how auf dem Gebiet der elektrischen Energieübertragung, um einem großen nordamerikanischen Versorgungsunternehmen dabei zu helfen, seine Investitionsausgaben, Betriebsabläufe und Instandhaltungspläne zu optimieren. Eine neue Arbeitsumgebung für Fachexperten ermöglicht die Erweiterung dieser Analysen und die Ausdehnung der Asset-Health-Management-Funktionalitäten auf andere Bereiche.

1 Der Asset-Management-Lebenszyklus (GM Research 2013) [1]



OEE = Overall Equipment Effectiveness (Gesamtanlageneffektivität)
RCM = Reliability-Centered Maintenance (zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung)

Ein Asset (zu Deutsch „Betriebsmittel“) ist eine kapitalintensive physische Ressource mit einem Lebenszyklus und unvermeidbaren Kosten ➔ 1. In assetintensiven Branchen ist ein gutes Management dieser Assets entscheidend für den Geschäftserfolg. Angesichts verschärfter Randbedingungen, verursacht durch eine alternde Infrastruktur, finanziellen Druck, gesetzliche Bestimmungen und den Verlust von qualifizierten Mitarbeitern durch Ruhestand, erfüllen traditionelle Instandhaltungsstrategien, die ausschließlich auf reaktiven oder geplanten Maßnahmen basieren, die Geschäftsziele vieler ABB-Kunden nicht mehr. Da sich Asset-Entscheidungen im Allgemeinen auf viele Geschäftsprozesse auswirken, sind Entscheidungsträger gezwungen, mehrere Planungshorizonte zu berücksichtigen und verschiedene Zielsetzungen gegeneinander abzuwägen. Wissensbasierte Asset-Analysen können die Auswirkungen verschiedener Entscheidungsalternativen auf wichtige Leistungskennzahlen des Unternehmens aufzeigen.

Titelbild
Das ABB Asset Health Center liefert Kunden die praktischen Erkenntnisse, die sie benötigen, um Entscheidungen zum Betrieb und zur Instandhaltung von Assets zu treffen und umzusetzen, die für ihr Unternehmen optimal sind.

Quellen von Asset-Daten

Asset-Analysen können traditionelle Aufzeichnungen über den Funktionszustand (engl. „health“ = Gesundheit) von Assets mit betrieblichen Leistungsdaten, Metadaten aus der Asset-Registrierung und Daten von Sensoren, Tests und Inspektionen kombinieren. Mit zunehmender Komplexität und Anzahl von Systemen werden auch diese Datenmengen größer. So kann es sein, dass Daten über den „Gesundheitszustand“ von Assets ungenutzt in konventionellen Offline- oder Papieraufzeichnungen „gefangen“ sind oder dass Live-Datenströme von intelligenten Assets aufgrund mangelhafter Speicherung verloren gehen. Häufig werden Daten in Datenbanken verschiedener Anbieter gespeichert, die ein und dasselbe Asset auf unterschiedliche Weise identifizieren.

Diese Daten- und Analyseherausforderungen können durch sorgfältige Überlegung kombiniert mit Instrumentierung, Datenaustausch und Innovation bewältigt werden. In einigen Regionen der Welt treiben Energieversorgungsunternehmen (EVUs) den Einsatz von Asset-Health-Sensoren in ihrer Ausrüstung energisch voran, um einen besseren Einblick in die Leistungsfähigkeit ihrer Assets zu erhalten. Doch auch eine Datenverarbeitung und -analyse auf der Basis bereits vorhandener Daten kann ein guter Ausgangspunkt für das Asset-Health-Management sein. So können zum Beispiel isolierte Daten importiert oder Asset-Daten durch Scannen und Verarbeitung von Offline-Protokollen extrahiert werden.

Asset-Daten wirksam nutzen

Neben der Herausforderung der Erfassung und Integration aller verfügbaren Asset-Daten besteht eine weitere Herausforderung darin, zu wissen, was für jedes Asset im Laufe seines Lebenszyklus zu tun ist. Asset-Analysen, die in der Lage sind, Fachwissen (engl. Subject Matter Expertise, SME) wirksam einzusetzen, ermöglichen es Unternehmen, von prädiktiven, zustandsabhängigen Instandhaltungsstrategien zu profitieren. Eine korrektive Instandhaltung kann in manchen Fällen die beste Wahl darstellen, doch ohne die richtigen Werkzeuge und deren gegenseitige Integration sind Unternehmen nicht in der Lage, bestmögliche Asset-Entscheidungen zu treffen. Um optimale Ergebnisse erzielen zu können, benötigen Kunden praktische Informationen darüber,

Asset-Analysen können die Auswirkungen verschiedener Entscheidungsalternativen auf wichtige Leistungskennzahlen des Unternehmens aufzeigen.

Für optimale Ergebnisse werden praktische Informationen darüber benötigt, wie sich Entscheidungen und Pläne zum Betrieb und zur Instandhaltung von Assets auswirken.

2 Treiber für die Asset-Integration (GTM Research, 2013) [1]

Art des Treibers	Treiber	Grund
Wirtschaftlich	Zuverlässigkeit	Reduzierung der Gefahr von Bußgeldern
		Reduzierung von unerwünschten Serviceunterbrechungen
		Reduzierung der Auswirkungen einer veränderten Personaldemografie
		Verlängerung der Asset-Lebensdauer und Reduzierung der Ausfallzeiten
	Personaleffizienz	Entscheidungsunterstützung zur Priorisierung der Instandhaltung
		Verbesserung der Einsatzplanung von Wartungsmannschaften
		Automatisierung des Analyseprozesses zur Reduzierung der Personalkosten
	Risikomanagement	Reduzierung des Risikos von katastrophalen Ausfällen und Kollateralschäden
	Optimierung der Asset-Nutzung	Verbesserung der Kenntnis des Asset-Zustands für eine dynamische Beanspruchung
Nicht wirtschaftlich	Compliance und Berichterstellung	Reduzierung der erforderlichen Zeit zur Erstellung von Leistungsberichten
		Formalisierung der Prozesse zur Asset-Evaluierung, -Überwachung und -Beschaffung
	Vernetzungsinfrastruktur	Dank sinkender Kosten und technischer Fortschritte ist die die Kommunikation mit entfernten, isolierten Sensoren günstiger und verfügbarer geworden.
	Datenerfassungs- und Verarbeitungsleistung	Eine zunehmende Zahl von digitalen Überwachungs- und Steuergeräten in der Industrie und Versorgungswirtschaft liefert einen immensen Datenstrom, der dank verteilter DV und drastisch gesunkener Hardwarekosten zu einem Bruchteil der Kosten verarbeitet werden kann.
	Stärkere Unternehmensintegration	Der Versuch, unternehmensweite Daten zur Steigerung der Effizienz zu nutzen, fördert die Integration verschiedener Systeme und Gruppen und das Zusammenwachsen operativer „Silos“ in assetintensiven Unternehmen.

wie sich ihre Entscheidungen und Pläne zum Betrieb und zur Instandhaltung von Assets im Laufe der Zeit auf ihre Ziele auswirken und welche Maßnahmen sie treffen können. Das ABB Asset Health Center (AHC) ist darauf ausgelegt, diese Herausforderungen zu bewältigen, indem es diese entscheidenden Erkenntnisse liefert.

In assetintensiven Branchen ist ein gutes Management dieser Assets entscheidend für den Geschäftserfolg.

Asset Health Center

Das Ziel des AHC ist es, Daten zu erfassen und zusammenzustellen, Erkenntnisse zu liefern und Entscheidungsunterstützung zu bieten, um Unternehmen eine Vielzahl wirtschaftlicher und nicht wirtschaftlicher Vorteile zu sichern → 2. Das AHC basiert auf der Business-Intelligence-(BI-)Plattform FocalPoint von ABB.

Die FocalPoint-Plattform liefert Kunden branchenspezifische Datenanalysen und Visualisierungen und bietet somit eine gute Grundlage für die Bereitstellung von Asset-Analysen für die von ABB bedienten assetintensiven Branchen. Die Fähigkeit der Plattform, Daten von unterschiedlichen Systemen zu integrieren, ermöglicht eine umfassende Sicht auf jedes Asset. Besonders die Möglichkeit, Daten von traditionellen IT-Systemen (z. B. Asset-Management-Programme oder mobile Inspektionstools) und Systemen wie SCADA oder speziellen Sensornetzwerken zusammenzuführen und auf eine ganzheitliche Weise zu analysieren, eröffnet neue Möglichkeiten zur Beurteilung von Risiken und Unterstützung von Entscheidungen hinsichtlich der Instandhaltung oder des Austauschs von Assets.

Das AHC verbindet die Integration von IT (Informationstechnologie) und OT (operative Technologie) mit Analysen und Dashboards wie dem Asset-Monitor → 3 und fachbezogenen Visualisierungen, um Pla-

3 Der AHC Asset-Monitor bietet leicht interpretierbare Einblicke in die Risiken und Folgen von Ausfällen in einem Asset-Bestand wie der hier gezeigten Transformatorenflotte.

nern, Entscheidungsträgern und Führungskräften die notwendigen Einblicke zu gewähren.

Vorteile des AHC

Die vier Komponenten des AHC ergänzen einander ➔ 4. Masterdaten sowie Leistungs- und Zustandsdaten der Assets dienen als Eingaben für die Analysen. Ergebnisse der Zustandsdiagnose, Empfehlungen und Angaben zur Kritikalität werden visualisiert. Auf Grundlage der Ergebnisse von Analysen werden Entscheidungen getroffen und Servicemaßnahmen ausgelöst. Die Servicemaßnahmen führen wiederum zu aktualisierten Asset-Informationen.

Innerhalb seiner Analysestruktur führt das AHC die assetspezifischen Diagnose-, Kritikalitäts- und Optimierungsmodule aus. Die Algorithmen, die den Kern dieser Module bilden, wurden von ABB-Experten für Transformatoren und Leistungsschalter in Stromübertragungs- und -verteilungsnetzen entwickelt.

Die Daten aus der Asset-Health-Analyse können unternehmensweit genutzt werden. So werden generische BI-Toolkits mit dem Wissen von Asset- und Domänenexperten durch einen umfassenden Ansatz für ein besseres Asset-Management ergänzt.

Nutzung von Asset-Wissen in Analysen

Fachexperten (engl. Subject Matter Experts, SMEs) verstehen, wie ein komplexes System zusammengesetzt ist, kennen seine Eigenschaften und Kompromisse, die wichtigsten technischen Designentscheidungen, die Umgebungen, in denen das Asset betrieben werden kann, und wissen, wie sich Wartungsupdates oder -ereignisse auf den Funktionszustand eines Assets oder Systems auswirken können. SME-Wissen wird in verschiedenen Arten von Asset-Analysen genutzt, z. B.:

- Asset-Zustand: Modelle der Asset-Leistung charakterisieren den „Gesundheitszustand“ von Assets. Dies beinhaltet die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls oder verminderter Leistung, die Identifizierung wahrscheinlicher Ursachen für bestimmte Zustände und die Empfehlung von Verbesserungsmaßnahmen.
- Asset-Bedeutung: Kritikalitätsmodelle beschreiben die Bedeutung des Assets durch Charakterisierung der Auswirkungen von Veränderungen des Asset-Zustands auf die Leistung des Industrieunternehmens. Dies schließt die Auswirkungen auf Betriebsabläufe, die Auswirkungen von Wiederherstellungsmaßnahmen und die gegenseitige Abhängigkeit von anderen Assets ein.
- Entscheidungsunterstützung: Analysen zur Unterstützung von Asset-Entscheidungen verbinden Wissen mit Daten, um eine wirksame Orientierung für assetbezogene Entscheidungen zu liefern.

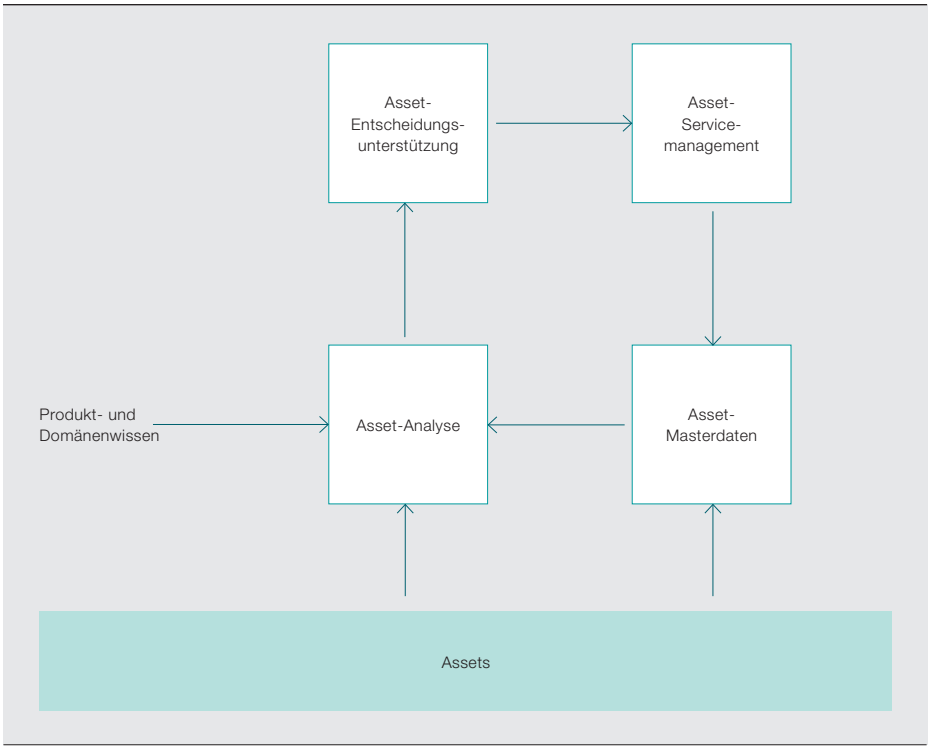
So kann für eine nützliche Entscheidungsunterstützungsanalyse für ein regionales Stromübertragungsunternehmen z. B. das Gesamtrisiko eines Ausfalls in Betracht gezogen werden (durch Kombination von Zustands- und Kritikalitätsinformationen), um die optimalen Investitionsbudgets, Betriebs- und Instandhaltungspläne zu bestimmen.

Schnellere Analyseerstellung durch Asset-Experten

Wichtig ist, es den Asset-Experten so leicht wie möglich zu machen, ihr asset- und domänenspezifisches Wissen in ausführbare Softwaresystemmodule umzusetzen. Dabei sind drei Maßnahmen entscheidend:

Die SME Workbench unterstützt Asset-Analysen branchenübergreifend mit einem gemeinsamen Entwicklungstool, sodass sich Asset-, Daten- und Leistungsexperten auf ihr jeweiliges Wissensgebiet konzentrieren können.

4 Das ABB Asset Health Center integriert alle erforderlichen Komponenten für ein umfassendes Asset-Management.



– Einbettung von ABB-Expertenwissen in die Software für die große Bandbreite an Geräten und Systemen, die ABB anbietet
– Erfassung von Leistungsmodellen von Kunden-Assets zur Ergänzung des ABB-Fachwissens („end-user programming“)
– Schaffung der Voraussetzungen, damit Dritte (z. B. andere Anbieter oder Fachberater) komplexe Asset-Diagnosemodule über eine API-Schnittstelle (Application Programming Interface) beisteuern können

Um diese drei Anforderungen zu erfüllen und dieses Ziel zu erreichen, wurde die Aseet Health Center SME Workbench als Arbeitsumgebung für Fachexperten entwickelt. Sie unterstützt Asset-Analysen branchenübergreifend mit einem gemeinsamen Entwicklungstool, sodass Asset-, Daten- und Leistungsexperten sich auf ihr jeweiliges Wissensgebiet konzentrieren können.

Konzentration auf das Expertenwissen

Die SME Workbench ermöglicht Asset-Experten die Erstellung von Algorithmen, ohne dass sie wissen müssen, wie die Daten abgerufen oder gespeichert werden oder wie die Algorithmen in einer Unternehmensumgebung ausgeführt werden. So können SMEs ihr Wissen auf natürliche Weise mithilfe visueller Editoren wie Flussdiagrammen, Entscheidungsbäumen und anderen vertrauten Werkzeugen beschreiben.

Arbeitet ein Team von SMEs zusammen an der Erstellung eines Asset-Leistungsmodells, werden die Bestandteile des Modells in einem Cloud-Repository gespeichert, während die SME Workbench die Infrastruktur zum lokalen Testen des analytischen Modells bereitstellt.

Vorteile der SME Workbench

Mithilfe der SME Workbench kann jeder Nutzer mit Asset-Wissen schnell neue Plug-ins für analytische Modelle entwickeln. Die visuelle Drag-&-Drop-Schnittstelle hilft Asset-Experten dabei, ihre Ideen und Algorithmen in leistungsstarke Softwaremodule umzusetzen. Maßgeschneiderte Werkzeugpaletten bieten SMEs bequemen Zugang zu den für die Asset-Analysen relevantesten Berechnungen und Zuverlässigkeits-Analysefunktionen. Darüber hinaus haben SMEs die Möglichkeit, ihr Wissen effizient zu teilen. Die SME Workbench kann durch neue, maßgeschneiderte Editoren erweitert werden, um die Entwicklung von Asset-Analysen für verschiedene Domänen weiter zu erleichtern.

Die Möglichkeit, Daten von traditionellen IT- und OT-Systemen zusammenzuführen und diese auf eine ganzheitliche Weise zu analysieren, eröffnet neue Möglichkeiten zur Risikobeurteilung und Entscheidungsunterstützung.

Mithilfe der SME Workbench und APIs können Kunden und Dritte Analysen beisteuern, die nahtlos in die AHC-Analysestruktur integriert werden können. Dies schließt neben ABB auch andere Asset-Anbieter ein und ermöglicht die Erfassung und Verbreitung von Betriebsmittel-Wissen über das gesamte Unternehmen hinweg.

Wiederverwendung und Erweiterung auf neue Domänen

Die ersten ABB AHC-Kunden waren EVUs, weshalb die ersten Asset-Diagnoseanalysen auf Betriebsmittel in Stromnetzen ausgerichtet waren. Ein Vorteil der AHC-Architektur ist, dass die BI-Plattform und die SME Workbench unabhängig vom Anwendungsbereich sind. ABB besitzt umfassendes Domänenwissen in vielen assetintensiven Branchen wie Öl und Gas, Wasser, Bergbau und Schifffahrt. Das Asset-Health-Angebot soll auf diese Branchen erweitert werden, indem die Asset- und Domänenexperten von ABB ihr Wissen mithilfe der SME Workbench zur Verfügung stellen.

Das Internet der intelligenten Assets

Die Vision von ABB für die Zukunft des Asset-Health-Managements basiert auf einem System, das Asset-Informationen mit Diagnosewissen, der Darstellung praktisch umsetzbarer Informationen und der Unterstützung bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen integriert. Zu diesem Zweck arbeitet ABB daran, von Experten entwickelte Asset-Diagnosen und -Analysen in ihr Portfolio von leistungsstarken und bewährten Anwendungen zu integrieren, die folgende Bereiche abdecken:

- Unternehmensweites Asset-Management in kapitalintensiven Industrien
- Visualisierung von Asset-Informationen mit abrufbaren Details (Drill-Down)
- Einsatzplanung und Unterstützung von Servicemannschaften

Analysen, Dashboards, Visualisierungen und die Möglichkeit, Fragen zu stellen und praktisch umsetzbare Antworten zu erhalten, sind allesamt notwendig, aber nicht ausreichend. Assets mit eingebauter Sensorik und Vernetzung finden eine immer größere Verbreitung, während Asset-Designs und das Asset-Wissen weiterentwickelt werden. Das AHC unterstützt den kompletten Betriebsmittelkreislauf: Es kann dabei helfen, die Leistungsfähigkeit von Assets vorherzusagen und Betrieb und Wartung, Kosten und Investitionen zu optimieren. Das AHC steigert die Leistungsfähigkeit von Assets und optimiert Geschäftsergebnisse durch kontinuierliches Erfassen von Informationen von einer Vielzahl intelligenter Assets, Systeme und Sensoren, aus denen die fortschrittliche Analyse-Engine praktische Erkenntnisse zieht.

Aufgrund der direkten Auswirkung auf das Geschäftsergebnis entwickelt sich das Asset-Health-Management zunehmend zu einem kritischen Unternehmensprozess. ABB reagiert darauf mit einem integrierten AHC, das Business Intelligence und Analysen kombiniert. Die SME Workbench erleichtert die Entwicklung und Integration von Analysen und ermöglicht die Erfassung und Nutzung von Fachwissen, um eine bessere Entscheidungshilfe für anlagenintensive Industrien zu liefern. Zurzeit ist ABB dabei, die AHC-Lösung beim größten Eigentümer von Energieübertragungsanlagen in Nordamerika zu implementieren. Durch optimierte Erfassung und Verwendung von Fachwissen kann zusätzliches Wissen genutzt werden, um die Analysen weiter zu verbessern und die Lösung auf andere Branchen auszudehnen.

Karen Smiley
Shakeel Mahate
ABB Corporate Research,
Industrial Software Systems
Raleigh, NC, USA
karen.smiley@us.abb.com
shakeel.mahate@us.abb.com

Paul Wood
Ventyx, ein Unternehmen des ABB-Konzerns
Sacramento, CA, USA
paul.wood@ventyx.abb.com

Paul Bower
Ventyx, ein Unternehmen des ABB-Konzerns
Atlanta, GA, USA
paul.bower@ventyx.abb.com

Martin Naedele
ABB Power Systems,
Business Unit Network Management
Baden, Schweiz
martin.naedele@ch.abb.com

Literaturhinweis

[1] GTM (GreenTech Media) Research (26. Juli 2013): „Evaluating Asset Health: Prioritizing and Optimizing Asset Management“. Verfügbar unter: http://www.ventyx.com/~/media/files/whitepapers/wp-assethealth-ventyx-gtm.ashx?download=1

Weiterführende Literatur

„An Anatomy of Asset Management“ (26. Juli 2013). Verfügbar unter: http://theiam.org/what-is-assetmanagement/anatomy-asset-management

Ventyx (26. Juli 2013): „Asset Health“. Verfügbar unter: http://www.ventyx.com/en/ga/demand-assethealth.aspx

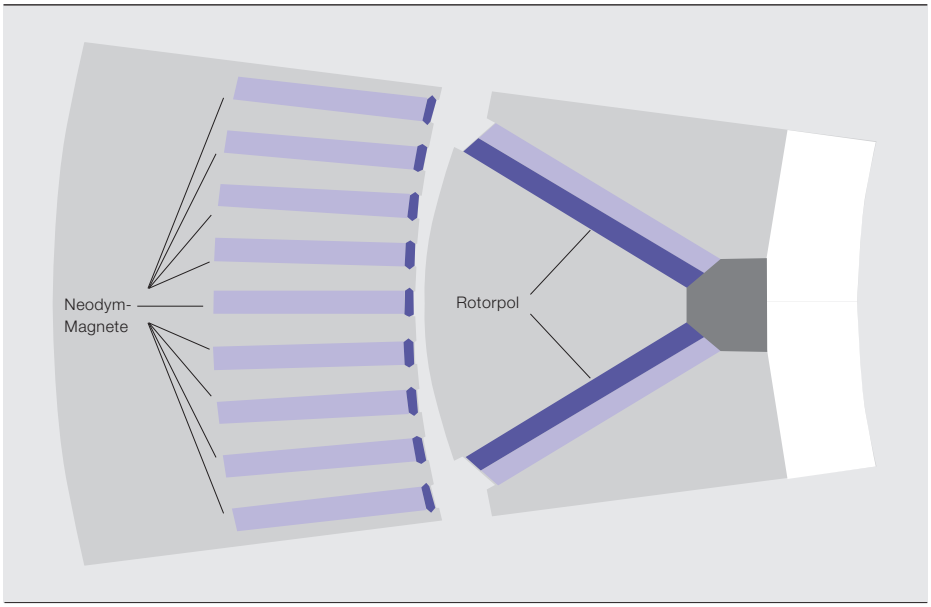
„ISO 55000 International Standards for Asset Management“ (26. Juli 2013). Verfügbar unter: http://www.assetmanagementstandards.com/

Frischer Wind

Konstruktion und Test eines Antriebsstrangs für eine 7-MW-Windenergieanlage

ERKO LEPA, TOBIAS THURNHERR, ALEXANDER FAULSTICH – Zurzeit entstehen weltweit Windenergieanlagen im Rekordtempo. Angesichts der riesigen Summen, die in diese Anlagen investiert werden, spielt die Wahl der bestmöglichen Technik eine entscheidende Rolle. Bisher dominierten doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren den Markt für Antriebsstränge von Windenergieanlagen, doch Vollumrichterkonzepte sind im Kommen. Dabei zeigt sich, dass die Klasse der mittelschnell laufenden Mittelspannungssysteme die besten Eigenschaften für Anwendungen von Versorgungsunternehmen bietet: Die niedrigen Ströme minimieren die Kabelverluste, vereinfachen das Generatordesign und ermöglichen den Einsatz eines robusten Mittelspannungs-Umrichters mit hoher Verfügbarkeit. Die mittleren Drehzahlen wiederum ermöglichen im Vergleich zu allen anderen Konzepten eine besonders kompakte, leichte und hocheffiziente Lösung. Eine sorgfältige Auslegung der Komponenten einer Windenergieanlage zahlt sich aus, wie hier an der Konstruktion und dem Integrationstest einer 7-MW-Anlage gezeigt werden soll.

1 Rotorgeometrie



Die beiden vorherrschenden Konzepte bei elektrischen Antriebssträngen von Windenergieanlagen in EVU-Größe (EVU = Energieversorgungsunternehmen) sind doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren und Vollumrichter. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Konzepten liegt in der Art und Größe des verwendeten Generators und der Funktion des Umrichters. Bisher dominierten doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren den Markt, doch der Marktanteil von Vollumrichterkonzepten wächst. Es gibt mehrere Faktoren, die diesen Wechsel vorantreiben. Dazu gehören die Einhaltung von Netzanschlussregeln (Grid Code) und eine optimierte Stromerzeugung bei geringeren Windgeschwindigkeiten.

Beim Vollumrichterkonzept sind der Generator und der mechanischen Antriebsstrang durch den Umrichter vom Netz entkoppelt. Der gesamte erzeugte Strom fließt durch den Umrichter in das Netz. Der Umrichter regelt das Drehmoment und die Drehzahl des Generators.

Titelbild
Die Wahl der richtigen Systemkomponenten, wie dieser wassergekühlte, mittelschnell laufende Permanentmagnet-Generator, kann über die Lebensdauer einer Windenergieanlage hinweg große Vorteile mit sich bringen. Welche konstruktiven Aspekte sind dabei entscheidend?

Es gibt drei Ausführungen des Vollumrichterkonzepts mit unterschiedlichen Getriebe- und Generatorlösungen: langsam laufend (auch als Direktantrieb bezeichnet), mittelschnell laufend und schnell laufend. Bei diesen kommen typischerweise Permanentmagnet-Synchrongeneratoren (PMSG) und Käfigläufer-Asynchrongeneratoren zum Einsatz.

Langsam laufendes Vollumrichterkonzept

Beim langsam laufenden Vollumrichterkonzept, das auch als getriebeloser Direktantrieb bezeichnet wird, kommt ein langsam laufender (bis zu 30 min^{-1}) Generator mit großem Durchmesser zum Einsatz. Typischerweise werden Permanentmagnet- oder getrennt erregte Synchrongeneratoren mit Einzellager verwendet.

Mittelschnell laufendes Vollumrichterkonzept

Beim mittelschnell laufenden Vollumrichterkonzept kommt ein ein- oder zweistufiges Getriebe mit einem kompakten, mittelschnell laufenden Permanentmagnet-Generator zum Einsatz. Die Nenndrehzahl des Generators liegt zwischen 100 und 500 min^{-1}. Aufgrund der niedrigeren Drehzahl und der integrierten Getriebelösung verursacht dieses Konzept geringere mechanische Belastungen. Das integrierte Getriebe sorgt zudem für eine kompakte Gesamtgröße.

Schnell laufendes Vollumrichterkonzept

Das schnelle laufende Vollumrichterkonzept arbeitet mit Drehzahlen von 1.000 bis 2.000 min^{-1}, ist mechanisch ähnlich zur doppelt gespeisten Asynchronmaschine und verwendet ein dreistufiges Getriebe. Die Gesamtgröße ist gering.

Die Hauptvorteile sind ein geringeres Gewicht und eine geringere Generatorgröße.

Wahl eines Antriebsstrangs

Da jede Art von Antriebsstrang mit unterschiedlichen Anlagengewichten, -größen und Wartungsanforderungen verbunden ist, muss der Antriebsstrang mit Sorgfalt gewählt werden, wobei sämtliche Anlagenanforderungen, Zertifizierungsbedingungen und Netzanschlussregeln zu berücksichtigen sind.

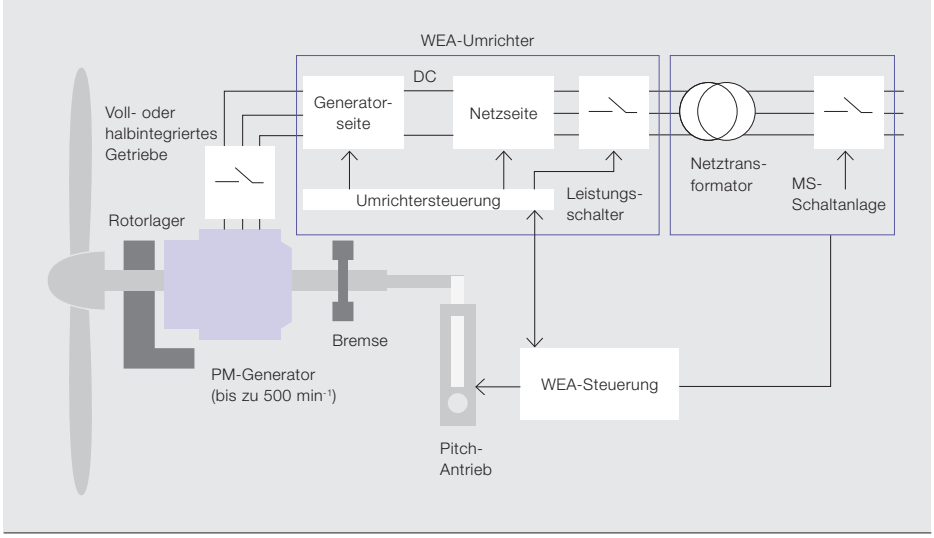
Wahl der Spannung

Das gewählte Drehzahlkonzept bestimmt nicht die Systemspannung. Die Wahl der Spannung erfolgt vielmehr auf der Grundlage des erforderlichen Leistungsniveaus. Als grobe Richtlinie gilt: Für Generatoren bis 3 MW wird Niederspannung (z. B. 690 V) gewählt. Bei höherer Leistung ist Mittelspannung (z. B. 3,3 kV) sinnvoll. Die Motivation hierfür liegt in der Reduktion des Umrichterstroms, da bei niedrigeren Strömen die Verluste in den Kabeln niedriger ausfallen. Außerdem werden die Konstruktion und die Teilebeschaffung vereinfacht.

Wahl der Generatordrehzahl

Die Wahl der Drehzahl hängt von den besonderen Eigenschaften der Antriebskomponenten wie Getriebe, Generator, Umrichter und Transformator ab.

2 Schematische Darstellung des ABB PCS 6000 Umrichters



3 Mögliche Umrichteranordnungen

Mit über 98 % erreichen PMSG den höchsten Wirkungsgrad aller kommerziellen Windenergie-Generatoren.

Direktinvestitionen

Je nach Konstruktion, Anlagenleistung, Netzanforderungen und Werkstoffpreisen ist das schnell laufende Konzept für gewöhnlich mit den niedrigsten Direktinvestitionskosten verbunden. Direktantriebe stellen normalerweise die teuerste Lösung dar, und mittelschnell laufende Lösungen sind in der Regel etwas teurer als schnell laufende Lösungen. Zudem tragen Wartungskosten, Verfügbarkeit und jährliche Windverteilung ebenfalls zu den Lebensdauerkosten bei, sodass sich nur durch Analyse sämtlicher Aspekte bestimmen lässt, welches Konzept den größten Nutzen bietet.

Wirkungsgrad

Berechnungen zeigen, dass das mittelschnell laufende Konzept mit einem PMSG den höchsten Wirkungsgrad am Nennarbeitspunkt bietet. Tatsächlich erreichen PMSG mit über 98 % den höchsten Wirkungsgrad aller kommerziellen Windenergie-Generatoren. Auch bei Teillast und geringem Wind ist der Wirkungsgrad hoch, was eine hohe jährliche Erzeugungsleistung ermöglicht. Außerdem lassen sich die Getriebe reibungslos in eine kompakte Lösung integrieren, und durch die niedrigeren Drehzahlen ist der Verschleiß in den Komponenten des Antriebsstrangs geringer.

Wahl des Generatortyps

Der Leistungsfaktor eines Asynchrongenerators (AG) sinkt mit zunehmender Polzahl und abnehmender Polteilung. Daher können AG mit Synchrongeneratoren (SG) konkurrieren, wenn ihre Polzahl klein ist, d. h. AG sind besonders in Anwendungen mit hohen Drehzahlen konkurrenzfähig. In Anwendungen mit mittleren Drehzahlen ist der Wirkungsgrad von AG deutlich niedriger. Generell gilt: Je größer der Durchmesser des Generators, desto höher ist seine Leistungsfähigkeit. Da SG eine größere Anzahl von Polen besitzen können, kann der Luftspaltdurchmesser vergrößert werden, was eine größere Flexibilität bei der Dimensionierung der Nennfrequenz ermöglicht.

Für niedrige Drehzahlen kommen nur PMSG oder schnell laufende, elektrisch erregte Synchrongeneratoren (EESG) in Frage. Beide bieten einen hervorragenden Wirkungsgrad bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 8 m/s, d. h. ungefähr 0 bis 40 % der Anlagennennleistung. Darüber sind andere Konzepte leistungsfähiger.

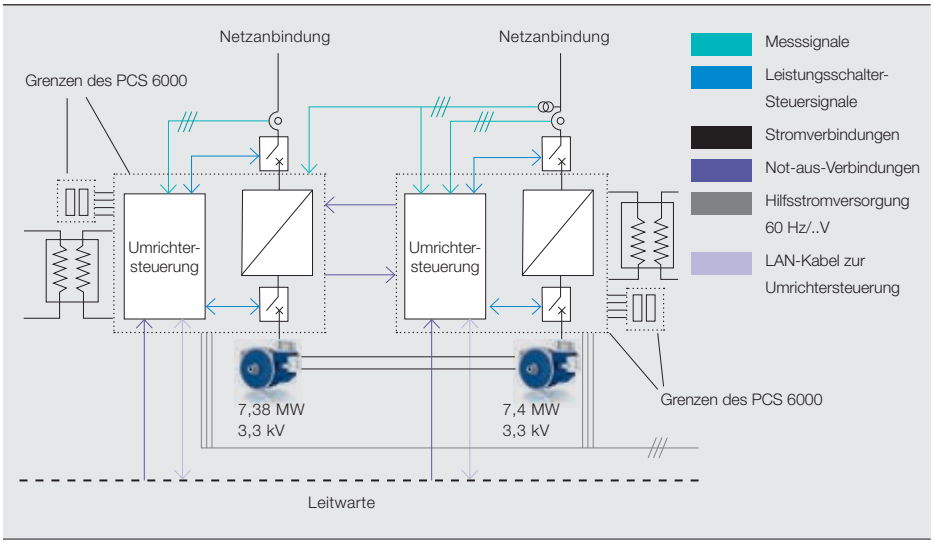
Bei PMSG ist der Rotor leichter, der Generatorwirkungsgrad höher und die Maschinengröße geringer, da es kein Erregungssystem gibt. Damit bieten PMSG die besten technischen Vorteile in Direktantriebskonzepten.

Konstruktion eines mittelschnell laufenden PMSG

Ein mittelschnell laufender 7-MW-PMSG und Umrichter wurden konstruiert und getestet. Hierbei spielen verschiedene konstruktive Aspekte eine Rolle:

- Aufgrund der großen Entfernung zwischen Generator und Transformator und der hohen Anlagenleistung wurde ein PMSG mit einem Mittelspannungs-Umrichter gewählt.
- Berechnungen haben gezeigt, dass aus Sicht der Leistungsfähigkeit und Herstellbarkeit 14- bis 20-polige Lösungen machbar waren. Konstruktionen mit 16 und 18 Polen erweisen sich als recht ähnlich – mit vernachlässigbaren Unterschieden hinsichtlich der Verluste, des Leistungsfaktors, der gegenelektromotorischen Kraft und der Masse des aktiven Materials. Die Induktivitäten und Lastwinkel waren etwas kleiner beim 18-poligen Design, das letztendlich gewählt wurde.
- Nach umfangreichen Berechnungen, Optimierungen und Analysen wurde ein V-förmiger Rotorpol konstruiert → 1. Auf der Grundlage von Simulationen plötzlicher Last- und Kurzschlusszu-

4 Back-to-Back-Prüfanordnung



stände mit unterschiedlichen Magneteigenschaften und Temperaturen wurden Neodym-Magnete mit einer hohen intrinsischen Koerzivkraft gewählt.

– In der Konstruktionsphase ist es wichtig, potenziell schädliche Resonanzfrequenzen im mechanischen Aufbau zu identifizieren und für eine ausreichende Dämpfung und Steifigkeit zu sorgen, um die beteiligten Kräfte aufzunehmen. Ebenso wichtig ist, dass die Modulationsstrategie und die Schaltfrequenz des Umrichters einstellbar sind. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bereits eine Änderung der Schaltfrequenz um 50 Hz die Erregungsfrequenz vom Resonanzpunkt verschiebt und dadurch eine deutliche Senkung des Geräusch- und Schwingungspegels bewirken kann.

Aufbau des Umrichters

Der für den elektrischen Antriebsstrang der 7-MW-Windenergieanlage verwendete Umrichter basiert auf einem Mittelspannungs-IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) mit Dreipunkt-NPC-Topologie (Neutral Point Clamped). Der IGCT verbindet die niedrigen Leitungsverluste und die Zuverlässigkeit eines Thyristors mit einem hohen Abschaltvermögen. Die verwendete Nennspannung von 3,3 kV bedeutet nicht nur einen geringeren Verkabelungsaufwand und geringere Kabelverluste im Vergleich zu einem Umrichter mit einer niedrigeren Ausgangsspannung. Es werden zudem weniger Halbleiter verwendet, was die Anzahl möglicher Ausfallpunkte reduziert. Die modulare Bauweise des Umrichters aus der ABB PCS 6000-Familie ermöglicht eine maßgeschneiderte mechanische Anordnung der Umrichterkomponenten, je nachdem, ob der Umrichter im Turm, in der Gondel oder in einem Container außerhalb der Windenergieanlage untergebracht werden soll ➔ 2–3.

Integrationstests

Für den Integrationstest wurden zwei Generatoren mechanisch miteinander gekoppelt und jeweils über einen Frequenzumrichter mit dem Netz verbunden ➔ 4. Ein PCS 6000 speiste den angeschlossenen Generator als Motor. Dieser trieb den anderen Generator an, der den erzeugten Strom über den anderen Umrichter zurück ins Netz speiste. Bei dieser sogenannten Back-to-Back-Prüfanordnung müssen nur die Verluste des Gesamtsystems vom Netz getragen werden. In der Prüfanordnung kann der Generator mit Nennleistung betrieben werden – vorausgesetzt, der speisende Umrichter ist in der Lage, mit der Anlagennennleistung zu arbeiten und die Gesamtverluste der Versuchsanordnung abzudecken.

Die Erwärmung des Generators entsprach den Berechnungen, und die Endtemperaturen der Umrichterkomponenten blieben unter den Grenzwerten der Komponenten. Die Leerlaufspannung des Generators war niedriger als berechnet, was den Leistungsfaktor des Generators reduzierte. Trotzdem entsprachen die Hauptbemessungsdaten des Generators den Berechnungen. Eine dreiphasige Kurzschlussprüfung nach der Erwärmung zeigte, dass die Magnete des Generators wie vorgesehen gegen Entmagnetisierung geschützt waren. Die gemessenen Schwingungen und Geräuschemissionen lagen deutlich unter den Kriterien der IEC. Der Wirkungsgrad des Generators lag bei 98,17 % am Nennarbeitspunkt und an anderen Lastpunkten über den Erwartungen.

Verschiedene Schaltfrequenzen wurden über den gesamten Drehzahlbereich bei unterschiedlichen Modulationsarten getestet. Das beste Ergebnis wurde mit einer festen Trägerfrequenz der Pulsweitenmodulation von 720 Hz oder darüber über den gesamten Drehzahlbereich im asynchronen Modus erzielt. Der asynchrone Modus lieferte gute Ergebnisse, weil die Schaltfrequenz und ihre Seitenbänder bei keiner Drehzahl gefährliche Resonanzpunkte erreichten.

In Windenergieanwendungen im Multimegawatt-Bereich bieten Mittelspannungssysteme Vorteile gegenüber Niederspannungssystemen. Dank der geringeren Stromstärke werden die Kabelverluste minimiert, das Generatordesign vereinfacht und die Verwendung eines robusten Mittelspannungs-Umrichters mit hoher Verfügbarkeit ermöglicht. Das mittelschnell laufende Konzept mit einem PMSG stellt eine kompakte Lösung mit geringem Gewicht dar, die im Vergleich zu allen anderen Konzepten den höchsten Wirkungsgrad nahe dem Nennarbeitspunkt aufweist. Back-to-Back-Tests des elektrischen Antriebsstrangs haben gezeigt, dass der Generator und der Umrichter von ABB den Anforderungen des Kunden und der IEC entsprechen. Alle Abweichungen zwischen den berechneten Werten und den Messungen lagen innerhalb zulässiger Grenzen.

Die Kombination aus mittlerer Drehzahl und Mittelspannung bietet viele bedeutende Vorteile, nicht nur für den Kunden (den Anlagenhersteller), sondern auch für den Windparkbetreiber und den Endkunden.

Erko Lepa
ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Helsinki, Finnland
erko.lepa@ee.abb.com

Tobias Thurnherr
Alexander Faulstich
ABB Discrete Automation and Motion,
Power Conversion
Turgi, Schweiz
tobias.thurnherr@ch.abb.com
alexander.faulstich@ch.abb.com

Sinnvolle Ergänzung

Streckenseitige Gleichstromsysteme zur Steigerung der Energieeffizienz im Schienennahverkehr

MICHAL LODZINSKI – Obwohl Eisen- und Straßenbahnen zu den effizientesten Transportmitteln gehören, benötigen sie noch immer viel Energie. Dies gilt besonders bei der Beschleunigung. Die Energiemenge, die benötigt wird, um ein mehrere Hundert Tonnen schweres Fahrzeug nur auf eine mäßige Geschwindigkeit zu beschleunigen, ist riesig. Folglich bedeutet jede Verbesserung der Energieeffizienz erhebliche Kostenvorteile. Regenerative Verfahren, bei denen Bremsenergie zur Beschleunigung wiederverwendet wird, sind zwar bekannt, bieten aber noch viel Potenzial. ABB bietet ein komplettes Paket von Energiemanagementlösungen an, die eine bessere Nutzung der Bremsenergie und somit energieeffizientere Schienennahverkehrssysteme ermöglichen.

Durch Recycling bzw. Management überschüssiger Bremsenergie kann der Gesamtenergieverbrauch ohne Investition in neue Fahrzeuge oder Netzleitsysteme um 10 bis 30 % reduziert werden.

Energieeffizienz ist ein wichtiges Thema in vielen Branchen. Der öffentliche Schienennahverkehr ist da keine Ausnahme. Auch wenn das Bahnfahren bereits wesentlich energieeffizienter ist als die meisten anderen Transportmittel, spielt eine weitere Verbesserung der Energieeffizienz eine wichtige Rolle für Betreiber von U-, Stadt- und Straßenbahnen, die stets vor der Herausforderung stehen, die Betriebskosten senken und gleichzeitig einen nachhaltigen öffentlichen Personenverkehr bieten zu müssen. ABB bietet ein komplettes Paket von Produkten, die dies erleichtern. Eine besondere Stellung nehmen dabei Systeme zum Management überschüssiger Bremsenergie ein.

Bis zu 80 % der gesamten von einem Schienenverkehrssystem verbrauchten Energie wird dazu benötigt, die Züge zu bewegen. Durch Recycling bzw. intelligentes Management überschüssiger Bremsenergie kann der Gesamtenergieverbrauch um 10 bis 30 % reduziert werden, ohne dass in neue Fahrzeuge oder Netzleitsysteme investiert werden muss.

Das ENVILINE ERS reduziert die Energiekosten, indem es Bremsenergie in das Wechselstromnetz zurückspeist.

Viele Schienenfahrzeuge recyceln heute die beim Bremsen freigesetzte Energie. Meist wird ein kleiner Teil davon genutzt, um bordseitige Verbraucher zu versorgen, während der Rest in das Stromnetz zurückgespeist und von einem anderen, in der Nähe befindlichen Zug genutzt werden kann. Diese Art von Energietransfer wird als „natürliche Aufnahmefähigkeit“ bezeichnet. Kann die Energie nicht auf diese Weise wiederverwendet werden, steigt die Netzspannung, und

Titelbild
Durch eine bessere Nutzung der kinetischen Energie, die normalerweise beim Bremsen verloren geht, kann der öffentliche Schienennahverkehr energieeffizienter gestaltet werden. Wie kann dies mit der ENVILINE™-Produktpalette von ABB erreicht werden?

1 Das ENVILINE-Energierückgewinnungssystem (ERS)

2 Auszeichnung für das ABB ENVILINE-Energierückgewinnungssystem

ABB wurde auf der internationalen Messe Railtex 2013 für das Energierückgewinnungssystem ENVILINE ERS ausgezeichnet, das den Energieverbrauch in Gleichstrom-Traktionsanwendungen um bis zu 30 % senken kann. Gleichzeitig hilft es dabei, die Erwärmung in U-Bahn-Tunneln zu reduzieren, und trägt somit zur Abkühlung der „Tube“ bei.

Mit den 2013 erstmalig verliehenen Railtex Awards werden herausragende Leistungen in der Eisenbahnindustrie gewürdigt. Der Preis für ABB in der Kategorie Elektrifizierung wurde bei einer Feier am 1. Mai 2013 in London durch den ehemaligen englischen Cricketspieler Phil Tufnell und den BBC-Radiomoderator Garry Richardson überreicht.

Dank aktiver Gleichrichtung, die durch den bidirektionalen Betrieb des Systems ermöglicht wird, kann das ERS vorhandene Gleichrichter unterstützen.

die überschüssige Energie wird über bord- oder streckenseitige Widerstände abgeführt.

Doch durch intelligentes Recycling bzw. Management der überschüssigen Bremsenergie kann der Gesamtstromverbrauch gesenkt werden. Eine Möglichkeit hierzu bieten die ENVILINE™-Produkte von ABB.

ENVILINE-Energierückgewinnungssystem

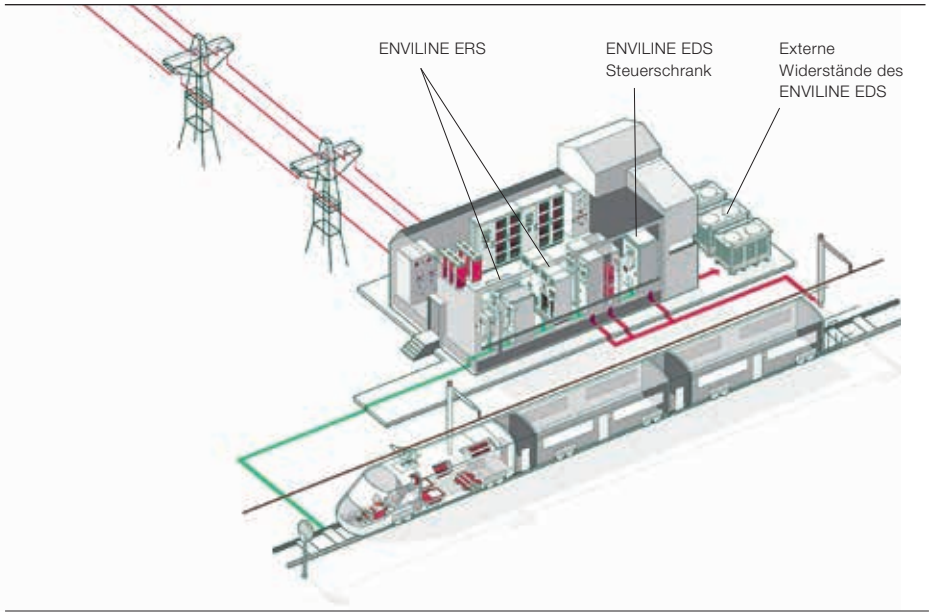
Das preisgekrönte ENVILINE-Energierückgewinnungssystem ERS (Energy Recuperation System) reduziert die Energiekosten, indem es die Bremsenergie des Fahrzeugs in das Wechselstromnetz zurückspeist ➔ 1–2.

Kann die beim Bremsen freigesetzte Energie nicht unmittelbar wiederverwendet werden, wird sie – wie oben erwähnt – häufig über bordseitige Bremswiderstände abgeführt und geht verloren. Das streckenseitig installierte ERS ist in der Lage, diese Energie zurückzugewinnen, indem es die Energie vom Gleichstrom-Bahnnetz in das Wechselstromnetz zurückspeist, wo sie zur Versorgung lokaler Hilfssysteme wie Klimaanlagen, Heizungen, Lüftungen, Beleuchtungen usw. genutzt wird. Das ERS ist ein IGBT-basierter Wechselrichter, der im Gleichstrom-Unterwerk installiert und mit den vorhandenen Diodengleichrichtern parallelgeschaltet ist ➔ 3–4.

Wenn es nicht zur Rückgewinnung der Energie von Zügen benötigt wird, kann das ERS zur Minderung von Blindleistung im Stromnetz genutzt werden. Darüber hinaus kann es als aktiver Filter fungieren, der die Auswirkungen von Oberschwingungen reduziert. Alle diese Funktionen nutzen die Fähigkeit des IGBT-basierten Wechselrichters, die Sinusschwingung des Stroms zu formen. Dies ermöglicht eine unabhängige Regelung der Wirk- oder Blindleistung. Das Grundprinzip beruht auf der Umwandlung der vom Traktionssystem kommenden Gleichspannung durch den IGBT-Wechselrichter in eine sinusförmige Ausgangsspannung. Aufgrund des verwendeten Pulsweitenmodulationsverfahrens enthält die Wellenform der Ausgangsspannung, die mit einer Frequenz von mehreren kHz moduliert wird, keine Oberschwingungen.

Dank aktiver Gleichrichtung, die durch den bidirektionalen Betrieb des Systems ermöglicht wird, ist das ERS zudem in der Lage, vorhandene Gleichrichter zu unterstützen. Besteht an Bord der fahrenden Züge zusätzlicher Leistungsbedarf, kann das ERS diese Leistung bereitstellen, wobei es denselben Transformator nutzt, der auch zur Rückspeisung der rückgewonnenen Energie in das Wechselstromnetz verwendet wird.

3 Das ENVILINE-Energierückgewinnungssystem (ERS)



Die Energie kann mithilfe des ERS wieder in das Netz zurückgespeist oder mithilfe des ESS gespeichert werden.

Der Leistungsbereich des ERS reicht von 0,5 bis 1 MW, wobei bald auch Einheiten mit 2 MW erhältlich sein werden. Das System ist für kurze Zeit mit bis zu 225 % überlastbar und arbeitet mit einem Wirkungsgrad von 97,5 %. Aufgrund seines geringen Platzbedarfs ist das ERS mit neuen und vorhandenen Systemen kompatibel. Außerdem ist das ERS leicht zu installieren und kann dank seines modularen Aufbaus an steigende Leistungsanforderungen angepasst werden. Durch seine geringen Wartungsanforderungen und seine lange Betriebslebensdauer spart das ERS bei minimalem Eingriff über viele Jahre hinweg erhebliche Mengen an Energie. Tatsächlich kann das ERS den Gesamtenergieverbrauch eines Schienenverkehrssystems um 10 bis 30 % reduzieren.

ENVILINE-Energiespeichersystem

Die rückgewonnene Bremsenergie kann mithilfe des ERS wieder in das Netz zurückgespeist werden, sie kann aber auch mithilfe des ENVILINE-Energiespeichersystems ESS (Energy Storage System) gespeichert werden → 4–6. Dies ist besonders nützlich für Bahngesellschaften, deren Unterwerke direkt mit dem lokalen Stromversorger verbunden sind, und die somit nicht in der Lage sind, überschüssige Energie zu attraktiven Tarifen zu verkaufen. Darüber hinaus ist das ESS nützlich für Bahnbetreiber, die mit Stromversorgungs- und Netzqualitätsproblemen zu kämpfen haben. Das ESS ist das kleinste und dennoch modularste und flexibelste streckenseitige Energiespeichersystem der Branche. Es ist entweder mit Superkondensatoren zur kurzfristigen Speicherung und Wiederverwendung überschüssiger Bremsenergie oder – wenn es zur Umsatzgenerierung oder Bereitstellung großer Leistungsmengen eingesetzt wird – mit Batterien erhältlich. Wie das ERS ist auch das ESS in der Lage, den Gesamtenergieverbrauch eines Schienenverkehrssystems um 10 bis 30 % zu senken.

Doch das ESS bietet noch weitere Vorzüge: Es hilft nicht nur dabei, Energie zu recyceln, sondern kann auch an bestimmten Standorten installiert werden, um die Spannung zu stützen, falls große Spannungseinbrüche auftreten. Außerdem kann es zur Steigerung der Traktionsleistung beim Beschleunigen genutzt werden. Und nicht zuletzt können die mit hohen Bedarfsspitzen verbundenen Strafen bzw. Leistungspreise durch den intelligenten Einsatz von gespeicherter ESS-Energie reduziert werden.

Das ESS ist kompatibel mit vorhandenen Zugsystemen und kann flexibel programmiert werden, um einen optimalen Betrieb an jedem Standort zu gewährleisten. Seine modulare Konfiguration ermöglicht die unabhängige Dimensionierung von Leistung und Speicherung. Funktionen wie Benachrichtigungen in mehreren Sprachen und per E-Mail, Energiezähler, Betriebsanzeigen (Dashboards) und herunterladbare Datendateien erleichtern die Bedienung. Das ESS arbeitet mit Nennleitungsspannungen von 600 und 700 V und ist auf 4,5 MW und 60 MJ pro Anlage erweiterbar. Parallele Konfigurationen für große Anwendungen sind ebenfalls möglich.

Energieeffizienz und noch mehr

Das ESS stellt nicht nur die beste Einzelmaßnahme zur Verbesserung der Energieeffizienz dar, sondern kann auch als netzunabhängige Bahnstromversorgung fungieren. Neben der überschüssigen Bremsenergie kann zusätzliche Energie über die Traktionsstromleitung oder einen kleinen Gleichrichter (normalerweise zwischen Zugankünften) bereitgestellt werden. Solche netzunabhängigen Konzepte sind kostengünstiger und energieeffizienter als traditionelle netzgekoppelte Bahnstromversorgungen.

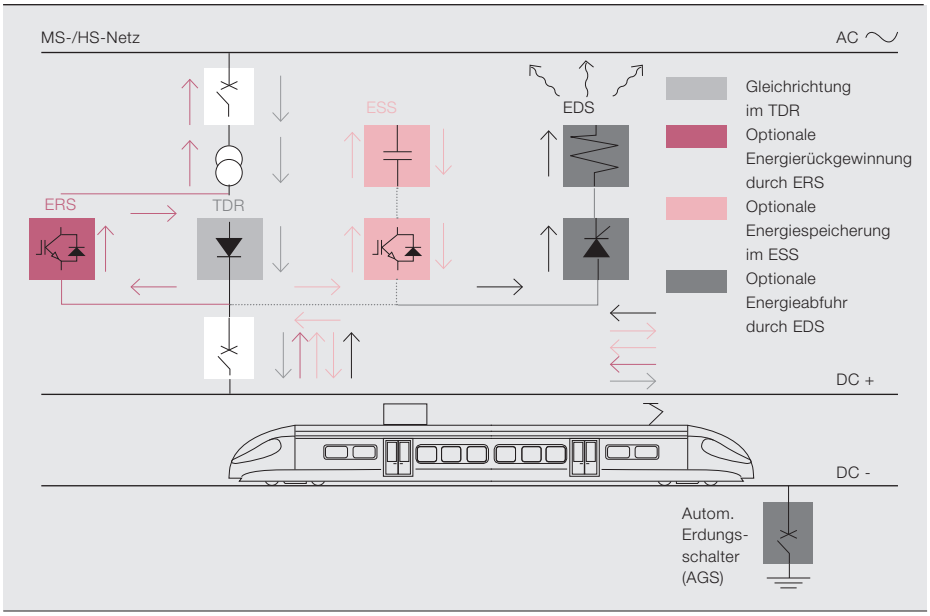
Wird das ESS mit Batterien gekoppelt, um größere Energiereserven bereitzustellen, kann es auch als Smart-Grid-Komponente eingesetzt werden, um den lokalen Stromversorger bei der Notstromversorgung oder Laststeuerung (Demand Response) zu unterstützen.

Nachrüstung

Ein bedeutender Vorteil des ERS und des ESS ist, dass beide Systeme nachrüstbar sind. Bei Modernisierungsprojekten sind alle Befestigungen und Anschlüsse vorgegeben, was eine größere Herausforderung darstellt als die Installation neuer Geräte in einer neuen Anlage.

Das ESS kann an bestimmten Standorten installiert werden, um die Spannung im Falle von Spannungseinbrüchen zu stützen.

4 Prinzipschaltbild des ENVILINE-Systems



Beide Systeme basieren auf einer modularen Bauweise, die eine unabhängige Skalierung der Leistung pro Einzelsystem ermöglicht. Um eine bestmögliche Kapitalrendite zu gewährleisten, müssen die verfügbare überschüssige Energie evaluiert, die Leistung des zu verwendenden Systems geschätzt und die optimalen Verbindungspunkte gewählt werden. Beide Produkte sind für das vorhandene System transparent, d. h. sie können ohne Unterbrechung des normalen Betriebs getrennt werden.

ENVILINE-Energieabführungssystem

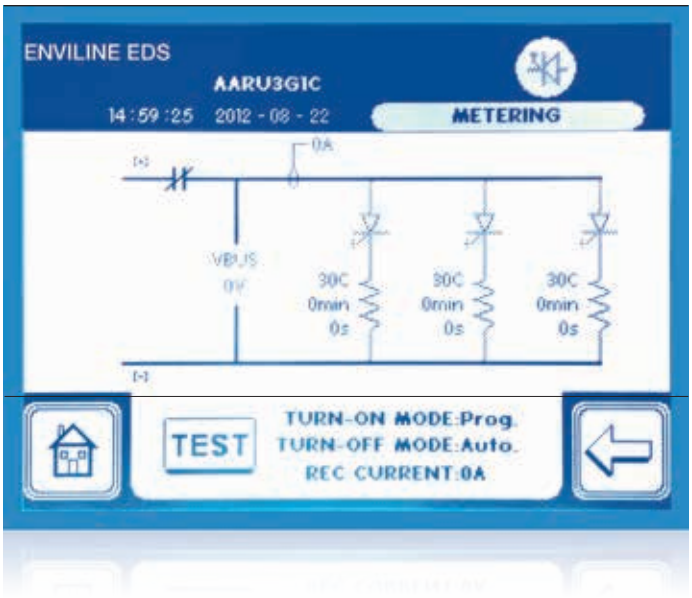
In bestimmten Fällen kann ein Teil der rückgewonnenen Energie nicht verwendet werden und muss aufgeführt werden. Dies kann über bordseitige Bremswiderstände erfolgen, die allerdings das Gewicht und den Wartungsaufwand des Fahrzeugs erhöhen. Das ENVILINE Energy Dissipation System (EDS) bietet eine kostengünstige Lösung für dieses Problem in Gleichstrom-Schienensystemen. Durch den Einsatz des streckenseitigen EDS anstelle von bordseitigen Widerständen können Bahnbetreiber das Fahrzeuggewicht und den Energieverbrauch senken und die Wärmeentwicklung in Tunneln oder geschlossenen Bahnhöfen verhindern. Dafür bekommen sie eine Lösung, die leicht zugängig und wartungsfreundlich ist.

Das EDS erkennt den durch die rückgewonnene oder überschüssige Energie verursachten Anstieg der Netzspannung und schaltet eine entsprechende ohmsche Last zu, um die Spannung innerhalb sicherer Betriebsgrenzen zu halten, ohne dass die mechanischen Bremsen genutzt (und verschlissen) werden müssen. Das EDS besteht aus einem Innenraum-Steuerschrank und einer Reihe von Freiluft-Widerständen. Das System sichert die streckenseitige Aufnahmefähigkeit beim regenerativen Bremsen, indem es die überschüssige Energie abführt, die nicht von anderen bordseitigen Verbrauchern oder in der Nähe befindlichen Zügen aufgenommen werden kann. Das EDS ist kompatibel mit allen neuen oder bereits installierten Gleichstrom-Unterwerken. Außerdem kann es in Kombination mit streckenseitigen Energiespeicher- und Energierückgewinnungssystemen betrieben werden, um sicherzu-

Das ESS eignet sich nicht nur zur Verbesserung der Energieeffizienz, sondern kann auch als netzunabhängige Bahnstromversorgung fungieren.

5 Das ENVILINE-Energiespeichersystem (ESS)

7 Benutzerfreundlicher Touchscreen des EDS



6 ESS-Batterien und Umrichterschränke in einer Anlage in Philadelphia, PA, USA

stellen, dass die Bremsenergie effektiv recycelt und nur dann über Widerstände abgeführt wird, wenn dies wirklich notwendig ist. Der Steuerschrank kann direkt in der Reihe der Gleichstrom-Schaltanlagen oder separat mit anderen Geräten wie Minus-Trennschaltern und automatischen Erdungsschaltern (AGS) installiert werden.

Die Widerstände befinden sich außerhalb des Unterwerks, wo die Wärme passiv angeführt werden kann → 3. Diese lüfterlose Lösung ist nicht nur wirtschaftlich, sondern auch geräuschlos und frei von elektromagnetischen Störungen.

Das EDS bietet nicht nur Schutz gegen Überspannungen, sondern trägt auch zur Verbesserung der Stromversorgungsqualität und Betriebszuverlässigkeit bei. Zu den weiteren Vorteilen gehören:

– Geringere Kosten als chopperbasierte Systeme
– Geringere Betriebs- und Wartungskosten als bordseitige Einheiten
– Einfache Wartung mit Fernüberwachung und -zugriff
– Fortschrittliche Bedienung mit Ferntestmöglichkeit und programmierbarer Zündung zur Sicherung einer optimalen Leistungsfähigkeit und Verhinderung von Fehlauslösungen → 7
– Zeitlich ausgewogener GTO- und Widerstandsbetrieb zur Verteilung des betriebsbedingten Verschleißes und Maximierung der Lebenserwartung

Die ENVILINE-Reihe umfasst noch weitere Produkte wie den Traktionsdiodengleichrichter (TDR) zur Umwandlung von Wechselstrom in den in öffentlichen Nahverkehrsinfrastrukturen häufig verwendeten Gleichstrom → 4.

Dank ihrer langjährigen Erfahrung im Bereich der Traktionsanwendungen steht ABB ihren Kunden mit qualifiziertem Rat bei der Wahl der richtigen ENVILINE-Lösung für ihre individuellen Anforderungen zur Seite. Damit profitieren sie von einer umfassenden, flexiblen und leistungsstarken Lösung, die ihnen Kosten- und Energieeinsparungen über viele Jahre hinweg sichert.

Weitere Informationen über ENVILINE erhalten Sie unter www.abb.com/enviline, oder schreiben Sie an enviline@pl.abb.com.

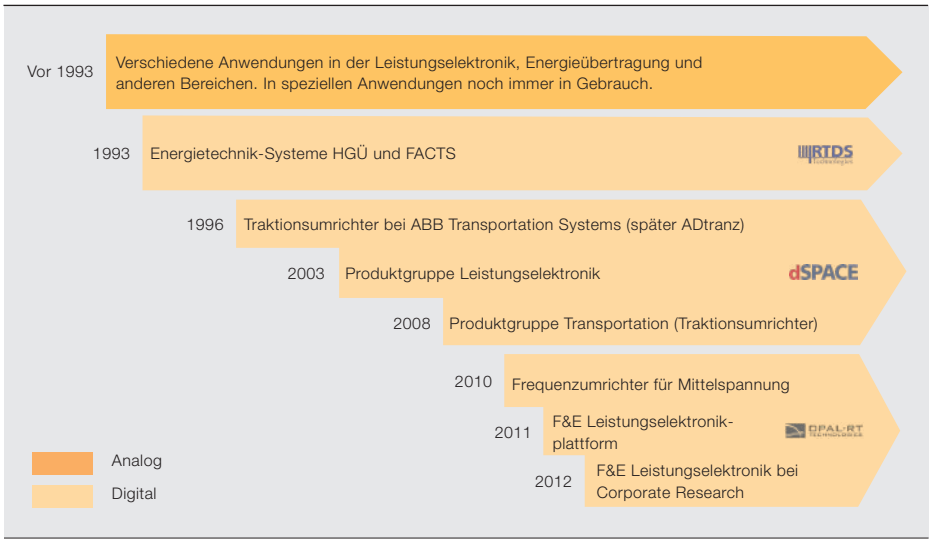
Michal Lodzinski
ABB Discrete Automation and Motion,
Power Control
Aleksandrow Lodzki, Polen
michal.lodzinski @pl.abb.com

Need for Speed

Echtzeitsimulation für Leistungselektronik in Eisenbahnanwendungen und darüber hinaus

ROXANA IONUTIU, SILVIA MASTELLONE, XINHUA KE, ERICH SCHEIBEN, NIKOLAOS OIKONOMOU, DIDIER COTTET, DANIEL STUMP – Digitale Echtzeitsimulationen schließen die Lücke zwischen der Entwicklung gehobener regelungstechnischer Konzepte und der Entwicklung erfolgreicher Produkte und revolutionieren damit die Technologiekette für leistungselektronische Regelungssysteme. Ihre wohl anspruchsvollste Anwendung erfüllt die Echtzeitsimulation in der Leistungselektronik, wo die Anforderungen an die Simulation komplexer geschalteter Systeme die Grenzen der derzeitigen Technik immer weiter vorantreiben. Seit vielen Jahren entwickelt ABB immer ausgeklügeltere Simulationswerkzeuge, um die Zuverlässigkeit und die kostengünstige, effiziente Prüfung von leistungsstarken leistungselektronischen Systemen der nächsten Generation sicherzustellen.

1 Geschichte der Echtzeitsimulation (RTS) bei ABB



Seit dem Aufkommen der ersten analogen und digitalen Computer Anfang der 1950er Jahre unterstützen Simulationswerkzeuge die Entwicklung technischer Systeme. Dank der heute verfügbaren hohen Rechenleistung lassen sich auch komplexe Systeme in relativ kurzer Zeit simulieren. Dies ist besonders wertvoll bei der Simulation von Regelungssystemen, wo das Computermodell mit der gleichen Geschwindigkeit wie das reale System, d. h. in Echtzeit, laufen muss, damit der Controller mit seiner nominellen Betriebsgeschwindigkeit geprüft werden kann.

In der heutigen Leistungselektronikindustrie spielt die Echtzeitsimulation (Real-Time Simulation, RTS) eine entscheidende Rolle in verschiedenen Phasen der Technologiekette, die die Übertragung neuer Regelungskonzepte in erfolgreiche leistungselektronische Produkte beschreibt.

Von den ersten maßgeschneiderten analogen Versionen bis zu den heutigen, kommerziell erhältlichen digitalen Highend-Plattformen vertraut ABB bei der Entwicklung ihrer leistungselektronischen Regelungstechnik auf Echtzeitsimulationen → 1. Echtzeitsimulationen spielen nicht nur eine wichtige Rolle bei der Entwicklung besserer Regelungskonzepte, sondern tragen auch zur Verbesserung der Software- und Produktqualität durch frühzeitiges, zeiteffizientes Testen bei. Das Schlüsselmerkmal von Echtzeitsimulatoren ist die sogenannte HiL-Technologie (Hardware-in-the-Loop). Diese ermöglicht eine Verknüpfung der auf der eigentlichen Regelungshardwareplattform (z. B. digitale Signalprozessoren (DSPs) und frei programmierbare Logikschaltkreise (FPGAs)) laufenden Regelungssoftware mit Softwaremodellen, die die leistungselektronischen Umrichter und ihre Umgebung nachbilden (emulieren). Die HiL-Technologie ermöglicht es dem Controller, so zu arbeiten, als würde er das reale System mit allen seinen Einrichtungen steuern.

Moderne leistungselektronische Systeme mit ihrer außergewöhnlich schnellen Dynamik stellen eine alles andere als banale Herausforderung für die Simulation in Echtzeit dar. Hier sind neue Wege zur Behandlung von Modellen mit variabler Struktur, begrenzten Simulationszeitschritten und minimalem Rechenaufwand erforderlich.

ABB nutzt Echtzeitsimulationen in großem Umfang und engagiert sich für die Weiterentwicklung der RTS-Technologie, um steigende Rechenanforderungen zu erfüllen, der zunehmenden Komplexität der Systeme gerecht zu werden und die Weiterentwicklung von Regelungsalgorithmen zu unterstützen.

Die Technologiekette

Die Technologiekette ist der Prozess, der die Verbesserung von Technologiekonzepten von einer Generation zur nächsten beschreibt. In der Technologiekette für Umrichtersysteme von ABB spielt die Echtzeitsimulation eine entscheidende Rolle.

Der Prozess beginnt mit dem Wissen über die bestehende Technologie (Generation k-1) und lenkt die Entwicklung neuer Ideen bis hin zu einem verbesserten Produkt. Diese Ideen müssen umgesetzt, getestet und verifiziert werden, bevor das Regelungskonzept als Generation k Bestandteil eines Produkts werden kann → 2.

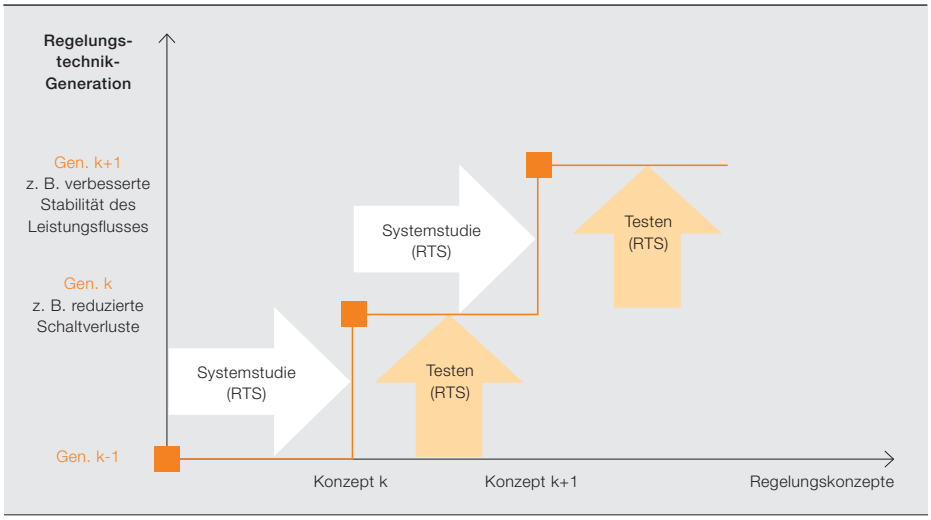
Zentrale Kriterien der Echtzeitsimulation sind die Erfüllung der kritischen zeitlichen Bedingungen und die Bereitstellung schneller und genauer physikalischer Modelle.

Die Echtzeitsimulation unterstützt die Phase der Konzeptformulierung, indem sie eine Umgebung zur Untersuchung und Schaffung eines grundlegenden Verständnisses des Systemverhaltens vor der Definition eines Regelungskonzepts bereitstellt.

Titelbild
Die Echtzeitsimulation ist ein wichtiges Werkzeug für die Entwicklung von anspruchsvollen leistungselektronischen Systemen, wie sie zum Beispiel in Schienenfahrzeugen zum Einsatz kommen.

Echtzeitsimulationen spielen eine entscheidende Rolle in verschiedenen Phasen der Technologiekette, die die Übertragung neuer Regelungskonzepte in erfolgreiche leistungselektronische Produkte beschreibt.

2 Die Technologiekette



Sobald ein Regelungskonzept entwickelt und im Umrichter implementiert ist, muss es rigoros nach vorgegebenen Standards geprüft werden, bevor das Produkt tatsächlich eingesetzt werden kann. Diese Phase umfasst mehrere Prüfschritte in unterschiedlichen Umgebungen von der Offline-Simulation über die Echtzeitsimulation bis hin zur Prüfung am realen System. Üblicherweise reichen Offline-Simulationen nicht aus, um das Verhalten des Systems im geschlossenen Regelkreis mit der tatsächlichen integrierten Regelungssoftware und -hardware wiederzugeben, und sind für die geforderte Genauigkeit zu rechenintensiv. Außerdem kann das Testen von Umrichtersoftware an realen Systemen teuer (ein Testtag kann bis zu 60.000 USD kosten), zeitaufwändig und bei extremen Parametern wie Kurzschlüssen, Überspannungen oder -strömen, großen Lasten, hohen Geschwindigkeiten usw. sogar untragbar sein.

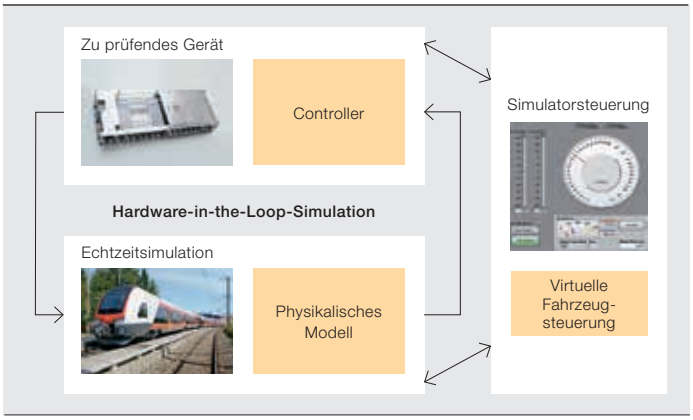
Der Schlüssel zur Bewältigung der Komplexität heutiger Systeme liegt in der Echtzeitsimulation. Sie gleicht die Defizite von Offline- und Vor-Ort-Prüfungen mithilfe des leistungsstarken Konzepts der Online-Emulation aus. Dabei wird die Komplexität des realen Systems in Echtzeit nachgebildet, gleichzeitig bleiben die Vorteile einer Simulation erhalten: Flexibilität, schnelle Implementierung, einfache Fehlerbeseitigung und eine große Testabdeckung. Dies ermöglicht eine sorgfältige Prüfung und Verbesserung der Regelungssoftware in den frühen Entwicklungsphasen bei gleichzeitiger Sicherung der Software- und Produktqualität und Verkürzung der abschließenden Inbetriebnahme am realen System.

Spezialisierte Teams von Ingenieuren arbeiten kontinuierlich daran, die technologischen Herausforderungen zu bewältigen, die sich aus den hohen Anforderungen an die RTS-Systeme ergeben.

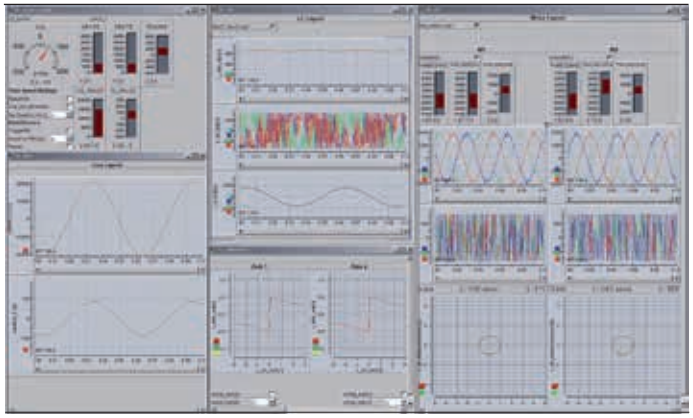
Herausforderungen in der Echtzeitsimulation

Um eine zuverlässige Entwicklung und Prüfung von Regelungssystemen zu gewährleisten, muss die Echtzeitsimulation in der Lage sein, die reale Arbeitsumgebung des Controllers mit hoher Genauigkeit abzubilden. In Traktionsanwendungen steuert der Controller z. B. die Leistungselektronik des Traktionsumrichters im Zug. Die Echtzeitsimulation emuliert diese Umgebung mithilfe spezieller Hard- und Softwarekonfigurationen, wobei komplexe mathematische Modelle, die zusammen als das „physikalische Modell“ bezeichnet werden, den Umrichter und den Zug ersetzen, während der Controller im geschlossenen Regelkreis mit diesem physikalischen Modell verbunden bleibt → 3. Ausgehend von den vom Controller empfangenen Eingangsgrößen (z. B. Schaltimpulse zum Ansteuern der Halbleiterelemente im Umrichter) berechnet das physikalische Modell die erforderlichen Ausgangsgrößen (z. B. Spannungen, Ströme und Drehzahl) und sendet diese für den nächsten Simulationszyklus an den Controller zurück. Relevante Zustände des physikalischen Modells können über eine Benutzeroberfläche visualisiert, überwacht und verändert werden → 4. Das Traktions-RTS-System verfügt zusätzlich über eine virtuelle Fahrzeugsteuerung, über die der gewünschte Sollwert für die Zugkraft bzw. die Geschwindigkeit auf die gleiche Weise

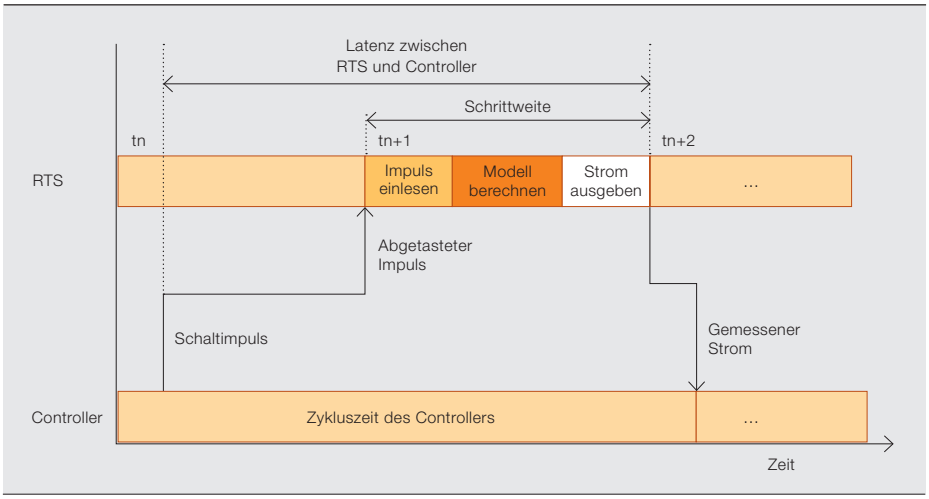
3 RTS-Anordnung für die HiL-Simulation mit einer virtuellen Fahrzeugsteuerung



4 RTS-Benutzeroberfläche zur Darstellung des Anlagenzustands in Echtzeit und zur direkten Interaktion mit dem physikalischen Modell



5 Die maximale Verzögerung zwischen dem Senden der Schaltimpulse durch den Controller an den Echtzeitsimulator (RTS) und der Reaktion entspricht der doppelten RTS-Schrittweite.



wie im realen Fahrzeug eingestellt werden kann ➔ 3.

Innerhalb des ABB-Konzerns wurden mehrere Echtzeitsimulatoren jeweils speziell für bestimmte Geschäftsbereiche in Zusammenarbeit mit verschiedenen Anbietern von RTS-Systemen entwickelt ➔ 1.

Die Simulatoren können sich zwar in ihrem Umfang, der verwendeten Hardware oder den Besonderheiten der Modellierung der Regelstrecke voneinander unterscheiden, doch für alle gelten die gleichen grundsätzlichen Herausforderungen. Besonders zwei stark voneinander abhängige Kriterien – die Erfüllung der kritischen zeitlichen Bedingungen und die Bereitstellung schneller und genauer physikalischer Modelle – stehen im Zentrum der Echtzeitsimulation.

Kritische zeitliche Bedingungen

Eine zentrale Anforderung für ein RTS-System ist die Synchronisation zwischen Echtzeit und simulierter Zeit. Mit anderen Worten, die simulierten Eingangsgrößen, Ausgangsgrößen und Zustände, die nach einer bestimmten Simulationszeit in der Simulation erreicht werden, sollten die gleichen sein, die im realen System im gleichen Zeitraum erreicht werden. Die Geschwindigkeit, mit der die Echtzeituhr diese Synchronisation erreicht, wird von der Schrittweite der Echtzeitsimulation bestimmt, deren Länge sorgfältig gewählt werden muss. Einerseits sollte die Schrittweite so klein wie möglich sein, um die Latenz des simulierten Systems zu minimieren. Andererseits muss sie lang genug sein, damit das RTS-System die in einem Simulationsschritt erforderlichen Operationen ausführen kann, ohne Zeitüberschreitungen zu verursachen ➔ 5.

Schnelle und genaue physikalische Modelle

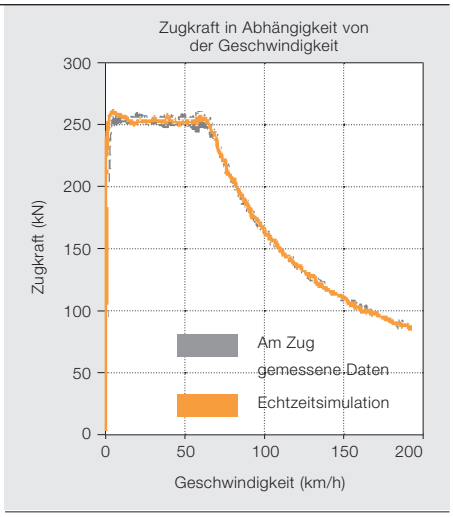
Die hohen Schaltfrequenzen der Leistungselektronik (im kHz-Bereich) erfordern Controller-Zykluszeiten im Bereich von 100 bis 300 µs. Dies wiederum bedeutet, dass das RTS-System noch kürzere Zykluszeiten (weniger als 60 µs) aufweisen muss. Schnelle und genaue Simulationen mit Schrittweiten im Mikrosekundenbereich zu gewährleisten, stellt besonders für leistungselektronische Systeme eine Herausforderung dar im Vergleich zu Anwendungen mit einer langsameren Dynamik wie in der Kraftfahrzeugtechnik oder Robotik, wo die RTS-Schrittweiten im Millisekundenbereich liegen.

Die RTS-Systeme von ABB gewinnen diesen anspruchsvollen Wettlauf gegen die Zeit dank spezieller Hard- und Softwarelösungen von Drittanbietern, verbunden mit dem Know-how von ABB in der Modellierung und Simulation von leistungselektronischen Schaltungen. Da eine schnelle Hardware nicht ausreicht, müssen auch die physikalischen Modelle und die numerischen Routinen zu deren Lösung auf maximale Effizienz ausgelegt sein – ein Ziel, in das ABB erhebliches Know-how investiert.

6 ABB-Traktionsumrichter mit Controller vom Typ PEC 800

7 Beschleunigungstest für einen FLIRT der Norwegischen Staatsbahn (NSB)

7a Echtzeitsimulation



7b Die Ergebnisse der Messungen am Zug stimmen gut mit den Simulationen überein.

Eine der schwierigsten Herausforderungen ist die Verarbeitung der Schaltimpulse, die vom Controller empfangen und an die Schaltelemente des Umrichters (z. B. IGBTs) gesendet werden. Um diese präzise zu simulieren, ist eine Auflösung erforderlich, die feiner ist als die RTS-Zykluszeit. Dies wird mithilfe von FPGA-Technologie erreicht [1]. Zur Simulation des Umrichters im Gleichrichterbetrieb werden auch interne, durch selbstkommutierende Dioden hervorgerufene Schaltereignisse modelliert. Die häufigen Veränderungen der Schaltstellungen und die nicht lineare Eigenschaft einiger Modellkomponenten sorgen für zusätzliche Komplexität bei der Modellierungs- und Simulationsaufgabe, da verschiedene Schalterkonfigurationen erkannt und unmittelbar während der Laufzeit gelöst werden müssen. Solche Probleme können zwar in Offline-Simulationen mithilfe ausgeklügelter numerischer Zeitintegrationsverfahren gelöst werden, doch da diese Methoden für den Echtzeiteinsatz zu rechenintensiv sind, werden spezielle Modellierungs- und Simulationslösungen benötigt. Heute können bei ABB hochkomplexe Systeme aus verschiedenen Bereichen der Leistungselektronik auf entsprechenden Echtzeitplattformen simuliert werden → 1. Für Echtzeitsimulationen im Traktionsbereich kommt z. B. eine dSPACE-basierte Simulationsplattform zum Einsatz.

Fahrzeug im Labor

Das RTS-System in der Produktgruppe Transportation bietet flexible Hard- und Softwarekonfigurationen für Eisenbahnanwendungen im Leistungsbereich von 100 kW bis über 6 MW, für Ein- oder Dreiphasen-Wechselstrom, für Gleichstrom- und für Mehrsystemlösungen bzw. dieselelektrische Systeme.

Die RTS-Modellierung umfasst die Bereiche Stromversorgung der Lokomotive (Fahrdraht, Pantograph und Hauptleistungsschalter), Transformator, Traktionsumrichter (Netzumrichter, DC-Zwischenkreis mit abgestimmtem Filter, Motorumrichter), Motor, Getriebe und Achse, Hilfsbetriebeumrichter, Dieselmotorgenerator, Energiespeicher und Rad-Schiene-Kontakt. Die physikalischen Modelle sind leicht konfigurierbar und können durch Unterstützung verschiedener Transformatorenkonfigurationen, Umrichtertopologien (Zwei- oder Dreipunkt) oder Antriebskonfigurationen (Einzelachs- oder Gruppenantrieb) usw. an unterschiedliche Kundenanforderungen angepasst werden.

Eines der Projekte, für die das RTS-System genutzt wird, ist der elektrische Niederflurtriebwagen FLIRT der Stadler Rail AG. ABB liefert die Traktionsumrichter, Traktionstransformatoren und Niederspannungskomponenten für diesen Zug → 6. Der Transformator und der Umrichter sind verantwortlich für die Umwandlung des Einphasen-Wechselstroms mit statischer Frequenz aus der Versorgungsleitung in den zur Speisung des Motors und zum Antrieb der Räder erforderlichen Dreiphasen-Wechselstrom mit veränderlicher Frequenz. Hierzu wird die vollständige Umwandlungskette von der Stromversorgung bis zum Rad-Schiene-Kontakt im RTS-System modelliert, sodass die Regelungssoftware und -hardware in einem geschlossenen Regelkreis getestet werden kann – so, als wenn sie sich im realen Zug befinden würde.

Ein wichtiger Leistungsparameter eines Zugs ist die Entwicklung der Zugkraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Dies beschreibt die Leistung des Zugs. Für den FLIRT wird eine Spitzenleistung von 4.500 kW am Rad mit einer maximalen Zugkraft von 250 kN und einer Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h erreicht. Die Zugkraft-Geschwindigkeit-Kennlinie kann mit dem RTS-System simuliert werden → 7. Bis die Spitzenleistung von 4.500 kW am Rad erreicht ist, wird eine maximale Zugkraft von 250 kN (konstant) angelegt. Danach sinkt die Zugkraft, während der Zug mit konstanter Leistung auf seine Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h beschleunigt. Die mit dem RTS-System ermittelten Kurven stimmen sehr gut mit den Messungen am Zug überein, was die Zuverlässigkeit der Simulation unterstreicht.

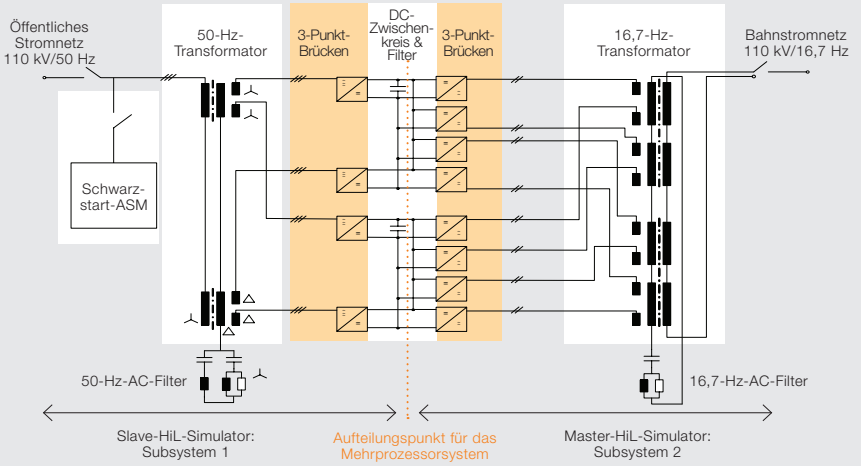
80 MW im Labor

Bei einem anderen anspruchsvollen Projekt ging es um die Simulation eines statischen Frequenzumrichters für den Energieaustausch zwischen dem dreiphasigen öffentlichen 50-Hz-Stromnetz und dem einphasigen 16,7-Hz-Bahnstromnetz. Zur Lösung eines Problems dieser Größenordnung wurde eine Systemanordnung mit parallelen Prozessoren gewählt → 8.

RTS in der Zukunft

Die Auswirkung der Echtzeitsimulation auf regelungstechnische Neuerungen in der Leistungselektronikindustrie steht heute

8 RTS-Konfiguration mit mehreren Prozessoren für einen Bahnstrom-Frequenzumrichter: 110 kV/50 Hz dreiphasig auf 110 kV/16,7 Hz einphasig.



– Zu simulierende Komponenten:
  50-Hz-Netz mit verschiedenen Fehlersituationen
  Schwarzstart-Asynchronmaschine (ASM) im 50-Hz-Netz
  50-Hz-Transformator (linear)
  50-Hz-AC-Filter (in Y-Schaltung)
  50-Hz-AC/DC-Wandler mit 12 Phasen (jede Phase kann ein- oder ausgeschaltet sein)
  DC-Zwischenkreis mit Spannungsbegrenzer und verschiedenen Filtern
  16,7-Hz-DC/AC-Wandler mit 16 Phasen (jede Phase kann ein- oder ausgeschaltet sein)
  16,7-Hz-Transformator mit Sättigung
  16,7-Hz-Netz mit Last und verschiedenen Fehlersituationen
– Anzahl der zu behandelnden E/As:
  200 schnelle E/As und etwa 750 langsame E/As
– Maximale Schrittweite: 60 µs

Problem: Aufgrund seiner Größe und Komplexität ist es unmöglich, ein solches System mit einem einzigen Simulator angemessen zu simulieren.

Lösung: Eine Systemanordnung mit mehreren Prozessoren und zwei vollständigen HiL-Simulatoren
In einer Mehrprozessor-Anordnung müssen zwei oder mehr Simulatoren vor und nach ihrer Berechnung gemessene/berechnete Größen austauschen, da ein Subsystem auf Ausgaben des anderen angewiesen ist.
Diese Anordnung kann Signalinkonsistenzen hervorrufen, die bei unpassender Aufteilung des Systems zu falschen Simulationsergebnissen oder sogar Instabilität führen. Daher ist die Systemaufteilung ein entscheidender Faktor für die gewünschte Leistungsfähigkeit. Bei dieser Anwendung wird das System am DC-Zwischenkreis, wo die Systemgrößen relativ „statisch" sind, in zwei Subsysteme aufgeteilt.

Alle Komponenten der 50-Hz-Seite einschließlich des DC-Zwischenkreises mit seinen verschiedenen Filtern werden auf einem Simulator (Slave) und der Rest parallel auf dem anderen Simulator (Master) simuliert.

außer Zweifel. Da überrascht es nicht, dass ein Bedarf an noch effizienteren Tests und noch komplexeren Testszenarien besteht. Hier wird automatisches Softwaretesten (AST) eine bedeutende Rolle spielen. AST stellt eine Umgebung zur automatischen Ausführung und Aufzeichnung bedienerfreier, routinemäßiger Regelungstests bereit, was die Test- und Inbetriebnahmephase erheblich verkürzt.

Hinsichtlich der RTS-Modellierung werden in Zukunft intelligente Lösungen gefordert sein, die den Modellierungsaufwand für zunehmend komplexe geschaltete Systeme reduzieren. Aktuelle Verfahren erfordern ein umfassendes Verständnis des Systemverhaltens und eingehende mathematische Kenntnisse zur Erstellung von Modellen und Simulationen, die die gestellten Anforderungen an die Geschwindigkeit und Genauigkeit erfüllen. Mit wachsender Komplexität leistungselektronischer Systeme gewinnen hochgradig optimierte Simulationslösungen, die sich Modellhierarchien und Parallelität zunutze machen, an Bedeutung. Mit Blick in diese Richtung könnte die quantisierte Zustandssystemmethode (Quantized State System, QSS) [2] das Wesen der diskreten Simulation revolutionieren. Bei QSS-Verfahren wird die Zeit nicht mehr diskretisiert, sondern die Zustandsgrößen werden quantisiert. So können Systeme mit häufigen Topologieveränderungen, wie leistungselektronische Systeme, mithilfe eines ereignisdiskreten Formalismus effizienter simuliert werden.

Ganz gleich, ob es um die elektrische Energieerzeugung oder -übertragung, erneuerbare Energien, Industrieantriebe oder elektrische Züge geht, mithilfe von Echtzeitsimulationen für leistungselektronische Systeme wird ABB – in enger Zusammenarbeit mit Anbietern von Simulationsplattformen – die Grenzen weiter vorantreiben. Dank verbesserter Rechenleistung, intelligenteren Modellen und schnelleren Löseralgorithmen werden RTS-Systeme eine schnelle Entwicklung der Regelungstechnik von einer Generation zu nächsten entlang der Technologiekette unterstützen.

Roxana Ionutiu
Erich Scheiben
Xinhua Ke
Daniel Stump
ABB Discrete Automation and Motion,
Power Conversion
Turgi, Schweiz
roxana.ionutiu@ch.abb.com
erich.scheiben@ch.abb.com
xinhua.ke@ch.abb.com
daniel.stump@ch.abb.com

Silvia Mastellone
Nikolaos Oikonomou
Didier Cottet
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Schweiz
silvia.mastellone@ch.abb.com
nikolaos.oikonomou@ch.abb.com
didier.cottet@ch.abb.com

Literaturhinweise

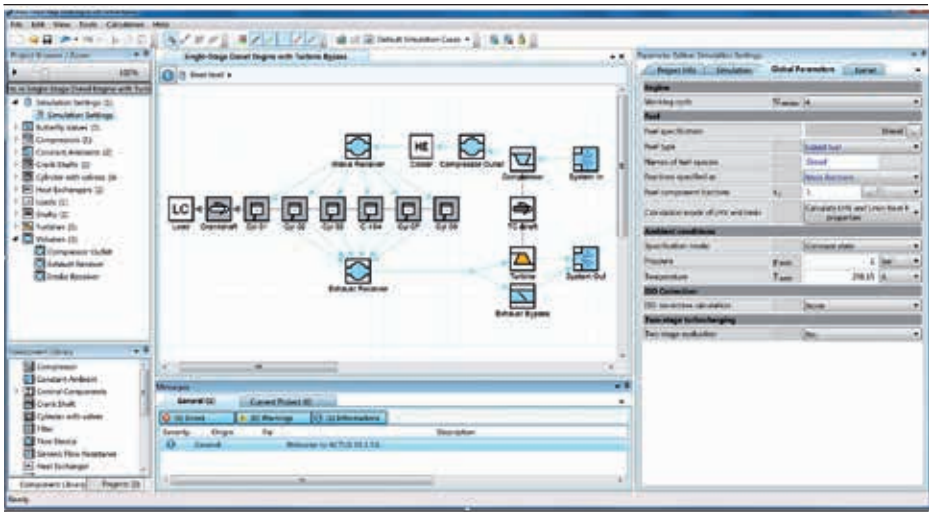
[1] Terwiesch, P. et al (Mai 1999): „Rail vehicle control system integration testing using digital hardware-in-the-loop simulation". IEEE Transactions on Control Systems Technology Vol. 7, No. 3: 352, 362
[2] Bergero, F. et al. (2013): „A Novel Parallelization Technique for DEVS Simulation of Continuous and Hybrid Systems". Simulation. Im Druck

Turbo-Boost

ACTUS – die neue Simulationssoftware von ABB für große aufgeladene Verbrennungsmotoren

THOMAS BÖHME, ROMAN MÖLLER, HERVÉ MARTIN – Die Leistung aufgeladener Verbrennungsmotoren hängt stark von der Leistungsfähigkeit des Turboladersystems ab. Zwischen Motor und Turbolader findet ein komplexes Zusammenspiel statt, für dessen Verständnis die Simulation eine zentrale Rolle spielt. Heutzutage verwenden die meisten Motorenhersteller Simulationen, um die Motorkomponenten bestmöglich aufeinander abzustimmen und so ihre Motorendesigns zu optimieren. Ein Großteil der Hersteller nutzt hierzu kommerzielle Simulationstools, die manchmal durch eigene Entwicklungen für bestimmte Aufgaben ergänzt werden. Obwohl die meisten heute erhältlichen kommerziellen Tools sehr hochwertig sind und sehr umfangreiche Funktionalitäten bieten, setzt ABB weiterhin auf hauseigene Software für die Motorensimulation. So kann die Simulation vollständig an die spezifischen Bedürfnisse von ABB als Hersteller von Turboladern für Großmotoren zugeschnitten werden. Diese reichen von der Auswahl optimaler Turboladerspezifikationen im Vertrieb bis hin zu Forschungsanwendungen für Prüfstände, die Turbolader-Produktentwicklung und die Entwicklung neuer Aufladungskonzepte.

1 Grafische Benutzeroberfläche von ACTUS mit dem Modell eines einfachen Sechszylindermotors mit einstufiger Aufladung und Turbinenbypassventil



Die Simulation aufgeladener Motorsysteme hat bei ABB eine lange Tradition. Die ersten digitalen Berechnungen wurden bereits mit der Einführung der ersten digitalen Computer in den 1960er Jahren durchgeführt [1,2]. Diese Berechnungswerkzeuge wurden kontinuierlich verbessert und erweitert. Anfang der 1980er Jahre wurden die vorhandenen Methoden in einer einzigen Simulationsplattform mit der Bezeichnung SiSy (Simulation System) zusammengefasst, die seitdem ständig erweitert wurde [3].

Nach über 20 Jahren Entwicklungsarbeit wurde die Erweiterung von SiSy durch den monolithischen Aufbau der Software zunehmend erschwert. Daher wurde beschlossen, die Software durch ein Simulationstool auf der Basis eines modernen, modularen Softwaredesigns zu ersetzen. Das neue Tool trägt den Namen ACTUS (Advanced Computation of TUrbocharging Systems) und besteht aus zwei Teilen: einer modernen Benutzeroberfläche mit einem grafischen Topologie-Editor zur Einrichtung der Simulationen und einem Simulations-Kernel zur Ausführung der Berechnungen.

Grafische Benutzeroberfläche

Auf der grafischen Benutzeroberfläche wird der Motor aus Komponenten wie Rohren, Ventilen, Verdichtern, Zylindern, Wellen usw. aus einer Bibliothek zusammengesetzt und deren mögliches Zusammenspiel durch Fluid-, mechanische, Wärme- oder Signalverbindungen definiert → 1. Sobald die Topologie festgelegt ist, werden im Parametereditor (rechts im Bild) die Parameter jeder Komponente spezifiziert. Ein spezieller Simulationsfalleditor ermöglicht die Einrichtung mehrerer aufeinander folgender Simulationen – z. B. um mehrere Motorlastpunkte in einem einzigen Durchlauf zu simulieren. Darüber hinaus bietet die Benutzeroberfläche bequemen Zugang zu einer umfangreichen Datenbank mit detaillierten Leistungsdaten aller ABB-Turbolader seit den 1970er Jahren.

ACTUS besteht aus einer modernen Benutzeroberfläche mit einem grafischen Topologie-Editor zur Einrichtung der Simulation und einem Simulations-Kernel zur Ausführung der Berechnungen.

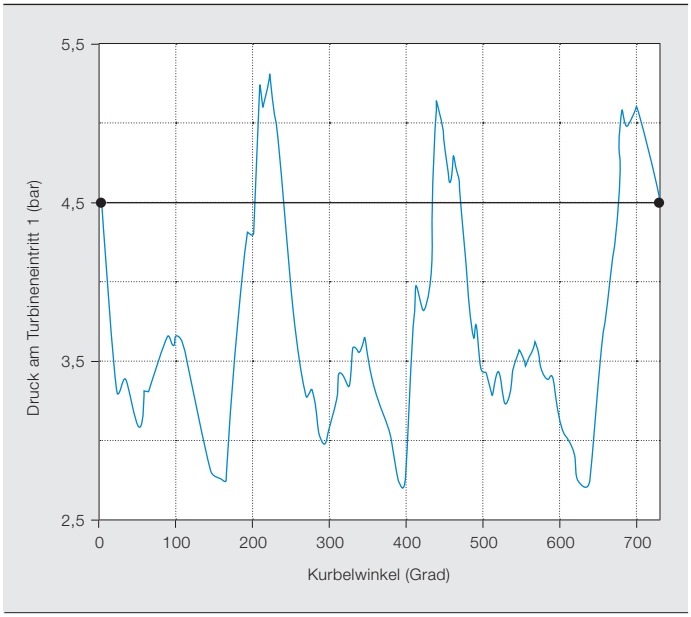
Simulations-Kernel

Der zweite Teil von ACTUS, der Simulationskern, löst die Modellgleichungen für das System und berechnet die Ergebnisse. Das vorrangige Ziel der Simulation besteht darin, die wichtigsten Aspekte des gesamten Motorsystems vorherzusagen, und nicht einzelne Aspekte im Detail zu betrachten. Zwar ist es heute mittels dreidimensionaler numerischer Strömungsberechnungen möglich, den Gaswechsel im Zylinder eines Motors zu simulieren, doch ein solcher Detaillierungsgrad wäre für die Berechnung auf Systemebene nicht geeignet. Diese Methode käme aufgrund ihrer langen Berechnungszeit für den Einsatz in der Optimierung nicht infrage, und vor allem wäre für solche Berechnungen eine genaue Kenntnis sämtlicher Geometrien des Motors nötig, die ABB üblicherweise nicht zur Verfügung stehen.

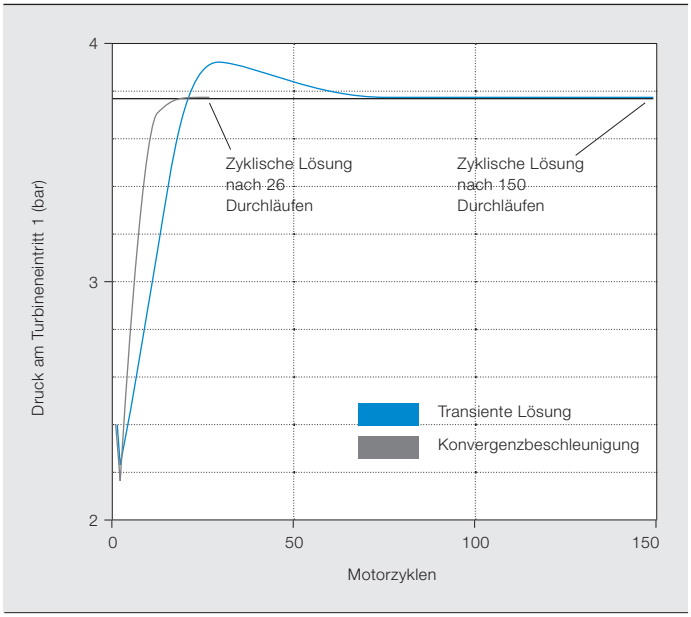
Aus diesem Grund werden bei ACTUS vereinfachte Modelle verwendet, die von physikalischen Grundprinzipien abgeleitet sind. Die Systemsimulation eines aufgeladenen Motors erfordert eine Vielzahl solcher vereinfachter Modelle aus verschiedenen Disziplinen. Hierzu gehören mechanische Modelle für die Kurbelwelle, die Turboladerwellen und -lager, thermische Modelle für den Wärmeübergang, chemi-

Titelbild
Die immense Komplexität von Turboladern für Großmotoren lässt sich nur mit Simulationssoftware bewältigen, die in-house für diesen Zweck entwickelt wurde.

2 Druck am Turbineneintritt 1 über einen Motorzyklus für einen stationären Motorbetriebspunkt (bei Volllast)



3 Vorteil der Konvergenzbeschleunigung: Statt der 150 Rechendurchläufe im transienten Modus werden nur 26 Durchläufe benötigt.



Der Vertrieb nutzt ACTUS zur Auswahl optimaler Turboladerspezifikationen für einen bestimmten Motor – eine Aufgabe mit der die meisten Kunden ABB betrauen.

sche Modelle für die Emissionen und thermodynamische Modelle für die Gaseigenschaften sowie für die Kompression, Expansion, Fluidströmung und Speicherung.

Bei komplexen Prozessen wie der Verbrennung im Zylinder werden die physikalisch motivierten Modelle üblicherweise durch empirische Modellerweiterungen ergänzt. Die Grundlage hierfür liefern die Fachliteratur oder Forschungskooperationen, oder sie werden intern bei ABB entwickelt.

Konvergenzbeschleunigung mit ACTUS

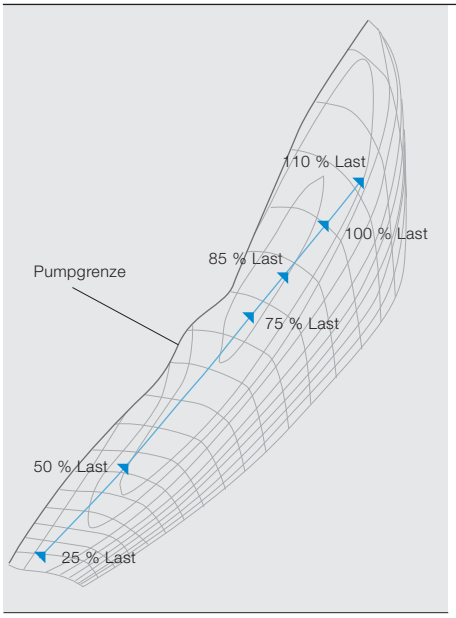
Da Großmotoren meist unter konstanter Last laufen, sind die stationären Betriebspunkte für die Optimierung des Designs am wichtigsten. Aufgrund der unregelmäßigen Natur des Verbrennungsprozesses ist ein stationärer Motorlastpunkt kein statischer Zustand, sondern vielmehr eine Situation, die eine gewisse Periodizität aufweist. Dies zeigt sich z. B. an der Druckkurve nahe dem Turbineneintritt während eines Motorzyklus → 2.

Die Lösung ist periodisch, wenn alle dynamischen Zustände innerhalb des Systems nach Abschluss eines Zyklus wieder dem Anfangszustand entsprechen. Der gängigste Ansatz zur Bestimmung einer solchen periodischen Lösung besteht darin, eine transiente Simulation so lange laufen zu lassen, bis alle anfänglichen Störungen abgeklungen sind. Aufgrund der hohen Trägheitsmomente des Turboladers und der Kurbelwellen sind typischerweise mehr als 100 Motorzyklen zur Bestimmung einer zyklischen Lösung erforderlich → 3. Um solche Simulationen zu beschleunigen, nutzt ACTUS mit der sogenannten Konvergenzbeschleunigung eine Optimierungsmethode, die die Anzahl der notwendigen Zyklen zum Erreichen einer zyklischen Lösung deutlich verringert. So lassen sich stationäre Betriebsbedingungen für typische Motoren innerhalb von Sekunden auf einem standardmäßigen PC berechnen.

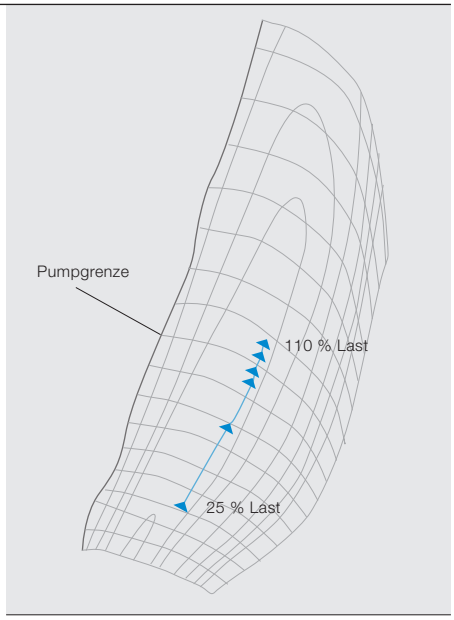
ACTUS Match

Die Konvergenzbeschleunigung wird mit einer einzigartigen Funktion namens ACTUS Match gekoppelt. Diese ermöglicht die Berechnung der Eingangswerte für eine Reihe gewünschter Ausgangswerte. Dies ist nützlich, da beim Systemdesign häufig eine Systemkonfiguration bestimmt werden muss, die ein gewünschtes Ergebnis liefert. Eine gängige Aufgabe bei der Abstimmung von Turboladern besteht z. B. in der Bestimmung der richtigen Turbinengröße, damit der Motor mit einem vom Motorenhersteller vorgegebenen Luft-Kraftstoff-Verhältnis und einer gegebenen Last läuft. Aus Sicht der Simulation ist dies eine anspruchsvolle Aufgabe, da das resultierende Luft-Kraftstoff-Verhältnis typischerweise keine Eingangsgröße für die Simulation ist, sondern ein Ergebnis, das vom Ladedruck abhängt. Dieser wiederum ist von der effektiven Turbinenfläche (Größe) abhängig.

4 Typische Betriebslinien eines Verdichters für einen zweistufig aufgeladenen Kraftwerksmotor



4a Niederdruckverdichter



4b Hochdruckverdichter

In der Produktentwicklung wird ACTUS dazu genutzt, Designparameter für die nächste Generation von Turboladern vorherzusagen.

Hier ermöglicht ACTUS Match die Bestimmung der erforderlichen Turbine unter gleichzeitiger Berücksichtigung der für die gewünschte Motorlast erforderlichen Kraftstoffmenge. ACTUS Match erledigt diese Aufgabe direkt und mit nur wenig mehr Aufwand als eine einzelne Standardsimulation. Die meisten Simulationstools erfordern für solche Anwendungen einen externen Optimierungsprozess, was zu erheblich längeren Laufzeiten und einer höheren Komplexität für den Benutzer führt. Dank dieser hohen Rechenleistung kann ACTUS äußerst effizient für Designstudien und Optimierungen eingesetzt werden.

Anwendung im Vertrieb

ACTUS wurde 2012 eingeführt und ist bei ABB mittlerweile verbreitet im Einsatz. So wird die Software von mehr als 30 Benutzern in Vertriebs- und Entwicklungsabteilungen an ABB-Standorten auf der ganzen Welt verwendet.

Ein typisches Anwendungsbeispiel für den Einsatz im Vertrieb ist die Auswahl einer optimalen Turboladerspezifikation für einen bestimmten Motor (tatsächlich betrauen die meisten Kunden ABB mit dieser Aufgabe). Ausgehend von den wichtigsten Motordaten und, sofern verfügbar, Messwerten von ähnlichen Motoren wird zunächst ein Simulationsmodell des Motors erstellt. Dieses wird dann zur Bestimmung des am besten geeigneten Turboladers verwendet.

Bei komplexen Motorsystemen wie einem zweistufig aufgeladenen Motor mit Turboladerbypass als Regelelement wird dies zu einer komplexen Aufgabe. Normalerweise definiert der Motorenhersteller zunächst die gewünschten Betriebsbedingungen für den Motor. Die Aufgabe von ABB besteht dann darin, eine Verdichter- und Turbinenkonfiguration zu wählen, die die Effizienz der Aufladung und damit den Wirkungsgrad des Motors maximiert. Gleichzeitig muss das Design eine Reihe weiterer Randbedingungen erfüllen wie eine bestimmte Regelreserve für den Bypass, einen minimalen Abstand zur Pumpgrenze des Verdichters, maximal zulässige Drehzahlen des Turboladers und maximal zulässige Turbineneintrittstemperaturen.

Hier kann mit ACTUS Match die zur Spezifikation benötigte Zeit von mehreren Stunden auf einige Minuten verkürzt werden ➔ 4.

Anwendung in der Entwicklung

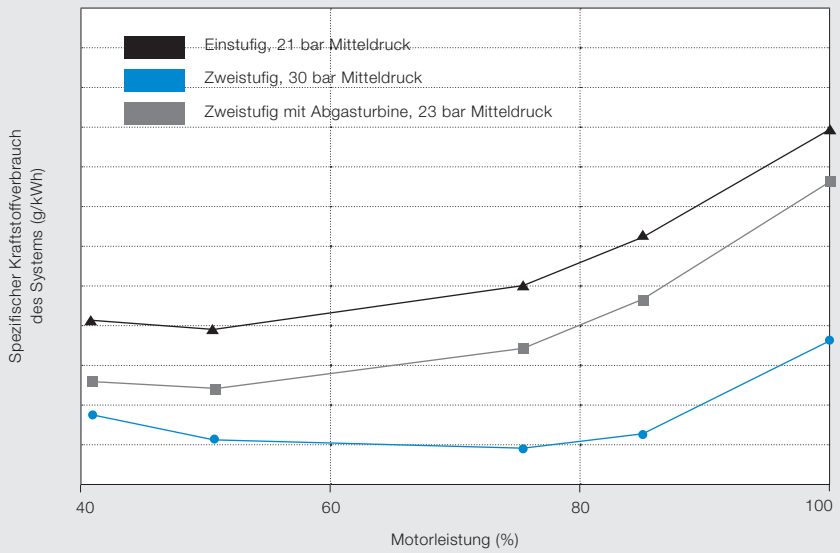
In der Turboladerentwicklung wird ACTUS verwendet, um neue Turboladerkonzepte und deren Einfluss auf den Verbrennungsmotor zu untersuchen. Einige dieser Studien wurden 2013 beim 27. CIMAG World Congress vorgestellt [4, 5, 6].

Ein aktueller Trend ist die zweistufige Turboaufladung, mit der erheblich höhere Druckverhältnisse genutzt werden können. Während die Vorzüge der zweistufigen Aufladung bei Viertaktmotoren bekannt sind und mehrere Motorenhersteller bereits Motoren mit zweistufiger Aufladung anbieten, ist ihr Potenzial für große Zweitaktmotoren noch nicht vollständig erforscht. Um dieses zu ändern, wurden Simulationsstudien durchgeführt, die die potenziellen Kraftstoffeinsparungen unter verschiedenen Lastbedingungen aufzeigen [4] ➔ 5.

Im Referenzfall (obere Kurve) wird der Motor einstufig mit einem effektiven Mitteldruck von 21 bar aufgeladen, wie er heutzutage üblich ist. Die Studie zeigt, dass durch zweistufige Aufladung und entweder Erhöhung des effektiven Mitteldrucks oder Nutzung einer Abgasturbine bzw. eines Abwärmerückgewinnungssystems der Gesamtkraftstoffverbrauch erheblich gesenkt werden kann. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es sich bei diesen Ergebnissen um Prognosen handelt, die ausschließlich auf Simulationsmodellen basieren, die zur Erkundung des Potenzials zukünftiger Möglichkeiten für die Turboaufladung genutzt wurden, lange bevor experimentelle Ergebnisse vorliegen.

Neben den oben beschriebenen Anwendungen wird ACTUS auch in der Produktentwicklung genutzt, um Designparameter für die nächste Generation von Turboladern vorherzusagen. Außerdem bietet ACTUS einen Modus, in dem die Leistungsfähigkeit eines Turboladers auf der Basis von Messdaten evaluiert und mit den erwarteten Werten verglichen werden

5 Vergleich des Kraftstoffverbrauchs von zwei verschiedenen Turboladertopologien für Zweitaktmotoren



In der Turboladerentwicklung wird ACTUS verwendet, um neue Turboladerkonzepte und deren Einfluss auf den Verbrennungsmotor zu untersuchen.

kann. Seit der jüngsten Erweiterung können mit ACTUS auch die Spezifikationen für neue Prüfstände für zweistufige Turboladersysteme an den ABB-Standorten bestimmt werden. Die zuvor genutzten Spezifikationsverfahren waren aufgrund der hohen Komplexität von zweistufigen Systemen nicht mehr geeignet.

Der Turbo für die Zukunft

Ein genaues Verständnis der Turboaufladung und ihre kontinuierliche Verbesserung gehört von je her zu den Stärken von ABB. Ein Teil dieses Wissens geht aus der langjährigen Erfahrung in der Systemsimulation von großen Verbrennungsmotoren hervor. Das neue Simulationstool ACTUS baut auf dieser Tradition auf und stellt eine moderne, solide Basis für zukünftige Simulationsanforderungen bereit.

Als hauseigenes Simulationstool ermöglicht ACTUS äußerst effiziente Simulationen auf Systemebene und ist in hohem Maße auf die spezifischen Bedürfnisse von ABB als Entwickler und Hersteller von Turboladern zugeschnitten. Damit ist ABB in der Lage, ihre Kunden weiterhin bei der Bestimmung der optimalen Turboladerlösung für ihre Motoren zu unterstützen und neue Aufladungskonzepte und Lösungen zu entwickeln, die den Kunden dabei helfen, die Leistungsfähigkeit ihrer Motoren zu verbessern und zukünftige Emissionsvorschriften zu erfüllen.

Thomas Böhme
Roman Möller
Hervé Martin
ABB Process Automation, Turbocharging
Baden, Schweiz
thomas.boehme@ch.abb.com
roman.moeller@ch.abb.com
herve.martin@ch.abb.com

Literaturhinweise

[1] Meier, E. (1965): „Zweistufige Aufladung". Brown Boveri Mitteilungen. Jahrgang 52, Nr. 3: 171–179
[2] Ryti, M.: „Computing the gas-exchange process of pressure charged internal combustion engines". Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 182, Part 3L, Paper 11. 1967–68
[3] Codan, E. et al.: „Das Programmpaket von ABB Turbo Systems AG für das Design und die Optimierung von Aufladesystemen". Motorprozesssimulation und Aufladung. Berlin, 2005
[4] Schürmann, P. et al.: „Contribution of turbocharging solutions towards improved fuel efficiency of two-stroke low-speed engines". CIMAC Congress 2013. Shanghai
[5] Christen, C., Brand, D.: „IMO Tier 3: Gas & Dual Fuel Engines as Clean & Efficient Solutions". CIMAC Congress 2013. Shanghai
[6] Kahi, M. et al.: „Second Generation of Two-Stage Turbocharging Power2 Systems for Medium-Speed Gas & Diesel Engines". CIMAC Congress 2013. Shanghai

Geschickt kombiniert

Besseres Design von Antriebssträngen durch Kombination elektromagnetischer und mechanischer Simulationen

TIMO P. HOLOPAINEN, TOMMI RYYPPÖ, GUNNAR PORSBY – Die Leistung, die in eine typische rotierende Maschine wie eine Pumpe oder einen Kompressor fließt, durchläuft auf ihrem Weg vom Stromnetz zum Ziel eine komplexe mechanische und elektrische Übertragungskette. Sämtliche Komponenten entlang der Kette müssen dabei den damit verbundenen Belastungen standhalten. Diese Belastungen, einschließlich extremer Kräfte durch Resonanz- oder Fehlermoden, treten als Torsion in den mechanischen Komponenten auf.

Dieses Verhalten kann durch mechanische Modellierung simuliert werden. Aber auch elektromagnetische Effekte in Form von elektromagnetischer Steifigkeit und Dämpfung können das Schwingungsverhalten beeinflussen, und diese lassen sich nur schwer in eine ganzheitliche Analyse des Antriebsstrangs einbinden. ABB besitzt langjährige Erfahrung in der Simulation der elektromagnetischen Felder von elektrischen Maschinen. Diese Erfahrung wird nun mit mechanischen Simulationsverfahren kombiniert, um die Torsionsanalyse von Antriebssträngen zu verbessern.

1 Ein typischer Antriebsstrang mit Gebläse (links), Gebläsewelle (durch die gelbe Abdeckung), Getriebe (unter der vorderen gelben Schallhaube) und Motor mit darüber liegendem Kühler (rechts)

Eine typische Kraftübertragungskette besteht aus einer angetriebenen Maschine, z. B. einem Kompressor oder einer Pumpe, einem optionalen Getriebe, einem Motor, einem ebenfalls optionalen Frequenzumrichter und dem Stromnetz. Diese einzelnen Komponenten sind mechanisch und elektrisch miteinander gekoppelt, und die zur Verrichtung der Nutzarbeit am Ende erforderliche Leistung durchläuft jede einzelne von ihnen. Alle Komponenten müssen diesem Leistungsfluss standhalten, der in mechanischen Komponenten als Drehmoment auftritt.

Das Bemessungs- oder Nenndrehmoment ist die Grundlage für die Dimensionierung der Komponenten. Doch durch Resonanz- oder Fehlermoden können extreme Belastungen auftreten. Resonanzschwingungen entstehen, wenn ein System mit seiner Eigenfrequenz angeregt wird. Die niedrigste Eigenfrequenz eines großen Antriebsstrangs liegt z. B. bei etwa 20 Hz. Entsprechende harmonische Anregungen kommen von allen Hauptkomponenten: der angetriebenen Maschine, dem Getriebe, dem Motor usw. [1] ➔ 1.

Torsionsanalyse von Antriebssträngen

Das Ziel einer Torsionsanalyse besteht darin, das Schwingungsverhalten eines Antriebsstrangs vorherzusagen. Diese Information wird benötigt, um schädliche Schwingungen unter allen Betriebsbedingungen zu verhindern. Im schlimmsten Fall können Unzulänglichkeiten bei der Analyse zu einer unvorhergesehenen Unterbrechung des Betriebs oder einem katastrophalen Ausfall führen.

In den meisten Fällen wird jedes Element eines industriellen Antriebsstrangs von einem anderen Hersteller – häufig ohne die notwendige Berücksichtigung der anderen Elemente – konstruiert und gebaut. Dies stellt den Systemintegrator vor eine große Herausforderung, denn ein charakteristisches Merkmal von Antriebsstrangschwingungen ist die Wechselwirkung dieser Elemente. Das bedeutet, dass die Torsionsschwingungen des Systems als Ganzes analysiert werden müssen. Üblicherweise erstellt der Systemintegrator ein Torsionsmodell auf der Grundlage der Daten, die von den Herstellern der einzelnen Komponenten zur Verfügung gestellt werden. Mithilfe dieses Modells stimmt der Systemintegrator dann zusammen mit den Herstellern das Design des Antriebsstrangs so ab, dass die Anforderungen hinsichtlich der Torsionsschwingungen erfüllt werden.

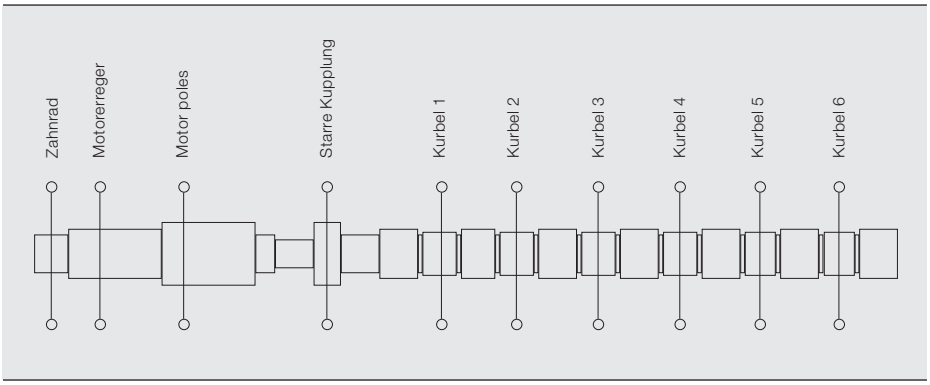
Das dazu verwendete Torsionsmodell ist normalerweise eindimensional. Dies hat praktische Gründe, denn ein vollständiges numerisches Modell jeder Komponente würde Informationen enthalten, die für die Torsionsanalyse überflüssig sind. Außerdem könnte das vollständige Modell vertrauliche Produktinformationen preisgeben. Daher sind die Torsionsmodelle von Antriebsstrangkomponenten absichtlich so gestaltet, dass sie einfach, übertragbar und genau genug für die jeweilige Aufgabe, aber nicht überfrachtet sind ➔ 2.

Traditionell wird eine elektrische Maschine in einem Antriebsstrang auf der Grundlage der Steifigkeits- und Trägheitseigenschaften des Rotors modelliert. Diese Art von

> Als Antwort auf die Herausforderungen hat ABB einfache, übertragbare Modelle entwickelt, die die elektromagnetischen Wechselwirkungen genau beschreiben.

Titelbild
Die Ergänzung mechanischer Modelle durch elektromagnetisches Simulationswissen kann das Design von rotierenden Maschinen verbessern. Doch wie lassen sich diese beiden unterschiedlichen Modellierungswelten miteinander verbinden?

2 Schematische Darstellung eines Torsionsmodells für einen elektromotorgetriebenen Kolbenkompressor



Der Schlüssel liegt in der Berechnung von elektromagnetischen Feder- (Torsionssteifigkeits-) und Dämpferkoeffizienten.

Rotormodell lässt sich leicht in das Systemmodell einbinden. Die elektromagnetischen Effekte werden dabei normalerweise vernachlässigt, auch wenn sie sich durch elektromagnetische Steifigkeit und Dämpfung auf das Schwingungsverhalten auswirken können. Ein Grund für die Vernachlässigung dieser Effekte ist die Schwierigkeit, die mit der Einbindung der elektromagnetischen Komponente des Motormodells in das Antriebsstrangmodell verbunden ist [2].

Simulation elektromagnetischer Felder

Um das typische Verhalten elektromagnetischer Rotor- und Statorfelder zu berücksichtigen, werden häufig zweidimensionale numerische Modelle verwendet, die das elektromagnetische Verhalten einer elektrischen Maschine beschreiben. Abbildung ➔ 3 zeigt eine Momentaufnahme von typischen Magnetfeldern und Strömen in einem Elektromotor bei laufendem Betrieb. Die Magnetflussdichte und die Flusslinien sind im oberen linken Teil des Bildes dargestellt. Die Magnetfeldlinien verlaufen in der Bildebene; die elektrischen Ströme in den Rotor- und Statorwicklungen fließen senkrecht dazu. Das elektromagnetische Feld rotiert um die Wellenmitte. Der Rotor folgt dem Drehfeld synchron bzw. eilt diesem leicht nach. Typischerweise müssen elektromagnetische Felder – auch im stationären Betrieb – im Zeitbereich simuliert werden. Die maximale Länge des Simulationszeitschritts wird durch die erforderliche Genauigkeit bestimmt, liegt aber für gewöhnlich bei einigen Dutzend oder Hundert Millisekunden.

Die Simulation wird dadurch erschwert, dass sich die Geometrie des Luftspalts zwischen Rotor und Stator durch die Drehung der Maschine verändert. (Die Nichtlinearitäten, die durch die magnetische Sättigung der Stahlteile ins Spiel kommen, komplizieren die Sache zusätzlich.) Da die Hauptaufgabe von elektrischen Maschinen – die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Leistung – im Luftspalt erfolgt, ist eine sorgfältige mathematische Analyse des elektromagnetischen Feldverhaltens im Spalt für eine genaue Berechnung des mechanischen Drehmoments von entscheidender Bedeutung.

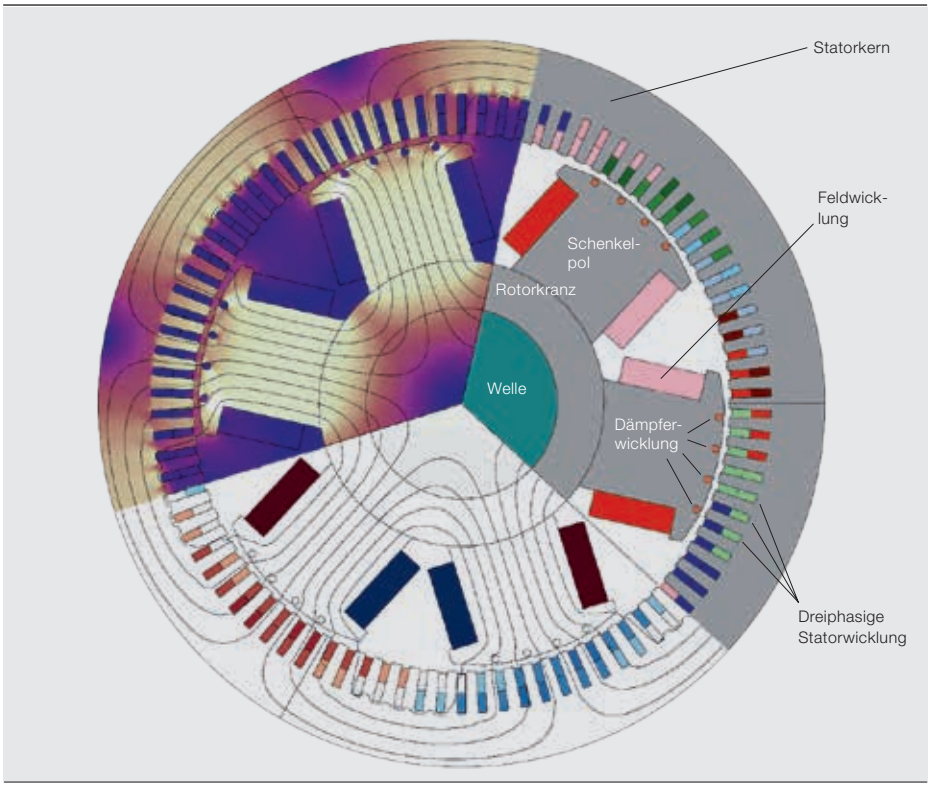
Kopplung von Elektromagnetik und Mechanik

Eine Möglichkeit zur Simulation eines Torsionssystems besteht darin, das mechanische Antriebsstrangmodell mit dem elektrischen Motormodell zu koppeln. In diesem Fall verwendet das elektrische Motormodell eine veränderliche Rotordrehzahl, die vom Motordrehmoment, dem Gegenmoment und den Bewegungsgleichungen bestimmt wird. Eine solche Simulation ist relativ unkompliziert, solange das mechanische Rotormodell des Antriebsstrangs einfach ist und wohlbekannte Elemente verwendet. Diese Art von Modell ermöglicht die Simulation verschiedener Betriebszustände wie die mechanische Reaktion auf Torsionsanregungen durch die angetriebene Maschine, das Getriebe, den Elektromotor oder das Versorgungsnetz. Außerdem können transiente Ereignisse wie Kurzschlüsse oder ein Systemstart analysiert werden.

Dieser Ansatz stellt eine hervorragende Möglichkeit dar, die elektromechanischen Auswirkungen auf die Torsionsdynamik zu evaluieren, und wurde von ABB in einigen besonderen Fällen erfolgreich eingesetzt. Allerdings ist diese Art der Simulation und Analyse zu rechenaufwändig, um sie beim standardmäßigen Design von Antriebssträngen einzusetzen. Außerdem verfügen

Es zeichnet sich ein Konsens in Richtung einfacher Modelle ab, die elektromagnetische Effekte genau beschreiben, auch wenn die genaue Form dieser Modelle noch offen ist.

3 Querschnitt durch einen sechspoligen Hochleistungs-Synchronmotor



die Systemintegratoren bzw. ihre Berater normalerweise nicht über geeignete Simulationswerkzeuge.

Elektromagnetische Steifigkeits- und -dämpfungsmodelle

Als Antwort auf die Herausforderungen bei der Simulation von Antriebssträngen hat ABB einfache, übertragbare Modelle entwickelt, die die elektromagnetischen Wechselwirkungen genau beschreiben [3]. Der Schlüssel zu diesen Modellen liegt in der Berechnung von elektromagnetischen Feder- (Torsionssteifigkeits-) und Dämpferkoeffizienten → 4. Beide Koeffizienten sind frequenzabhängig und können ohne ein mechanisches Antriebsstrangmodell durch Simulation des Motors im stationären Betriebszustand bestimmt werden. Die Torsionssteifigkeit ist das Verhältnis zwischen den Amplituden des oszillierenden Drehmoments und der Winkelverschiebung. Die Dämpfung entspricht dem Verhältnis zwischen den Drehmoment- und Geschwindigkeitsamplituden.

Im Prinzip können diese Steifigkeits- und Dämpfungsverhältnisse für eine Frequenz berechnet werden, indem man den Rotor dazu zwingt, mit dieser Frequenz zu oszillieren und die Oszillation des Drehmoments bei der gleichen Frequenz berechnet. In der Praxis wird dies kompliziert, da die Rotor- und Statornuten Drehmomentoberschwingungen verursachen, die mit der untersuchten Frequenz übereinstimmen können. Diese Überschneidung lässt sich beseitigen, indem man eine Referenzanalyse mit genau den gleichen Parametern, aber ohne die Rotoroszillation berechnet und diese dann von der ursprünglichen Analyse „subtrahiert“. Der einzige Nachteil dieses Verfahrens ist der große Rechenaufwand, der dazu erforderlich ist. So sind zwei Zeitbereichssimulationen mit Nachverarbeitung notwendig, um die Koeffizienten für nur eine Frequenz bei einem bestimmten Betriebszustand zu ermitteln.

Eine effektivere Lösung ist die Verwendung einer auf Impulsanregung basierenden Spektralmethode. Hierbei wird der Rotor durch einen erzwungenen Drehimpuls angeregt, und die Drehmomentantwort wird simuliert. Nach Berechnung der Differenz zwischen den Ergebnissen dieser Simulation und der Referenzlösung können die elektromagnetischen Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten für einen Frequenzbereich bestimmt werden. Dieser hängt von den Impulsparametern ab, deckt aber problemlos den für das Design von Antriebssträngen interessanten Frequenzbereich ab. Erstaunlicherweise kann diese Impulsmethode für ein nichtlineares und zeitharmonisches System verwendet werden. Zahlreiche Simulationen zeigen, dass das System im Hinblick auf die Anregungsamplitude scheinbar linear ist und die berechneten Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten somit das Verhalten bei beliebigen Torsionsschwingungen beschreiben.

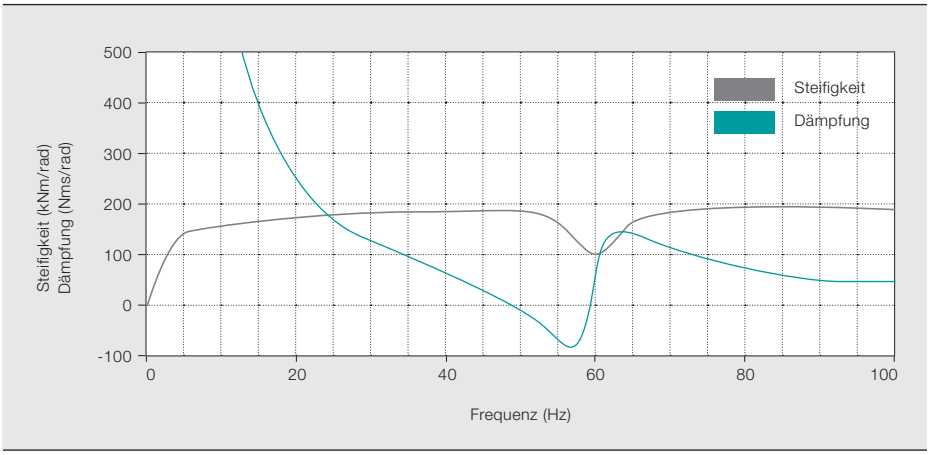
Auf diese Weise kann die ehemals zur Bestimmung der Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten erforderliche große Zahl von Simulationen auf nur zwei reduziert werden.

Die so ermittelten elektromagnetischen Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten können dann in die Torsionsanalyse des Antriebsstrangs eingebunden werden. Die Einbindung kann durch die Frequenzabhängigkeit dieser Parameter etwas kompliziert werden, doch grundsätzlich sind alle Analyseprogramme in der Lage, Abhängigkeiten dieser Art zu bewältigen. Was mehr zu bedenken gibt, ist die Tatsache, dass die Koeffizienten nur für einen Betriebszustand berechnet werden.

Ersatzschaltungsmodell

Eine flexiblere, aber etwas weniger genaue Lösung bietet die Anwendung eines Ersatzschaltungsmodells, das die elektromagnetischen Effekte behandelt. Bei ABB

4 Elektromagnetische Torsionssteifigkeit und Dämpfung – abhängig von der Schwingungsfrequenz – eines Asynchronmotors mit 60 Hz/932 kW [3]. Negative Dämpfung zwischen 49,7 und 59,4 Hz.



Die zur Bestimmung der Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten erforderliche Zahl von Simulationen kann auf nur zwei reduziert werden.

wird dieser Ansatz seit über 20 Jahren zur Analyse und zum Design von Antriebssträngen genutzt. In den 1990er Jahren wurde dazu eine fortschrittliche, hauseigene Software mit der Bezeichnung Simulation of Machine Transients (SMT) entwickelt, die sich besonders bei Systemen mit großen Synchronmotoren als erfolgreich erwies.

Ein Ersatzschaltungsmodell ist ein analytisches Motormodell, das durch eine begrenzte Anzahl von Parametern (bei den einfachsten Modellen etwa 10) beschreiben wird. Solche Modelle beschreiben das Verhalten einer elektrischen Maschine vom Einspeisepunkt der Versorgungsspannung bis hin zum resultierenden Drehmoment und der Drehzahl der Welle. Sie wurden bereits vor dem Aufkommen von Computern für die elektrische Analyse und das elektrische Design entwickelt, sind aber noch immer nützlich als Bestandteil von Torsionsmodellen für Antriebsstränge. Die Herausforderungen bei ihrer Verwendung liegen in der Kopplung des Ersatzschaltungsmodells an das mechanische Antriebsstrangmodell. Da ersteres keine standardmäßige Komponente eines typischen Torsionsmodells ist, stellt seine Integration ohne Zugang zum Quellcode oder ein detailliertes Verständnis eine Herausforderung dar. Es ist aber durchaus machbar, und diese Art von Motormodell wird häufig in Regelungssystemen für Frequenzumrichter verwendet.

Genauigkeit ist eine weitere typische Herausforderung von Ersatzschaltungsmodellen. Dies liegt daran, dass sie in den Pionierjahren der elektrischen Maschinen entwickelt wurden, als Modellparameter auf den tatsächlichen Abmessungen wichtiger Bauteile und experimentellen Ergebnissen basierten. Heute können Modellparameter mithilfe von Simulationsmodellen bestimmt werden. Dieser Ansatz verbindet die Genauigkeit der Simulation mit der Einfachheit und Übertragbarkeit der Ersatzschaltungsmodelle.

Fazit

Heutige Simulationsmodelle für elektromagnetische Felder liefern genaue Informationen mit geringem Aufwand, doch elektromagnetische Effekte werden nur gelegentlich in das Design von Antriebsstrangsystemen eingebunden. Der Hauptgrund hierfür liegt wahrscheinlich in der Schwierigkeit, die mit der Einbindung der Effekte in ein standardmäßiges Berechnungsprogramm verbunden ist, das Systemintegratoren zur Verfügung gestellt werden kann.

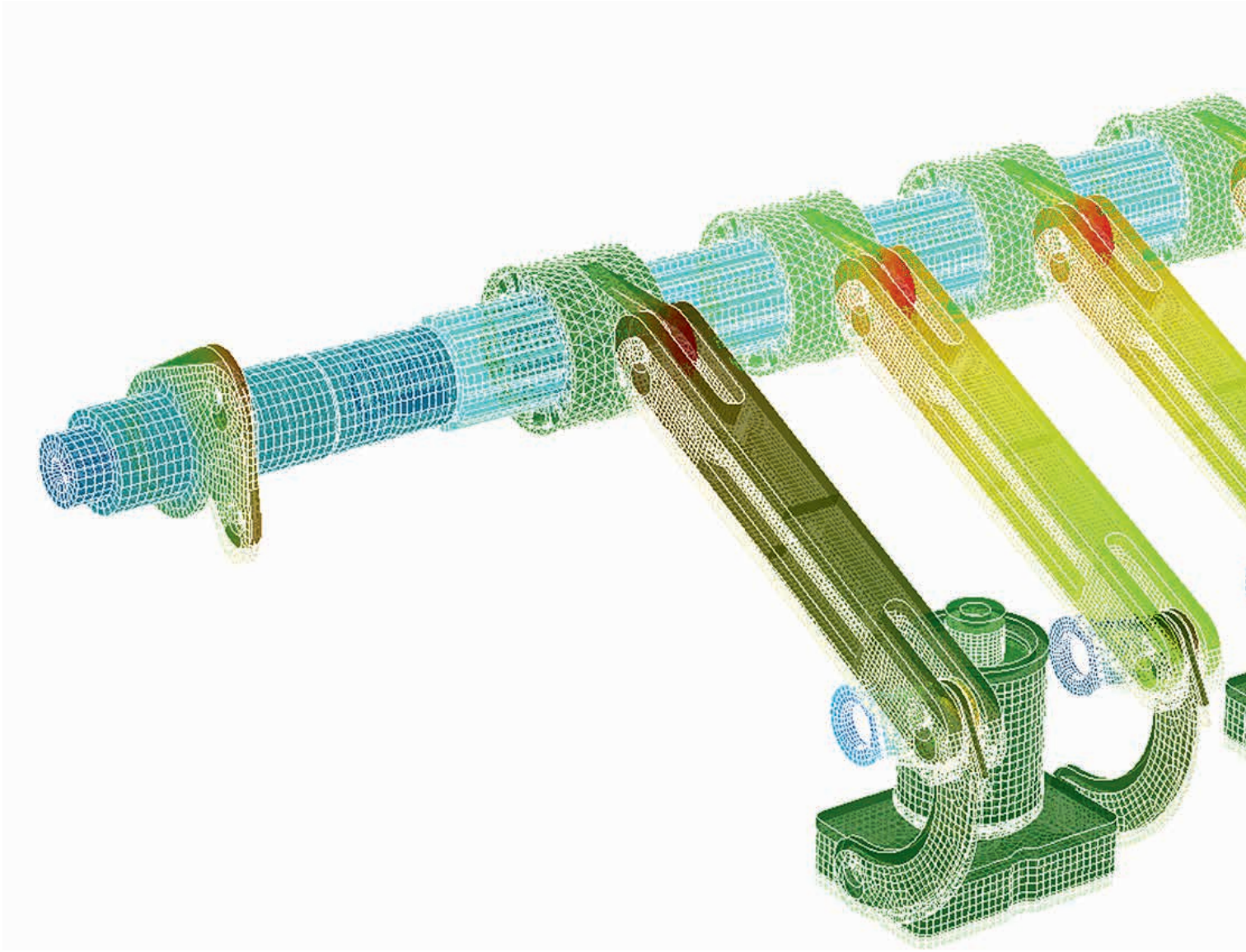
Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die mechanischen und elektrischen Teile der Torsionsmodelle für einen Antriebsstrang zu kombinieren, doch es zeichnet sich ein Konsens in Richtung allgemeiner und einfacher Modelle ab, die elektromagnetische Effekte in Antriebssträngen genau beschreiben, auch wenn die genaue Form dieser Modelle noch offen ist. ABB arbeitet weiterhin eng mit Kunden und Herstellern von rotierenden Maschinen an der Verfeinerung dieser Modelle. Diese Entwicklungsarbeit wird die Einbindung elektromagnetischer Effekte in die Analyse von Antriebssträngen erleichtern und zu neuen, verbesserten Antriebsstrangprodukten führen.

Timo P. Holopainen
Tommi Ryyppö
ABB Motors and Generators
Helsinki, Finnland
timo.holopainen@fi.abb.com
tommi.ryyppo@fi.abb.com

Gunnar Porsby
ABB Motors and Generators
Vasterås, Schweden
gunnar.lf.porsby@se.abb.com

Literaturhinweise

[1] API 684: „API Standard Paragraphs – Rotordynamic Tutorial: Lateral Critical Speeds, Unbalance Response, Stability, Train Torsionals and Rotor Balancing“. 2nd edition. American Petroleum Institute. Washington, D.C. 2005
[2] Holopainen, T. P. et al. (2013): „Electric motors and drives in torsional vibration analysis and design“. Proceedings of the Forty-Second Turbomachinery Symposium. Houston, TX, USA. Zu veröffentlichen unter http://turbolab.tamu.edu/proc/
[3] Holopainen, T. P. et al.: „Electromechanical interaction in torsional vibrations of drive train systems including an electrical machine“. Proceedings of the 8th International Conference on Rotor Dynamics. Seoul, Korea, 12.–15. September 2010



Modelle mit Mehrwert

Modularisierte Simulationskonzepte zur Analyse und Optimierung von Leistungsschaltern

GRZEGORZ JUSZKIEWICZ, CHRISTIAN SIMONIDIS, GREGOR STENGEL, LUKASZ ZIOMKA, SAMI KOTILAINEN – Computergestützte Simulationswerkzeuge werden seit Langem in der Produktentwicklung eingesetzt. Doch Ingenieure sehen sich zunehmend mit Situationen konfrontiert, in denen Simulationen aus verschiedenen physikalischen Disziplinen miteinander kombiniert werden müssen. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Entwicklung von Mittelspannungs- und Hochspannungs-Leistungsschaltern: In den Konstruktions- und Testphasen gilt es, mechanische, strömungstechnische, tribologische, hydraulische und elektromagnetische Effekte zu berücksichtigen, die idealerweise in Wechselwirkung miteinander simuliert werden sollten. Darüber hinaus ist auch das Zusammenspiel mit der Steuer- und Regelungselektronik von Bedeutung.

Früher verfügte jede Disziplin über eigens entwickelte Simulationswerkzeuge einhergehend mit Experten, die zusammenarbeiteten und Simulationsdaten und Wissen über geeignete Schnittstellen austauschten. Doch die Komplexität moderner Leistungsschalterdesigns erfordert die Einbindung der verschiedenen Disziplinen in eine Simulationsstruktur, die eine dynamische Übertragbarkeit, Transparenz und Wiederverwendbarkeit gewährleistet und benutzerfreundliche Modellobjektbibliotheken und Schnittstellen bietet.

Im Postprozess können vordefinierte Feldausgaben angezeigt, Teileinstanzen ein- oder ausgeblendet, Querschnitte erstellt und individuelle Ansichten definiert werden.

In den multinationalen Entwicklungsumgebungen von heute müssen Simulationswerkzeuge organisationsübergreifend von Ingenieuren mit unterschiedlichem Wissensstand genutzt werden. Zudem sollten sie auf möglichst effiziente Weise eingesetzt werden – so, dass optimierte Verfahrensweisen („Best Practices“) einfach umgesetzt und wiederkehrende Modellierungsaufgaben automatisiert werden können. Bei ABB kommen zwei entsprechende Ansätze in der Konstruktion von Leistungsschaltern zum Einsatz.

Titelbild
Um einen schnellen Einblick in das komplexe physikalische Verhalten eines Leistungsschalters zu erhalten, müssen verschiedene Simulationswerkzeuge dazu gebracht werden, in einer strukturierten Anordnung zusammenzuarbeiten, die eine Werkzeugverkettung und den Austausch von Laufzeitvariablen zwischen den Werkzeugen unterstützt. Doch das Zusammenwirken von Werkzeugen, die für ganz unterschiedliche physikalische Phänomene gebaut wurden, ist ein schwieriges Unterfangen. Wie kann dies erreicht werden?

Werkzeuge und Umgebung

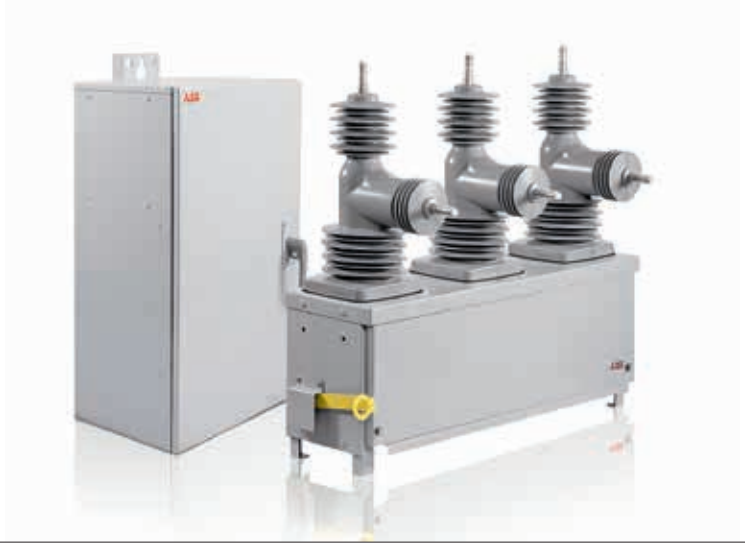
Der erste Ansatz wird vom sogenannten Breaker Simulation Toolkit (BST) unterstützt. Das BST umfasst eine Reihe von benutzerdefinierten Unterroutinen, die in das kommerzielle Mehrkörper-Simulationswerkzeug MSC.ADAMS integriert sind. Die Unterroutinen definieren häufig verwendete Leistungsschalterkomponenten wie Antriebe, Gestängekomponenten, Dämpfer usw. Die BST-Komponenten sind vollständig parametrisch, was die Ausführung verschiedener Designstudien ermöglicht. Zudem sind sie einfach über die grafische Benutzeroberfläche von MSC.ADAMS zugänglich.

Ein etwas anderer Ansatz wird mit den Schaltkammerbibliotheken verfolgt, die in der Dymola-Plattform implementiert sind. Dymola ist eine kommerzielle Modellierungs- und Simulationsumgebung auf der Basis der offenen Modellierungssprache Modelica. Hier wird das gesamte thermodynamische Verhalten der Schaltkammern mithilfe von Standardkomponenten modelliert und in einer zentralen Bibliothek gespeichert. Auf diese Weise sind alle erstellten Entwicklungsvarianten während eines Entwicklungsprojekts verfügbar. Da das endgültige Design nach seiner Freigabe gespeichert wird, kann es bei Bedarf verschiedenen externen Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Externe Nutzer können Varianten nicht verändern, und sensible Informationen sind durch Modellverschlüsslung geschützt. Dieser Ansatz bietet die Vorteile eines schnellen Entwicklungsprozesses und sorgt gleichzeitig dafür, dass allen Benutzern dieselbe Variante des Produkts zur Verfügung steht.

Manchmal ist eine gewisse Flexibilität der Komponenten des zu simulierenden Systems (z. B. ausgewählte Teile einer

Eine Alternative zur Verkettung ist die direkte Kopplung, die eine realistische Abbildung des dynamischen Wechselspiels verschiedener physikalischer Phänomene ermöglicht.

1 Die Elemente des dreiphasigen ABB GridShield Reclosers. Das Schutz- und Steuergerät RER620 (unten rechts) gehört standardmäßig zum Recloser.



Baugruppe) erforderlich. Bei MSC.ADAMS oder Dymola werden Körper durch eine konzentrierte Masse im Schwerpunkt mit vordefinierten Trägheitsmomenten dargestellt, sogenannte starre Körper, die ihre Dimensionen nicht ändern. Simulationen auf der Grundlage von Finite-Elemente-Analysen (FEA) ermöglichen dagegen die Berechnungen von Spannungen, Dehnungen und weiteren Größen für Bauteile, die als Kontinuum dargestellt werden. Wechselwirkungen zwischen Komponenten können durch konzentrierte Verbindungselemente oder mithilfe einer Kontaktbeschreibung formuliert werden.

Bestehen komplexe Wechselwirkungen zwischen Teilen der Baugruppe, spielt die Kontaktmodellierung eine wichtige Rolle. So können mögliche Kollisionen zwischen Komponenten vorhergesagt und beispielsweise maximale Kontaktdrücke evaluiert werden.

ABAQUS ist ein Beispiel für ein kommerzielles FEA-Paket, das diese flexible Modellierung von Mehrkörpersystemen ermöglicht. Da ABAQUS das System in Form finiter Elemente darstellt, ist zusätzlicher Aufwand seitens des Benutzers zur Gittererzeugung, Definition der Beziehungen zwischen Komponenten, Materialzuweisung, Lastcharakterisierung und Einrichtung der Randbedingungen erforderlich. Einige dieser Schritte lassen sich mithilfe der quelloffenen Skriptsprache Python automatisieren. Erweiterte physikalische Merkmale können zudem durch Benutzerunterroutinen definiert werden. Darüber hinaus bietet die FEA eine hybride Methode zur Modellierung von Mehrkörpersystemen, bei der einige Komponenten durch starre und andere durch flexible Körper dargestellt werden. Dies kann die Berechnungszeiten gegenüber einer Modellierung mit ausschließlich flexiblen Körpern deutlich verkürzen.

Die für komplexe Simulationen erforderlichen Werkzeuge und die Umgebung stehen also zur Verfügung. Es bleibt die Aufgabe, diese so zu organisieren, dass Werkzeuge aus gänzlich verschiedenen physikalischen Disziplinen reibungslos zusammenarbeiten, um die bestmöglichen Simulationsergebnisse zu liefern.

Werkzeugverkettung und Modellkopplung

Bei der Produktentwicklung kann die Ausgabe einer Simulation häufig als Eingabe für eine andere Simulation verwendet werden. Dies wird als Werkzeugverkettung bezeichnet. So können bei Simulationen von Mechanismen die Ergebnisse von Starrkörperberechnungen (z. B. von MSC. ADAMS) zur genaueren Prüfung bestimmter Details in ein FEA-Paket (z. B. ABAQUS) übertragen werden. Ein weiteres Beispiel ist die Nutzung der Ergebnisse einer thermischen Simulation als Ausgangsdaten für eine vollständige strömungsdynamische Simulation.

Eine Alternative zur Verkettung ist die direkte Kopplung, die die Forderung nach einer realistischen Abbildung des dynamischen Wechselspiels verschiedener physikalischer Phänomene erfüllt. Hier sind zwei Verfahren vorherrschend:

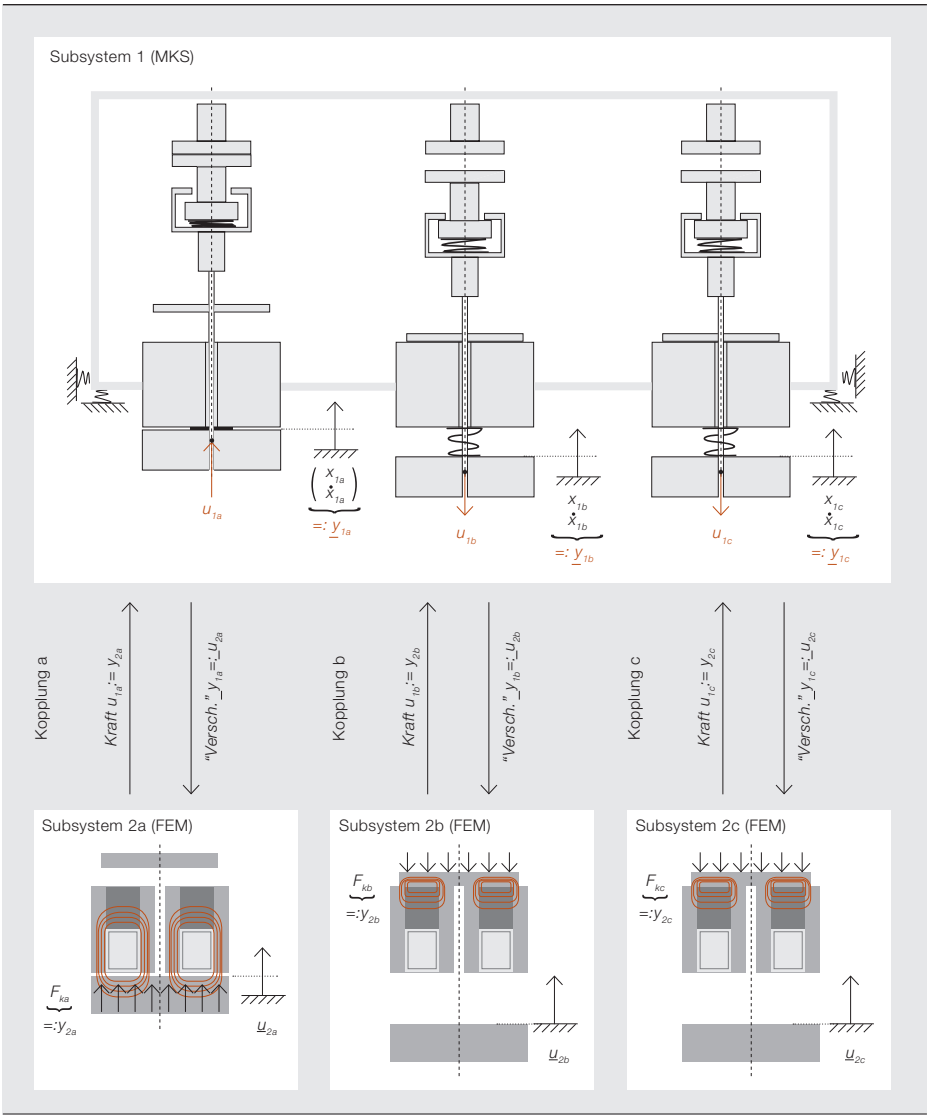
Beim ersten Verfahren sind die physikalischen Gesamtgleichungen in einem einzigen geeigneten Multiphysik-Softwaretool implementiert, das realistische Modelle nichtlinearer externer Variablen statt Vereinfachungen wie Umsetzungstabellen (Lookup-Tabellen) nutzt.

Beim zweiten, monodisziplinären Verfahren werden Submodelle in dedizierten Tools erstellt und im mathematischen Sinn miteinander gekoppelt. Die domänenbezogenen Gleichungen der Submodelle werden jeweils von ihrem eigenen Zeitintegrator gelöst, wobei Informationen zum Zustand beider Systeme zu bestimmten synchronisierten Zeiten ausgetauscht werden. Diese sogenannte Co-Simulation ermöglicht die Berechnung komplexer physikalischer Wechselwirkungen, erleichtert die Wiederverwendung von Submodellen und unterstützt die effiziente Konzentration von Expertenwissen in bestimmten physikalischen Disziplinen.

Kopplungsumgebung

ABB hat eine Simulationsumgebung entwickelt, die sowohl eigene als auch kommerziell erhältliche Kopplungsroutinen nutzt, um Co-Simulationen zwischen den Disziplinen Mehrkörpermechanik, Strukturmechanik, Strömungsdynamik und Transienten-Elektromagnetik zu ermöglichen. Beispielsweise ist die Analyse der Wechselwirkungen zwischen magnetischen Diffusionseffekten und der Dynamik von Mechanismen eine spezielle – und wichtige – Problemstellung, für die Werkzeuge nur in wenigen aktuellen Multi-Physik-Produkten zur Verfügung stehen. Um

2 ABB GridShield Recloser – Simulationsszenario



Bei der Produktentwicklung kann die Ausgabe einer Simulation häufig als Eingabe für eine andere Simulation verwendet werden. Dies wird als Werkzeugverkettung bezeichnet.

dies zu kompensieren, hat ABB in Zusammenarbeit mit verschiedenen Hochschulen eine entsprechende Umgebung entwickelt, die die Kopplung von COMSOL (ein auf gekoppelte Phänomene zugeschnittenes FEA-Paket) mit MSC.ADAMS ermöglicht.

Co-Simulation und Leistungsschalterdesign

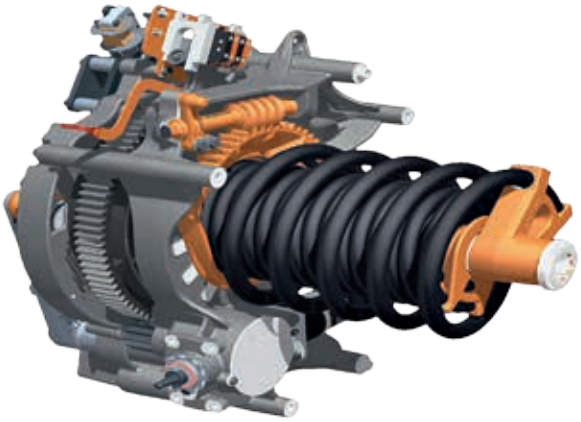
Ein neueres spulenbetätigtes Produkt, der ABB GridShield® Recloser, wurde mithilfe der Co-Simulation simuliert ➔ 1. Im Simulationsszenario wurden drei Spulen-Subsysteme mit einem mechanischen Modell gekoppelt ➔ 2. Aus der Evaluierung der Stromdichte- und Lorentzkraftdichteverteilung resultiert eine zeitvariante konzentrierte Kraft, die auf das mechanische System einwirkt und eine Bewegung des Mechanismus sowie Spannungen und Verformungen der Bauteile erzeugt. Die Bewegung beeinflusst wiederum das elektromagnetische System.

Lorentzkräfte, Leistungsverluste und Stromdichten lassen sich auch mithilfe der Simulation Toolbox, einer weiteren ABB-internen Software, berechnen. Für die anschließende Berechnung der Spannungen und Verschiebungen gibt es zwei Werkzeuge, die verwendet werden können: der in die Toolbox integrierte mechanische Löser oder ABAQUS. Letzteres ermöglicht eine maßgeschneiderte Simulation, d. h. es können weitere Feldausgaben hinzugefügt, nichtlineare Werkstoffeigenschaften definiert und eine Modalanalyse zur Überprüfung von Eigenmoden und -frequenzen durchgeführt werden. Die Simulation Toolbox verwendet PTC Creo Simulate als Prä- und Postprozessor. PTC Creo Simulate ermöglicht die Erstellung virtueller 3-D-Prototypen zur Prüfung der strukturellen und thermischen Eigenschaften eines Designs in einer frühen Phase des Konstruktionsprozesses. Im Postprozess können u. a. alle vordefinierten Feldausgaben angezeigt, Instanzen eines Teils ein- oder ausgeblendet, Querschnitte erstellt und individuelle Ansichten definiert werden.

Beispiel Leistungsschalterantrieb

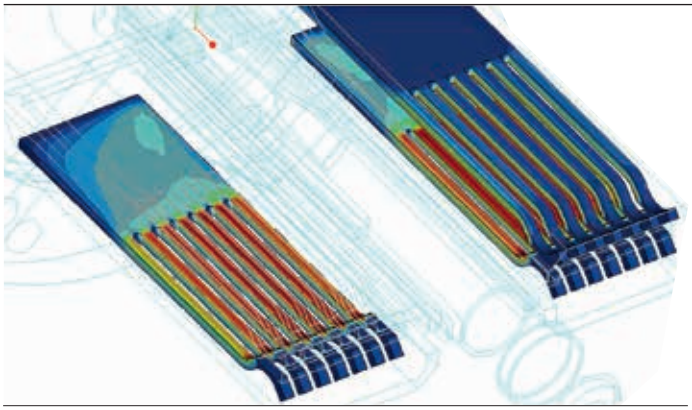
Der MSD1-Antrieb wird an einem Hochspannungs-Leistungsschalter montiert und ist verantwortlich für das Öffnen und Schließen des Schaltkontakts ➔ 3. Die zum Öffnen und Schließen erforderliche Energie wird in drei Federn gespeichert. Zwei der Federn werden zum Schließen und eine (die äußere) zum Öffnen des Kontakts verwendet. Beim Auslösen versetzt die in den Federn gespeicherte Energie die Hauptwelle des Antriebs in Drehung, die wiederum den Kontaktmechanismus innerhalb des Leistungsschalters betätigt.

3 ABB-Antrieb vom Typ MSD1

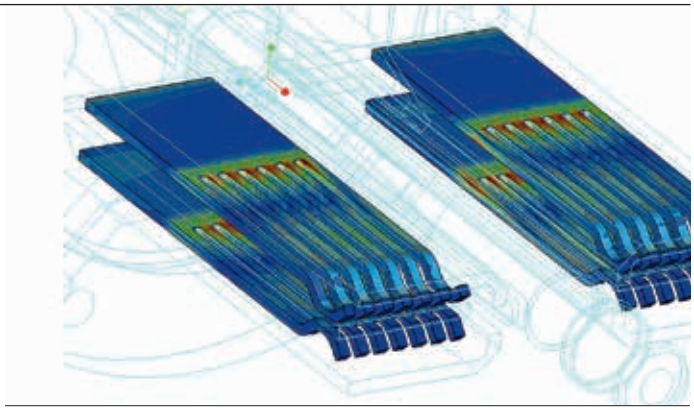


4 MSD1-Antrieb – Darstellung des Verschiebungsfelds

5 Kontaktfinger – Darstellung der Lorentzkraft und des Spannungsfelds



5a Lorentzkraftdichte



5b Spannungsfeldverteilung

Der Antrieb (bzw. seine Komponenten) wurde mithilfe verschiedener Simulationswerkzeuge (viz., MSC.ADAMS, Dymola, ABAQUS) modelliert. Im Anschluss daran wurden die Werkzeuge miteinander in Serie gekoppelt. Die ABAQUS-Ausgabe für ein auf diese Weise berechnetes Verschiebungsfeld ist in → 4 dargestellt.

Beispiel Kontaktfinger

Ein weiteres Beispiel für eine Co-Simulation ist die elektromechanische Simulation der Leistungsschalterkomponenten. Die Basis dieser Berechnung ist wiederum die Evaluierung der Strom- und Lorentzkraftdichten, die eine auf das mechanische System wirkende Kraft erzeugen. Diese wurde in ein Finite-Elemente-Strukturprogramm übertragen, sodass die Spannungen und Verschiebungen berechnet werden konnten. Ein Beispiel einer Stromdichte- und Spannungsfeldverteilung ist in → 5 dargestellt.

Zukünftiges Framework

Moderne Simulationswerkzeuge bieten eine breite Palette leistungsstarker Methoden zur Lösung der komplexen Probleme, die bei der Entwicklung fortschrittlicher Produkte auftreten können. Werkzeuge, die verschiedene physikalische Systeme simulieren, können mithilfe extern und intern entwickelter Software und Plug-ins gekoppelt und verkettet werden. Diese synergetische Methodik nutzt die Stärken der einzelnen Tools und stellt Simulationsverfahren zur Verfügung, die viel mehr bewirken als die Summe ihrer Einzelteile. Vor allem aber liefert dieser modulare Simulationsansatz genaue und nützliche Ergebnisse innerhalb einer angemessenen Berechnungszeit. Es wird kontinuierlich daran gearbeitet, das Zusammenwachsen dieser Simulationswerkzeuge zu verbessern und deren Integration in ein kohärentes Rahmenkonzept (Framework) voranzutreiben.

Dies wird die Implementierung der Werkzeuge weiter erleichtern, und Ingenieure mit unterschiedlichem Wissensstand in verschiedenen Organisationen werden in der Lage sein, diese Synergie zur Entwicklung noch besserer Produkte zu nutzen.

Grzegorz Juszkiewicz
Lukasz Ziomka
ABB Corporate Research
Krakau, Polen
grzegorz.juszkiewicz@pl.abb.com
lukasz.ziomka@pl.abb.com

Christian Simonidis
Gregor Stengel
ABB Corporate Research
Ladenburg, Deutschland
christian.simonidis@de.abb.com
gregor.stengel@de.abb.com

Sami Kotilainen
ABB High Voltage Products
Baden, Schweiz
sami.kotilainen@ch.abb.com

Clevere Steckdosen für Smartphones

SCHUKO®-Steckdosen mit integriertem USB-Anschluss

SASCHA DEHLEN – Die USB-Schnittstelle hat sich in kurzer Zeit zu einem äußerst beliebten weltweiten Standard entwickelt, der von vielen kommerziellen Unternehmen und staatlichen Organisationen unterstützt wird. Der praktische Anschluss ist so verbreitet, dass mittlerweile in jedem typischen Haushalt mehrere Geräte zu finden sind, die ihn zur Datenübertragung und zum Aufladen nutzen: Telefone, Smartphones, Tablets, MP3-Player, Digitalkameras und Navigationssysteme unterstützen alle diesen universellen Anschluss. Doch wenn es an der Zeit ist, diese Geräte aufzuladen, stellt sich immer wieder die Frage: Wo ist das Ladegerät? Und hat man es gefunden, stellt sich die nächste Frage: Welches Haushaltsgerät soll ich ausstöpseln, um eine Steckdose für das Ladegerät frei zu machen? All dies ist kein Problem mit den SCHUKO-Steckdosen mit integriertem USB-Anschluss von Busch-Jaeger.

1 Die Busch-Jaeger SCHUKO USB-Steckdose

2 Das Busch-Jaeger USB-Netzteil

In vielen Ländern ist die SCHUKO-Steckdose ein beruhigendes und stabiles Stück Technik, das seit Jahrzehnten unverändert geblieben ist, während sich die Technik, die sie speist, mit rasanter Geschwindigkeit weiterentwickelt hat. Sie schien ein typisches Beispiel für ein ausgereiftes Produkt zu sein, das für immer von Neuerungen unbeeinflusst bleiben wird. Doch nun hat Busch-Jaeger im wahrsten Sinne des Wortes das Gesicht der Steckdose verändert und sie mit dem beliebtesten Anschluss der letzten Jahrzehnte kombiniert – dem Universal Serial Bus (USB) ➔ 1.

Busch-Jaeger hat das Gesicht der Steckdose verändert und sie mit dem beliebtesten Anschluss der letzten Jahrzehnte kombiniert – dem USB.

Dank der preisgekrönten Innovation müssen keine Netzteile und USB-Kabel mehr gesucht und eingesteckt werden – der USB-Ladepunkt ist immer da. So können mobile Geräte bequem aufgeladen werden, ohne dass bereits eingesteckte Haushaltsgeräte ausgestöpselt werden müssen. Die SCHUKO USB-Steckdosen liefern einen Ladestrom von bis zu 700 mA und verfügen über einen integrierten erhöhten Berührungsschutz. Da sie die gleiche Form und Größe besitzen wie vorhandene SCHUKO-Steckdosen, lassen sie sich problemlos nachrüsten.

Zwei weitere Innovationen

Passend zur SCHUKO USB-Steckdose hat das Unternehmen zwei weitere USB-Ladeprodukte entwickelt: ein USB-Netzteil und eine USB-Ladestation. Auch diese sind für die Unterputzmontage vorgesehen.

Das Busch-Jaeger USB-Netzteil bietet zwei USB-Anschlüsse zum Aufladen mobiler Geräte ➔ 2. Es nutzt die gleiche Standardabdeckung wie TAE-Telefondosen, und Kunden können sich entsprechend den Anforderungen des zu ladenden Geräts (Tablets benötigen z. B. häufig mehr Leistung) zwischen zwei Anschlüssen mit 700 mA oder einem Anschluss mit 1.400 mA entscheiden.

Titelbild
Innovation ist am dramatischsten, wenn sie Dinge betrifft, die seit Jahrzehnten unverändert geblieben sind. Eine einfache Steckdose mit einer USB-Lademöglichkeit zu versehen, ist ein gutes Beispiel.

3 Die Busch-Jaeger USB-Ladestation

Die Busch-Jaeger USB-Ladestation bietet die Möglichkeit zum Aufladen über ein flexibles Kabel mit Micro-USB-Anschluss und einem maximalen Ladestrom von 1.400 mA. Die Micro-USB-Schnittstelle wurde gewählt, weil es weltweit der am weitesten verbreitete Anschlussstandard ist und auch den EU-Standards entspricht. Die Ladestation verfügt außerdem über einen bequemen Halter für das zu ladende Smartphone → 3. Eine Anti-Rutsch-Beschichtung sorgt auch bei aktiviertem Vibrationsalarm für einen sicheren Halt.

Auszeichnungen

Die Busch-Jaeger SCHUKO USB-Steckdose wurde mit mehreren internationalen Preisen ausgezeichnet, darunter der Innovationspreis 2013 des niederländischen Elektrogroßhändlers Rexel und der renommierte ETOP Innovation Award, der vom Messeveranstalter VNU Exhibitions Europe und dem niederländischen Elektrotechnikverband „Federatie Elektrotechniek“ auf der Messe Elektrotechniek 2013 in Utrecht verliehen wurde.

4 IFA-Publikumspreis

Die Busch-Jaeger SCHUKO USB-Steckdose wurde im September 2013 auf der IFA mit dem Usability Park Publikumspreis ausgezeichnet.

Außerdem erhielt die SCHUKO USB-Steckdose im September 2013 auf der IFA in Berlin den Publikumspreis der Design-Sonderschau Usability Park → 4. Ziel dieses Preises ist es, sowohl bei Nutzerinnen und Nutzern als auch bei Herstellern die Aufmerksamkeit für Design und Usability zu schärfen.

Ganz ungewöhnlich für ein Produkt von ABB oder Busch-Jaeger wurde die SCHUKO USB-Steckdose kürzlich zur besten Sendezeit in einem eigenen Werbespot im deutschen Fernsehen gezeigt, was die breite Wirkung des Produkts unterstreicht.

Der USB-Anschluss selbst ist nicht nur allgegenwärtig, sondern wird auch weiterentwickelt. So ist eine Version geplant, die in beliebiger Ausrichtung eingesteckt werden kann. Außerdem soll eine USB-Schnittstelle der nächsten Generation 100 W liefern können und somit Netzkabel in einigen Anwendungen ersetzen. All dies bedeutet, dass sich die USB-Konnektivität im Haushalt weiter verbreiten wird und die Integration von USB-Technologie in Haushaltsgeräte und in die häusliche Infrastruktur nicht nur eine Frage des Komforts, sondern der Notwendigkeit sein wird. Die SCHUKO USB-Steckdose ist der erste Schritt in diese Richtung.

Da sie die gleiche Form und Größe besitzen wie vorhandene SCHUKO-Steckdosen, lassen sie sich problemlos nachrüsten.

Sascha Dehlen
Busch-Jaeger Elektro GmbH,
ein Unternehmen der ABB-Gruppe
Lüdenscheid, Deutschland
sascha.dehlen@de.abb.com

Leistungs-träger

Der ABB PCS100 RPC – mehr als nur ein Blindleistungskompensator

SOPHIE BENSON-WARNER – Einigen Herstellern bereiten Stromausfälle oder Probleme mit der Netzqualität Kopfschmerzen. Für andere wiederum kann dies katastrophale Folgen haben, die mit hohen Wiederherstellungskosten und teuren Produktionsausfällen verbunden sind. Der Reactive Power Conditioner von ABB ist darauf ausgelegt, die häufigsten Versorgungsspannungsprobleme zu bekämpfen, die durch Blindleistung, Oberschwingungen, schnelle Laständerungen, Spannungsabfälle, einen schlechten Leistungsfaktor usw. verursacht werden. In Verbindung mit einer geeigneten unterbrechungsfreien Stromversorgung stellt der Reactive Power Conditioner eine umfassende Netzqualitätslösung für industrielle, kommerzielle und erneuerbare Energieanwendungen dar.

Titelbild
Probleme mit der Stromversorgungsqualität sollten möglichst verhindert werden. Der ABB PCS100 Reactive Power Conditioner hilft dabei, die Versorgung kritischer Verbraucher wie dieser Pumpstation mit hochwertigem Strom sicherzustellen.

1 Ein Großteil der Infrastruktur von Industrie und Gesellschaft ist abhängig von einer konstanten, sauberen und hochwertigen Stromversorgung.

In Privathaushalten kann es ärgerlich sein, wenn weit entfernte Netzereignisse das Licht flackern lassen oder dafür sorgen, dass sich Geräte vorübergehend abschalten. Für die Industrie können die Auswirkungen erheblich dramatischer sein: Steht eine Produktionslinie still, muss sie wieder angefahren werden, was in manchen Branchen ein kompliziertes und äußerst kostspieliges Unterfangen sein kann. Auch Versorgungsunternehmen wie Gas-, Wasser- und Stromversorger sind stark abhängig von einer stabilen Stromversorgung. Gleiches gilt für Einrichtungen wie Bürokomplexe, Transportsysteme (Züge, Flughäfen usw.) und Häfen → 1. In der Industrie können Ereignisse, die die Versorgungsqualität beeinträchtigen, selbstverursacht sein – z. B. durch Schweißgeräte, Lichtbogenöfen oder schnelle Überspannungen durch integrierte Erzeugungsquellen wie Photovoltaikanlagen. In diesen Fällen lohnt sich die Investition in eine entsprechende Ausrüstung, um eine konstante Versorgung mit sauberem, hochwertigem Strom zu gewährleisten. Der ABB PCS100 Reactive Power Conditioner (RPC) wirkt den gängigsten Netzqualitätsproblemen entgegen, die in der Industrie auftreten.

Leistungsschutz

Der PCS100 RPC ist das neueste Produkt im umfangreichen Angebot von ABB-Leistungsschutzprodukten → 2. Er wurde speziell für industrielle und kommerzielle Anwendungen konzipiert und ist in der Lage, augenblicklich auf Netzqualitätsereignisse zu reagieren, während er gleichzeitig für eine kontinuierliche Blindleistungskorrektur sorgt → 3.

> Der PCS100 RPC ist für 100 kVA bis 2.000 kVA ausgelegt und nutzt schnelle IGBT-Wechselrichtertechnologie zur Regelung des Blindleistungsflusses in das Stromnetz.

Netzqualitätsprobleme können sich als Leistungsfaktorprobleme, einschaltbedingte Spannungseinbrüche, Spannungsunsymmetrie bzw. Spannungswerte, die außerhalb der gesetzlichen Bestimmungen liegen (ein besonderes Problem für Motoren mit direktem Netzanschluss) und Oberschwingungen bemerkbar machen. Diese kön-

2 Der ABB PCS100 RPC

Netzqualitäts-probleme können, wenn sie nicht behoben werden, zu empfindlichen Geldstrafen und teuren Fehlfunk-tionen führen.

nen, wenn sie nicht behoben werden, zu empfindlichen Geldstrafen und teuren Fehlfunktionen der elektrischen Ausrüstung führen. Obwohl die Hauptaufgabe des PCS100 RPC darin besteht, den Strom aufzubereiten, indem er Blindstrom zur Stabilisierung der Spannung in den Stromkreis einspeist, kann er eine äußerst kostengünstige Lösung für diese Probleme darstellen. Da der PCS100 RPC den von den Verbrauchern beim Kunden aufgenommenen Strom aufbereitet, passt er hervorragend zu den anderen Produkten der ABB PCS100-Familie wie der unterbrechungsfreien Stromversorgung (UPS) PCS100 UPS-I und dem aktiven Spannungsregler PCS100 Active Voltage Conditioner (AVC), die kritische Verbraucher mit Strom versorgen bzw. die Spannung regeln [1].

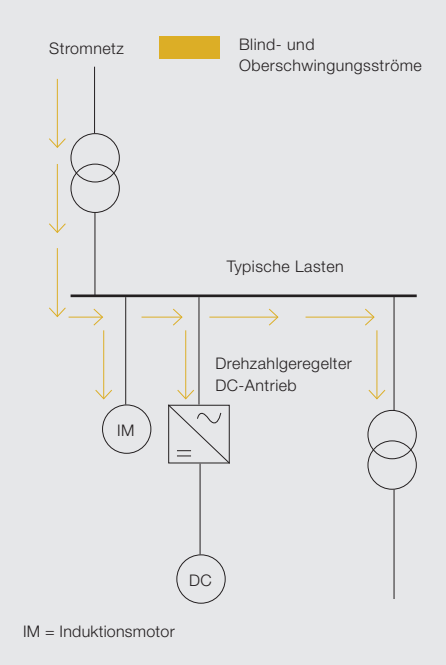
Der PCS100 RPC ist für Anwendungen von 100 kVA bis 2.000 kVA ausgelegt und nutzt schnelle IGBT-Wechselrichtertechnologie (Insulated-Gate Bipolar Transistor), um den Blindleistungsfluss in das Wechselstromnetz zu regeln. Durch Einspeisen von kapazitivem Strom bzw. Blindstrom mit verschiedenen Frequenzen und Phasenwinkeln sorgt der PCS100 RPC effizient und zuverlässig für:

– schnelle und dynamische Blindleistung
– einen Leistungsfaktor von Eins
– Ausgleich von Stromunsymmetrien
– Aufhebung von Oberschwingungen

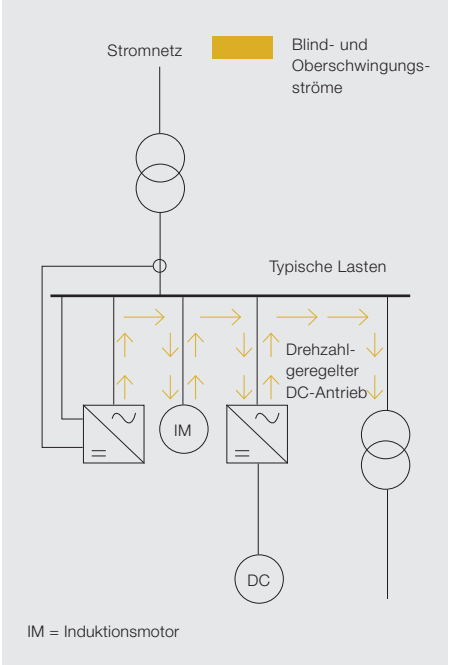
Die verwendete Wechselrichtertechnologie ermöglicht – anders als bei vielen anderen Lösungen – eine stufenlose Kompensation. Dies minimiert Störungen und sichert eine nahtlose Stromaufbereitung.

Das System ist skalierbar und kann problemlos an steigende Leistungsanforderungen angepasst werden.

3 Prinzipschaltbild des ABB PCS100 RPC



3a Ohne PCS100 RPC



3b Mit PCS100 RPC

Modularität

Für den PCS100 RPC steht eine vollständige Palette von Schränken zur Verfügung, die alle für den direkten Anschluss an typische Niederspannungsversorgungen (380 bis 480 kV) geeignet sind ➔ 4. Die Geräte sind für 100 kVAr bis zu mehreren MVAr ausgelegt. In Kombination mit der PCS100 UPS-I und dem PCS100 AVC kann der PCS100 RPC in einer Vielzahl von Anwendungen – von Computerräumen über große Rechenzentren bis hin zum Schutz ganzer Industrieanlagen – eingesetzt werden. Dank des äußerst zuverlässigen, modularen und redundanten Designs ist das System skalierbar und kann problemlos an steigende Leistungsanforderungen angepasst werden. Und wenn eines der Leistungsmodule ausfällt, schaltet das System nicht ab, sondern arbeitet mit reduzierter Leistung weiter. Dank der geringen Granularität erhält der Kunde vollständige Redundanz zu sehr niedrigen Kosten. Ein solches Maß an Zuverlässigkeit zu solch geringen Kosten ist einzigartig in der Branche.

RPC plus UPS

Durch Kombination des ABB PCS100 RPC mit einer ABB PCS100 UPS-I lässt sich ein umfassendes Leistungsschutzpaket schnüren. Ein solches Paket wurde bei einem Kunden zum Schutz einer wichtigen Fertigungslinie für Polyimidfolien installiert.

Die verwendete Wechselrichtertechnologie ermöglicht – anders als bei vielen anderen Lösungen – eine stufenlose Kompensation, was eine nahtlose Stromaufbereitung sichert.

Polyimidwerkstoffe sind leicht, flexibel und beständig gegen Hitze und Chemikalien. Sie werden typischerweise zur Herstellung flexibler Leiterplatten für Telekommunikationsgeräte, drahtlose Aufhängungen für Festplattenlaufwerke und optische Abnehmer verwendet. Der ABB-Kunde ist ein bedeutender Zulieferer der Elektronikindustrie, für den ein Stromausfall im Fertigungsprozess nicht nur zu beträchtlichen Wiederherstellungskosten und Produktionsausfällen führen, sondern auch den Ruf des Unternehmens schädigen würde.

4 Blick in den Schrank des ABB PCS100 RPC

Durch Kombination des PCS100 RPC mit einer PCS100 UPS-I lässt sich ein umfassendes Leistungsschutzpaket schnüren.

Das aus den beiden PCS100-Produkten bestehende Leistungsschutzpaket verhindert Ausfälle, Spannungseinbrüche und -erhöhungen (durch eine PCS100 UPS-I für 1.050 kVA) und erhöht gleichzeitig den Leistungsfaktor der Last auf über 0,90 (durch einen PCS100 RPC für 323 kVAr). Neben der dynamischen Leistungsfaktorregelung filtert der PCS100 RPC Oberschwingungen niedriger Ordnung und trägt damit zur weiteren Verbesserung der Versorgungsqualität bei. Dieses Mehrwertkonzept war ein Schlüsselfaktor aufgrund der entscheidenden Bedeutung, die der Schutz wichtiger Betriebsmittel für eine kontinuierliche Produktion hat.

Bei einem Stromausfall würde die PCS100 UPS-I der schlüsselfertigen Lösung die Last vom Netz trennen und die Fertigungslinie 5 min lang mit voller Leistung versorgen. Gleichzeitig würde der PCS100 RPC den Leistungsfaktor auf über 0,90 regeln. Nach den Erwartungen des Kunden sollte die UPS-I bei einem Stromausfall eine Leistung von 1.000 kVA bereitstellen. Doch die PCS100 UPS-I von ABB geht noch einen Schritt weiter und ist in der Lage, 1.050 kVA bereitzustellen, um die Last bei einem Ausfall zu schützen.

Die PCS100 UPS-I beinhaltet einen schnellen statischen Schalter, d. h. der Übergang in den Stabilisierungsmodus erfolgt sehr schnell. Nach weiteren Prüfungen kam das Unternehmen zum Schluss, dass kein Konkurrenzprodukt dies bieten konnte. Der entscheidende Faktor aber lag in der Effizienz des Systems, denn aufgrund des geringen Wärmeverlusts der PCS100 UPS-I konnte der Kunde erhebliche Kosten für die Klimatisierung einsparen. Der ABB PCS100 RPC selbst hat einen Wirkungsgrad von 99 %. Dank seiner geringen Stellfläche ist er eine gute Lösung für Umgebungen, in denen Platz knapp oder teuer ist.

Die modulare und skalierbare Architektur des ABB PSC100 RPC und seine Kompatibilität mit anderen ABB-Leistungsschutzprodukten sowie seine Fähigkeiten zur Bekämpfung häufiger Netzqualitätsprobleme in der Industrie haben sich bereits in verschiedenen Leistungsschutzanwendungen erfolgreich bewährt. So hilft ein 100-kVAr-RPC z. B. dabei, die Stromversorgungsqualität für die berühmte Standseilbahn in der neuseeländischen Hauptstadt Wellington zu verbessern. Dabei handelt es sich nicht nur um den ersten in Neuseeland installierten PCS100, sondern auch den ersten, der überhaupt im öffentlichen Personenverkehr eingesetzt wird. Außerdem ist es das PCS100-Produkt mit dem geringsten Platzbedarf, das jemals gebaut wurde.

Sophie Benson-Warner
ABB Discrete Automation and Motion
Napier, Neuseeland
sophie.benson-warner@nz.abb.com

Literaturhinweise
[1] Benson-Warner, S.: „Ausfallzeiten verhindern: Sicherung der Stromversorgung bei Netzinstabilitäten". *ABB Technik* 1/2012: 27–29

Im Einklang

Rückblick auf die fruchtbare parallele Entwicklung von Hochleistungsgleichrichtern und Halbleitern

SHRIPAD TAMBE, RAJESH PAI – **Obwohl weltweit der größte Teil der elektrischen Energie in Form von Wechselstrom erzeugt, übertragen und verteilt wird, kommt in vielen Anwendungen Gleichstrom zum Einsatz – z. B. bei der Elektrolyse, der Stahlherstellung, in Traktionsanwendungen oder bei Plasmabrennern. Diese Anwendungen werden auf zuverlässige, wirtschaftliche und effiziente Weise von der Leistungselektronik unterstützt. Da die Entwicklung von Hochleistungsgleichrichtern (High Power Rectifiers, HPR) auf symbiotische Weise mit dem Fortschritt in der Halbleitertechnik verknüpft ist, betrachtet man die Geschichte dieser beiden Bereiche am besten zusammen. Sowohl die HPR- als auch die Halbleitertechnik hat sich bei ABB im Laufe der Jahrzehnte weiterentwickelt, wobei erstaunliche technische Fortschritte erzielt wurden. Heute sind Leistungen von mehreren hundert Megawatt – vor einigen Jahrzehnten noch völlig undenkbar – nichts Ungewöhnliches. In Ausgabe 2/2013 berichtete die *ABB Review* bereits über die 100-jährige Geschichte von ABB auf dem Gebiet der Leistungselektronik mit besonderem Blick auf die Halbleitertechnik und -fertigung. Der vorliegende Artikel wirft nun einen Blick auf die Entwicklung der Leistungselektronik aus Sicht der des HPR-Geschäfts von ABB.**

Titelbild
Hochleistungsgleichrichter spielen seit Jahrzehnten eine wichtige Rolle in der Metallverhüttung. Dieses Bild von 2008 zeigt die Kupferhütte von Boliden in Schweden.

1 Quecksilberdampf-Gleichrichter

2 Kontaktgleichrichter

Die Geschichte der Erfindungen und Innovationen auf dem Gebiet der Halbleiter für Hochleistungs-Gleichrichteranwendungen über die letzten Jahrzehnte von den Ursprüngen der Technologie bis zu den heute erhältlichen Bauelementen ist bemerkenswert. Der dabei erzielte Fortschritt macht sich nicht nur in Zahlen auf Datenblättern in Megawatt oder Kiloampere bemerkbar, sondern auch in der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Systeme selbst unter extremen Betriebs- oder Umgebungsbedingungen.

Das Hauptziel der Gleichrichtersparte von BBC/ABB ist seit jeher die Herstellung sicherer und effizienter Gleichrichtersysteme, wobei stets die Sicherheit der Ausrüstung, vor allem aber die Sicherheit der Menschen, die damit arbeiten, im Vordergrund stand.

Ursprünge der Leistungselektronik

Obwohl die Entwicklungen in der Leistungselektronik in den letzten vier Jahrzehnten symbiotisch mit dem Fortschritt auf dem Gebiet der Leistungshalbleiter verknüpft waren, haben sich die Vorgängerunternehmen von ABB bereits mit der Umformung elektrischer Ströme beschäftigt, als die Halbleitertechnik noch lange nicht kommerziell nutzbar geschweige denn erforscht war[1].

Quecksilberdampf-Gleichrichter

Die ersten Gleichrichter (vor rund 100 Jahren) basierten auf Quecksilberdampfventilen und nutzten die Fähigkeit von Quecksilberdampf, eine der beiden Polaritäten des Wechselstroms zu sperren ➔ 1.

Kontaktgleichrichter

Die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom wurde mithilfe von Kontaktgleichrichtern erreicht. Diese Technik war für Stromstärken von bis zu mehreren Kiloampere geeignet ➔ 2.

Einführung von Halbleitern in Gleichrichtern

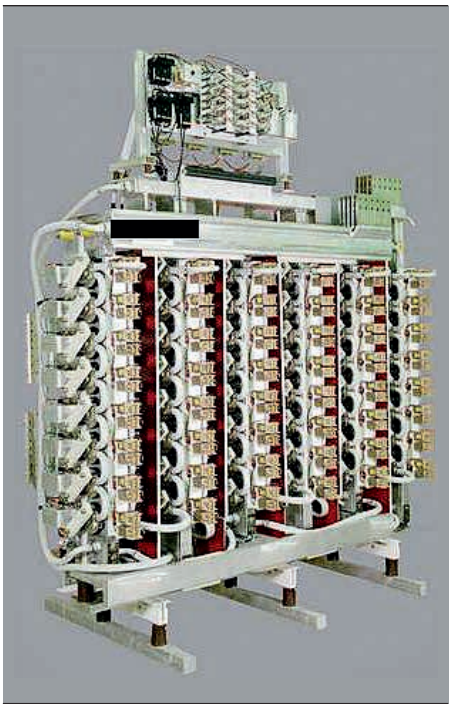
Die Entwicklung robuster und leistungsfähiger Halbleiter revolutionierte die Branche und ebnete den Weg für zahlreiche neue Anwendungen. Da die neue Technologie ohne die Risiken von Quecksilberdampf-Gleichrichtern und den hohen Wartungsaufwand von Kontaktgleichrichtern auskam, setzte sie sich rasch durch. Dank ihrer einfachen Handhabung, guten Wärmeabfuhr und problemlosen Reihen- oder Parallelschaltung wurden Halbleiterbauelemente zu einem unverzichtbaren Bestandteil zahlloser Anwendungen.

BBC entwickelte ihren ersten Diodengleichrichter im Jahr 1956. Auf diesen Durchbruch folgte die Einführung von Thyristoren im Jahr 1960. Im darauf folgenden

Fußnote

1 Siehe auch „Vom Quecksilberdampf zum Hybridleistungsschalter: 100 Jahre Leistungselektronik“ in *ABB Review* 2/2013, S. 70–78

3 Gleichrichter mit Zwei-Zoll-Thyristoren



4 Gleichrichter mit Vier-Zoll-Thyristoren

Jahrzehnt entwickelte BBC sogenannte Pigtail-Dioden (Glas- und Keramikzylinder mit Schrauben und flachem Boden) für den Einsatz in Hochleistungs-Gleichrichteranwendungen.

In den 1970er Jahren hielt die Wafertechnologie in der Halbleiterfertigung Einzug und führte zur Entwicklung von 2-Zoll- und 3-Zoll-Dioden und -Thyristoren. Diese bildeten die Grundlage für einen weiteren Meilenstein: die erste Diodengleichrichteranlage von BBC mit einem Ausgangsstrom von über 100 kA → 3.

Heute stellt ABB Gleichrichter für bis zu 200 kA her, was durch 4-Zoll-Dioden und -Thyristoren ermöglicht wird → 4. Diese sind verfügbar mit:
– verschiedenen Sperrspannungen,
– integriertem Explosionsschutz und
– geringem, konsistentem Abfall der Durchlassspannung (Schmalband-Geräte) für große Gleichrichtereinheiten mit 16 oder mehr parallel geschalteten Halbleitern.

Rolle des Kühlmediums

Trotz der zahlreichen Vorteile von Halbleitern ermöglichte erst die Einführung sogenannter druckkontaktierter Bauelemente einen verbreiteten Einsatz in Hochleistungsanwendungen. Der Hauptvorteil dieser Bauweise besteht darin, dass die Wärme äußerst effizient vom Silizium weggeleitet wird (Wärme ist der Hauptgrund für eine begrenzte Leistungsfähigkeit von Halbleitern und der häufigste Grund für Ausfälle).

Die Entwicklung von Hochleistungshalbleitern und ihrer Anwendungen ist untrennbar mit der Entwicklung der Flächenkühlmethoden verbunden. Diese begann mit umgebungsluftgekühlten Systemen und setzte sich mit zwangsluftgekühlten Systemen fort.

Steigende Stromstärken führten schließlich zur Entwicklung ölgekühlter Systeme. Ab einer gewissen Stromstärke wurden jedoch die physikalischen Eigenschaften von Öl (insbesondere seine Entflammbarkeit und veränderliche Viskosität) zunehmend zum Problem. Dieses Manko von Öl als Kühlmedium wurde schließlich durch die Einführung von wassergekühlten und mit entionisiertem Wasser gekühlten Systemen beseitigt. Heute können Systeme mit Einzelleistungen von bis zu 200 MW pro Einheit realisiert werden.

Halbleiter als Herzstück des Gleichrichters

Der Halbleiter ist einer der Grundbausteine heutiger Hochleistungs-Gleichrichtersysteme. Die Auswahl des richtigen Halbleiterbauelements (Thyristor oder Diode) und der richtigen Sicherung für die jeweilige Anwendung ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu gehören:
– Anwendung des Gleichrichters (Aluminiumverhüttung, Kupfer- oder

Ein besserer, zuverlässigerer Wärmeübergang trägt zu einem längeren Lebenszyklus der Stromrichterausrüstung bei.

Das Hauptziel der Gleichrichtersparte von BBC/ABB ist seit jeher die Herstellung sicherer und effizienter Gleichrichtersysteme.

5 Das RectiCal-Tool

RectiCal bietet Algorithmen, Simulationen und eine Datenbank mit verschiedenen Halbleitern und Sicherungen, die durch Labortests und Vor-Ort-Messungen verifiziert wurden. RectiCal hilft bei der Bestimmung folgender Parameter:

- Größe des Transformators
- Größe des Gleichrichters einschließlich:
  - Art der Halbleiter und Sicherungen
  - Anzahl paralleler Elemente
  - Überlastbarkeit des Gleichrichters
  - Gleichrichterverluste, d. h. Halbleiter- und Sicherungsverluste
  - Kühlsystemanforderungen

Zinkelektrolyse, Gleichstrom-Lichtbogenofen usw.)
- Ausgangsspannung und -strom des Gleichrichters
- Umgebungsbedingungen
- Netzbedingungen, insbesondere die Kurzschlussleistung
- Belastungsklasse und Überlastbarkeit

Bei der optimalen Dimensionierung des Gleichrichters und der Auswahl der Halbleiter und Sicherungen werden die Ingenieure bei ABB von einem proprietären Softwaretool namens RectiCal unterstützt → 5.

Lebenszyklus und Effizienz

Ein wichtiger Aspekt bei Investitionsentscheidungen ist die Kapitalrendite. Die Betriebskosten wiederum haben einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Die meisten Prozesse, in denen Gleichrichter von ABB zum Einsatz kommen, zeichnen sich durch lange Lebenszyklen aus. Daher sollten bei Kaufentscheidungen nicht allein die Anschaffungskosten, sondern auch die Lebenszykluskosten berücksichtigt werden.

Der Energieverlust (bzw. die Effizienz) ist ein wichtiger Faktor sowohl im Hinblick auf die Betriebskosten als auch auf die Erfüllung von Umweltauflagen.

Durch die richtige Wahl von Kühlung, Montage, Kontaktstabilität zwischen den wärmeleitenden Oberflächen, Stromverteilung und Schutz lassen sich die Lebensdauer der Ausrüstung und die Leistungsfähigkeit des Halbleiters erheblich verbessern.

ABB arbeitet seit über 80 Jahren daran, längere Lebenszyklen und eine hohe Betriebseffizienz zu gewährleisten. Hierbei hat sich gezeigt, dass folgende Schlüsselfaktoren einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer und Effizienz der Produkte haben.

Mechanische Montage

Durch die mechanische Montage der Halbleiter und der Kühlkörper soll ein möglichst hoher Druckkontakt hergestellt werden, um eine gute Wärmeabfuhr zu gewährleisten. Ein besserer, zuverlässigerer Wärmeübergang trägt zu einem längeren Lebenszyklus des Stromrichtersystems bei.

Stromverteilung

Zur Optimierung der Kosten eines Gleichrichtersystems ist eine präzise Bestimmung der erforderlichen Anzahl von Halbleitern erforderlich. Dazu muss wiederum die Stromverteilung durch den Halbleiter genau bestimmt werden. Dieses Wissen ermöglicht nicht nur die Optimierung der Kosten, sondern hilft auch dabei, Verluste besser zu verstehen, und unterstützt die Auslegung des Kühlsystems.

Schutz

Durch Implementierung eines zuverlässigen Schutzes gegen transiente Überlastungen und durch Isolation defekter Halbleiter kann die Gefahr einer Schädigung von Betriebsmitteln minimiert werden, was ebenfalls zu längeren Lebenszyklen führt. Selbst bei einem Halbleiterausfall sorgen Eindämmungs- und Redundanzstrategien dafür, dass es in der Regel nur zu einer minimalen Beeinträchtigung der Anlage und häufig zu keinerlei Schäden an der übrigen Ausrüstung kommt.

Explosionsring

ABB verfügt über eine patentierte Technologie, die bei Beschädigung eines Halblei-

Aufgrund der langen Lebenszyklen sollten bei Kaufentscheidungen nicht allein die Anschaffungskosten, sondern auch die Lebenszykluskosten berücksichtigt werden.

ters jegliche Ausbreitung von Plasma verhindert. Viele Vorfälle, die eine Gefahr für andere Betriebsmittel darstellen könnten, werden so auf den Ort des defekten Bauelements beschränkt. Der Explosionsring hat eine erhebliche Auswirkung auf die Lebensdauer der Ausrüstung.

Überspannungsschutz

Einer der häufigsten Ursachen für den Ausfall von Halbleitern ist eine übermäßige Spannungsbelastung. Die Ursache schädlicher Spannungsspitzen liegt häufig außerhalb des Gleichrichtersystems. Die Systemdesignwerkzeuge von ABB ermöglichen die Realisierung eines äußerst wirksamen Überspannungsschutzes unter Berücksichtigung verschiedener Netzaspekte, Prozessaspekte und Leistungsschalter.

Explosionsprüfungen von Sicherungen und Halbleitern

Um eine sichere Isolierung defekter Halbleiter zu gewährleisten, muss die vorgeschaltete Sicherung durchbrennen, bevor der Halbleiter einen Zustand erreicht, in dem er sich selbst und seiner Umgebung mechanischen Schaden zufügen kann. Dies stellt hohe Anforderungen an die Sicherungen: Zum einen müssen sie effektiv sein und gleichzeitig nur wenig Energie verbrauchen. Zum anderen müssen sie der beim Fehler freiwerdenden Wärme standhalten können. Die Widerstandsfähigkeit der Halbleiter-/Sicherungskombinationen von ABB wird im unternehmenseigenen Labor im schweizerischen Baden unter strengsten Bedingungen getestet.

Alle diese Faktoren tragen zu längeren Lebenszyklen und sichereren Betriebsbedingungen bei und unterstützen somit Kunden bei ihren Bemühungen um eine höhere Produktivität.

Verluste und ihre Bedeutung

Verluste in Gleichrichtersystemen werden hauptsächlich durch die Halbleiter und Sicherungen verursacht. Während es sich bei den Sicherungsverlusten meist um Kupferverluste handelt, ist die Situation bei den Halbleitern etwas anders. Einige Halbleiterverluste sind proportional zur Stromstärke, während andere im Verhältnis zum Quadrat der Stromstärke variieren.

$P = I_t \cdot V_t + I^2 R_t$

I = Strom durch den Halbleiter

V_t = Abfall der Durchlassspannung über dem Halbleiter

R_t = äquivalenter Durchlasswiderstand des Halbleiters

Niedrigere Verluste bedeuten einen höheren Wirkungsgrad, der sich in geringeren Betriebskosten niederschlägt.

Hochspannungs-Gleichrichter (2.000 V)

Die Wirtschaft treibt die Technik voran. Ein höherer Wirkungsgrad bedeutet eine höhere Wirtschaftlichkeit. Es hat sich gezeigt, dass Gleichrichtersysteme mit höheren Spannungen effizienter sind als Systeme mit gleicher Ausgangsleistung, die mit niedrigeren Spannungen arbeiten. Der Grund hierfür ist, dass ein Großteil der Verluste quadratisch proportional zur Stromstärke, aber nur einfach proportional zur Spannung ansteigt. Dank der zuverlässigen Halbleitertechnik von ABB, die in der Lage ist, höhere Spannungen zu bewältigen, konnten 2.000-V-Gleichrichter entwickelt werden, die durch den Betrieb mit höheren Spannungen wesentlich effizienter sind.

Bahnbrechende Projekte und veränderliche Trends

ABB gehört zu den Technologieführern auf dem Gebiet der Leistungselektronik und speziell im Bereich der Gleichrichtersysteme. Auf dem Weg dorthin hat das Unternehmen viele Meilensteine gesetzt. Die Geschichte der Leistungselektronik begann mit Quecksilberdampf-Gleichrichtern, die zwischen 1913 und 1925 für Forschungs- und Industriezwecke entwickelt wurden. Die Vorgängerunternehmen von ABB installierten die erste HGÜ-Verbindung (1939) und die erste kommerzielle HGÜ-Verbindung (1954). Ende der 1950er Jahre legten die Firmen, aus denen ABB heute besteht, die Grundlagen für die heutigen Dioden- und Thyristorhalbleiter.

Um 1960 entwickelte BBC Kontaktgleichrichter für bis zu 6 kA, die zu jener Zeit als Hochstrom-Gleichrichter galten. Zwischen 1967 und 1980 stiegen die Leistungsdaten von Gleichrichtern durch die Einführung von Hochstrom- und Hochspannungsdioden erheblich. Zwischen 1970 und 1980 schafften sich Stromrichter für höherfrequente Anwendungen (Heizen und Schmelzen mit mittlerer Frequenz) und für die HGÜ ihre eigene Nische. Dies sind nur einige der zahllosen Errungenschaften, die sich über viele Anwendungsbereiche erstrecken. Ein Großteil der Durchbrüche, die im Laufe der Jahre auf dem Gebiet der Gleichrichter für die Aluminium-Elektrolyse und Gleichstrom-Lichtbogenöfen erzielt wurden, geht ebenfalls auf das Konto von ABB.

100 Jahre Leistungselektronik

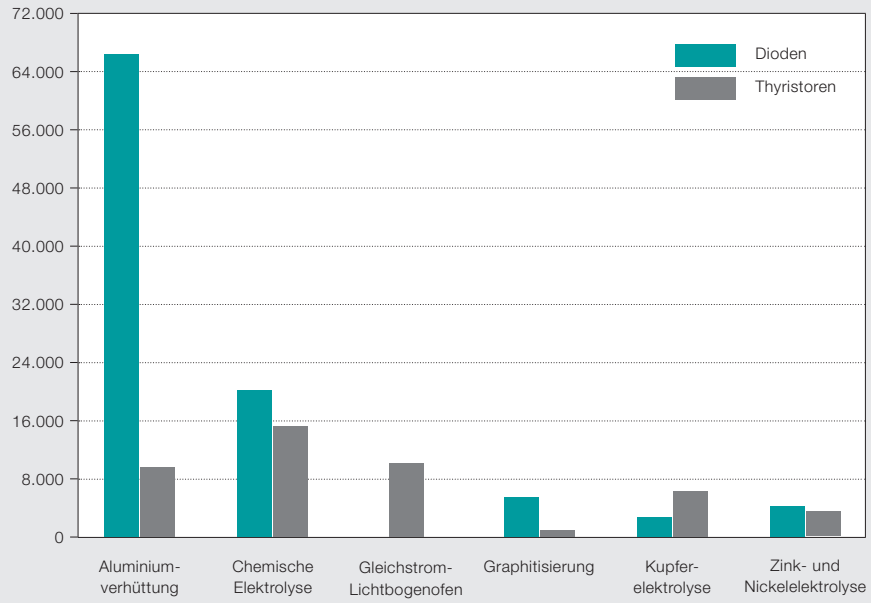
Die HPR-Gruppe von ABB gehört zu den Großabnehmern von Leistungshalbleitern innerhalb des Unternehmens und ist stolz darauf, ein Teil der 100-jährigen Geschichte zu sein. Halbleiter werden seit 1960 in HPR-Anwendungen eingesetzt, und die Menge der in verschiedenen Anwendungen verwendeten Halbleiter zeigt deutlich ihre Bedeutung auf diesem Sektor ➔ 6.

Einer der bedeutendsten Abnehmer ist die Aluminiumverhüttung. Gründe hierfür sind:

- die Verwendung großer Gleichrichtersysteme mit vielen parallel geschalteten Halbleitern
- die Anzahl der gelieferten Gleichrichtersysteme sowie eine verbreitete und steigende Nachfrage nach Aluminium
- hohe Überlast- und Redundanzanforderungen

In der Aluminiumindustrie ist die Diode aufgrund ihrer einfachen Steuerung im Vergleich zu thyristorbasierten Systemen das bevorzugte Halbleiterbauelement.

6 Einsatz von Halbleitern in verschiedenen HPR-Anwendungen



In der Aluminiumindustrie ist die Diode aufgrund ihrer einfachen Steuerung im Vergleich zu thyristorbasierten Systemen das bevorzugte Halbleiterbauelement. Die Entwicklung der Dioden von 2 auf 4 Zoll und der Anstieg der Sperrspannungen haben zur Festigung ihrer Position beigetragen.

Thyristoren spielen eine wichtige Rolle bei der Herstellung von Gleichrichtern für hochgradig dynamische und anspruchsvolle Lasten wie Gleichstrom-Lichtbogenöfen. Für Elektrolyseverfahren außerhalb der Aluminiumindustrie wie der Chlor-, Kupfer- und Zinkgewinnung werden aus Gründen der Effizienz und Steuerbarkeit hauptsächlich thyristorbasierte Gleichrichtersysteme eingesetzt.

Sicherheit

Neben der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit stand bei den Aktivitäten von ABB in der Leistungselektronik seit jeher ein sicherer Betrieb im Vordergrund. Dies gilt sowohl für die Sicherheit der Menschen, die mit oder in der Nähe der Ausrüstung arbeiten, als auch für den Schutz der Ausrüstung und benachbarter Anlagen. HPRs sind für hohe Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen ausgelegt, und wenn sie tatsächlich einmal ausfallen, sind sie so konzipiert, dass dies auf möglichst sichere Weise geschieht.

Leistungsstarke Technik

Halbleiterbauelemente (Dioden oder Thyristoren) spielen eine entscheidende Rolle bei der Herstellung effizienter, robuster und zuverlässiger Hochleistungsgleichrichter. Mit fortschreitender Entwicklung der Prozesstechnik wurden entsprechende Halbleiter entwickelt, um die steigenden Anforderungen der Gleichrichter zu erfüllen. Dank der Verfügbarkeit größerer Elemente (4 und 5 Zoll) mit höheren Sperrspannungen (4,2 kV, 6,5 kV) sind heutzutage sehr hohe Leistungsdichten möglich.

Shripad Tambe
Rajesh Pai
ABB Switzerland Ltd, High Power Rectifiers
Turgi, Schweiz
shripad.tambe@ch.abb.com
rajesh.pai@ch.abb.com

Literaturhinweis

Tambe, S., Winter, C., Dhareshwar, S. (2007): „Rectifiers for Higher Voltages in Aluminum Smelters – Challenges and Solutions“. Metal Bulletin. Mumbai, Indien

Editorial Board

Claes Rytoft
Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Clarissa Haller
Head of Corporate Communications

Ron Popper
Head of Corporate Responsibility

Eero Jaaskela
Head of Group Account Management

Andreas Moglestue
Chief Editor, *ABB Review*

Herausgeber
Die *ABB Review* wird herausgegeben von ABB Group R&D and Technology.

ABB Technology Ltd.
ABB Review
Affolternstrasse 44
CH-8050 Zürich
Schweiz
abb.review@ch.abb.com

Die *ABB Review* erscheint viermal pro Jahr in Englisch, Französisch, Deutsch, Spanisch und Chinesisch. Die *ABB Review* wird kostenlos an Personen abgegeben, die an der Technologie und den Zielsetzungen von ABB interessiert sind. Wenn Sie an einem kostenlosen Abonnement interessiert sind, wenden Sie sich bitte an die nächste ABB-Vertretung, oder bestellen Sie die Zeitschrift online unter www.abb.com/abbreview.

Der auszugsweise Nachdruck von Beiträgen ist bei vollständiger Quellenangabe gestattet. Ungekürzte Nachdrucke erfordern die schriftliche Zustimmung des Herausgebers.

Herausgeber und Copyright © 2014
ABB Technology Ltd.
Zürich, Schweiz

Satz und Druck
Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
AT-6850 Dornbirn, Österreich

Layout
DAVILLA AG
Zürich, Schweiz

Übersetzung
Thore Speck, Dipl.-Technikübersetzer (FH)
D-24941 Flensburg, Deutschland

Haftungsausschluss
Die in dieser Publikation enthaltenen Informationen geben die Sicht der Autoren wieder und dienen ausschließlich zu Informationszwecken. Die wiedergegebenen Informationen können nicht Grundlage für eine praktische Nutzung derselben sein, da in jedem Fall eine professionelle Beratung zu empfehlen ist. Wir weisen darauf hin, dass eine technische oder professionelle Beratung vorliegend nicht beabsichtigt ist. Die Unternehmen der ABB-Gruppe übernehmen weder ausdrücklich noch stillschweigend eine Haftung oder Garantie für die Inhalte oder die Richtigkeit der in dieser Publikation enthaltenen Informationen.

ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbreview

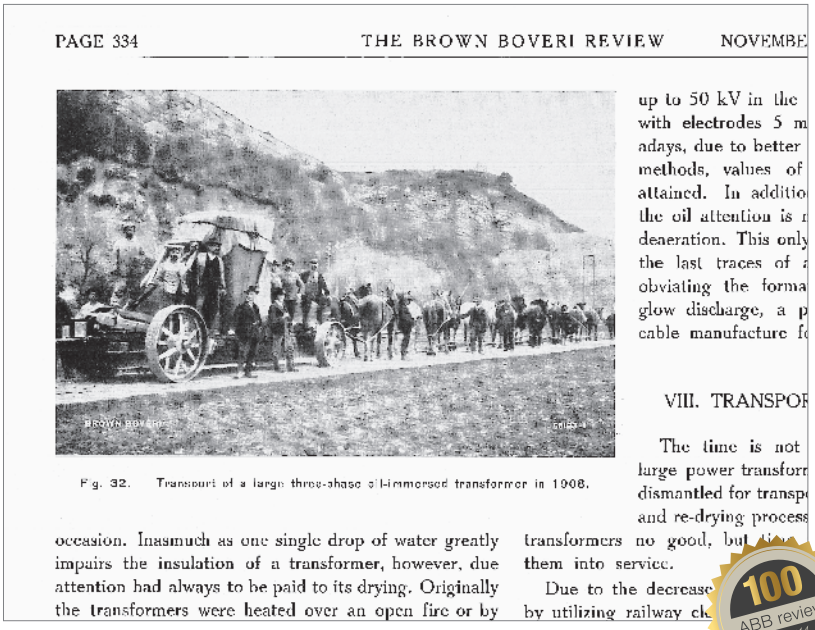

PAGE 334 THE BROWN BOVERI REVIEW NOVEMBE

Fig. 32. Transport of a large three-phase oil-immersed transformer in 1908.

up to 50 kV in the
with electrodes 5 m
adays, due to better
methods, values of
attained. In additio
the oil attention is
deneration. This only
the last traces of
obviating the forma
glow discharge, a p
cable manufacture f

VIII. TRANSPOR

The time is not
large power transfor
dismantled for transp
and re-drying process

occasion. Inasmuch as one single drop of water greatly impairs the insulation of a transformer, however, due attention had always to be paid to its drying. Originally the transformers were heated over an open fire or by

transformers no good, but
them into service.

Due to the decrease
by utilizing railway ch

Vorschau 2|14

100 Jahre Geschichte

Im Juli 1914 veröffentliche das ABB-Vorgängerunternehmen BBC die erste Ausgabe der *BBC Review*. Umbenannt in *ABB Review* im Jahr 1988, wurde die Zeitschrift 100 Jahre lang ununterbrochen publiziert und gehört damit zu den ältesten noch existierenden Einheiten des Unternehmens.
Heft 2/2014 der *ABB Review* wirft einen Blick in die Archive und präsentiert einen wahren Schatz an Innovationen, der von kuriosen Ideen bis hin zu den Ursprüngen vieler Technologien und Produkte reicht, die das Rückgrat für das heutige Geschäft von ABB bilden.
Anlässlich des Jubiläums sind wir auch auf der Suche nach Kommentaren und Beiträgen von unseren Lesern. Alle, die Erinnerungen oder besondere Einblicke anlässlich des Jubiläums mit uns teilen möchten, sind herzlich eingeladen, dem Chefredakteur unter *andreas.moglestue@ch.abb.com* zu schreiben.
Die *ABB Review* ist nicht der einzige Teil des Unternehmens, der in diesem Jahr auf seine Geschichte zurückblickt: Vor 60 Jahren wurde die erste kommerzielle HGÜ-Verbindung fertiggestellt, und vor 40 Jahren kam der erste ABB-Roboter auf den Markt. Auch diese Jubiläen werden in der *ABB Review* gewürdigt.

ABB Review auf dem Tablet

Die *ABB Review* ist nun auch als Tablet-Version verfügbar.
Besuchen Sie uns unter http://www.abb.com/abbreview

Bleiben Sie auf dem Laufenden …

Haben Sie eine Ausgabe der *ABB Review* verpasst? Lassen Sie sich auf bequeme Weise informieren, wenn eine neue Ausgabe der *ABB Review* (oder ein Special Report) veröffentlicht wird. Melden Sie sich unter folgender Adresse für die *ABB Review* Mailingliste an: http://www.abb.com/abbreview

Adressaufkleber hier anbringen

Stets zur Hand.
Wann Sie wollen,
wo Sie wollen.

Kennen Sie unsere neue ABB Review App mit zahlreichen praktischen Funktionen? Sofort verfügbar in vier Sprachen bietet sie interaktive Funktionalitäten für Tablets und Smartphones wie vollständig durchsuchbare Inhalte, eingebundene Bildergalerien, Filme und Animationen.
Erhältlich im App-Store Ihres Vertrauens.
http://www.abb.com/abbreview

ABB review
Available on the App Store
GET IT ON Google play

Power and productivity
for a better world™