

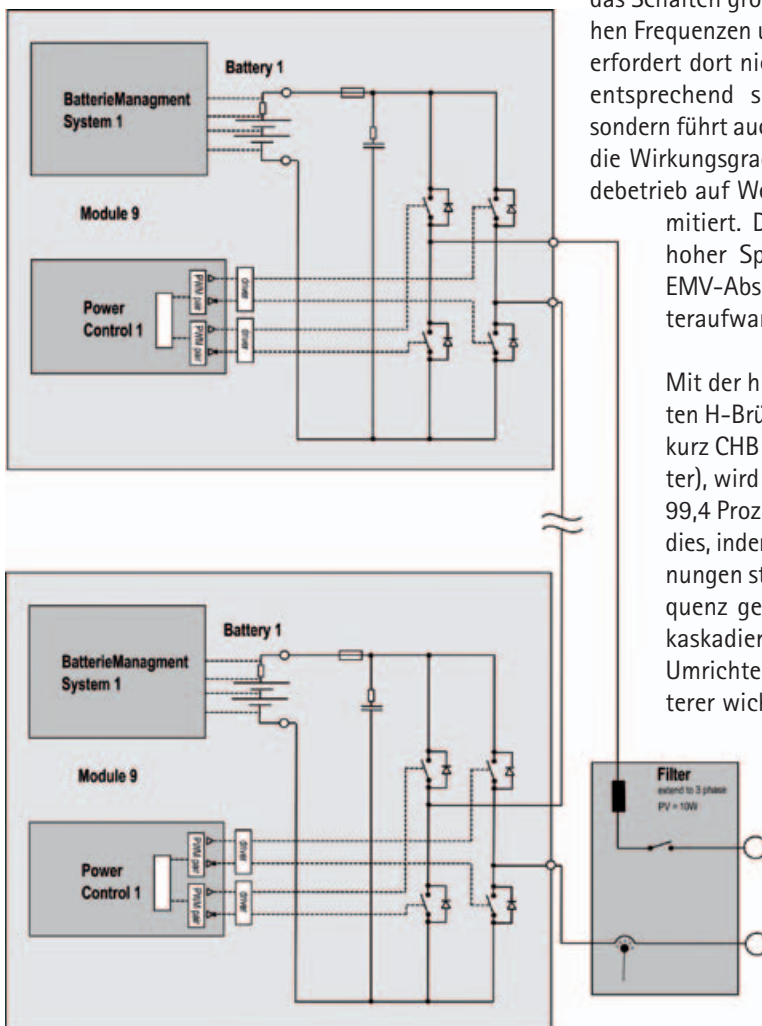
Kaskadierte H-Brücken-Multi-Level-Topologie

Hocheffizienter Umrichter für Batteriespeichersysteme

Um die Klimaziele zu erreichen, wird verstärkt auf regenerative Energien gesetzt. Strom aus Wind, Wasser und Sonne steht nicht kontinuierlich zur Verfügung, was eine Zwischenspeicherung etwa in Batterien erforderlich macht. Bei Speicherung und Wiedereinspeisung soll natürlich so wenig Energie wie möglich verloren gehen.

VON KARL JÄGER, SENIOR-ENTWICKLUNGSINGENIEUR, UND TOBIAS HERRMANN, FIELD APPLICATION ENGINEER & MARKETING MANAGER, FINEPOWER

Bild 1:
Prinzip des Multi-Level-Umrichters
für eine Netzphase



In heutigen Batteriespeichersystemen werden häufig 3-Phasen-Wechselrichter basierend auf der aktiv geschalteten B6-Topologie oder 3-Level-Inverter eingesetzt. Doch das Schalten großer DC-Spannungen mit hohen Frequenzen und anschließender Filterung erfordert dort nicht nur die Verwendung von entsprechend spannungsfesten Bauteilen, sondern führt auch zu Verlusten. Dadurch sind die Wirkungsgrade im Lade- als auch Entladebetrieb auf Werte von etwa 97 Prozent limitiert. Durch das schnelle Schalten hoher Spannungen entstehen hohe EMV-Abstrahlungen, die mit viel Filteraufwand limitiert werden müssen.

Mit der hier beschriebenen kaskadierten H-Brücken-Multi-Level-Topologie, kurz CHB (Cascaded H-Bridge Converter), wird ein Wirkungsgrad von bis zu 99,4 Prozent erreicht. Ermöglicht wird dies, indem lediglich geringe DC-Spannungen stufenweise mit niedriger Frequenz geschaltet werden. Durch den kaskadierten, modularen Aufbau der Umrichtermodule ergibt sich ein weiterer wichtiger Vorteil: Bei Ausfall eines Umrichters oder Batteriepacks kann das System bei geringfügig reduzierter Leistung weiterbetrieben werden. Pro Modul wurde die Batteriespannung auf <60 V DC festgelegt, um im Reparatur- oder Servicefall nicht mit lebensgefährlichen Spannungen

konfrontiert zu werden, sobald das Modul vom System genommen wurde.

konfrontiert zu werden, sobald das Modul vom System genommen wurde.

CHB – das Verfahren

Wie im Prinzipschaltbild in Bild 1 zu sehen, besteht der Umrichter aus n Stück H-Brücken inklusive eines Batteriepacks. In unserem Beispiel besteht das System aus neun Umrichtern pro Phase, die eine Gesamtleistung von $3 \times 25 \text{ kW}$ liefern oder speichern können. Die einzelnen Phasenstränge sind per Y-Schaltung an das Drehstromnetz geschaltet. Als Regelungsverfahren wird eine für dreiphasige Umrichter übliche Vektorregelung eingesetzt, deren Vorteile auch bei diesem System zur Geltung kommen. Zum aufwändigsten Teil der Regelung gehört dabei die richtige Ansteuerung und Überwachung der einzelnen Module, um im Störfall die richtigen Maßnahmen bis hin zur kontrollierten Abschaltung zu treffen.

Ansteuerung eines klassischen Umrichters

Würde das System nur aus einem einzigen Modul bestehen, hätten wir den klassischen Anwendungsfall eines einphasigen Vollbrücken-Umrichters, so wie er in Bild 2 dargestellt ist. Mindestens eine der beiden Halbbrücken wird mit einem geregelten PWM-Signal angesteuert, um einen sinusförmigen Strom zu erzeugen. Entweder wird die andere Halbbrücke diagonal dazu mit demselben PWM-Signal getaktet oder sie wird lediglich als Pol-

Bild 2:
Topologie des klassischen
2-Level-Vollbrückenumrichters

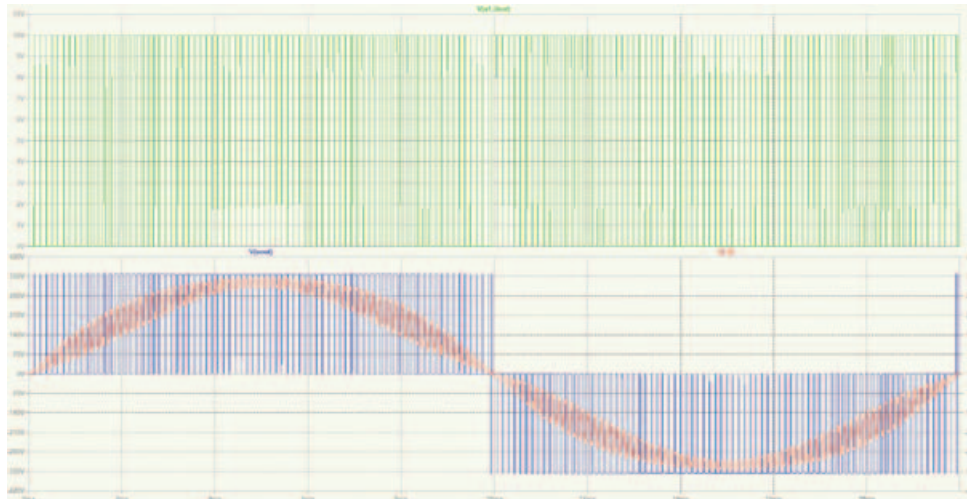
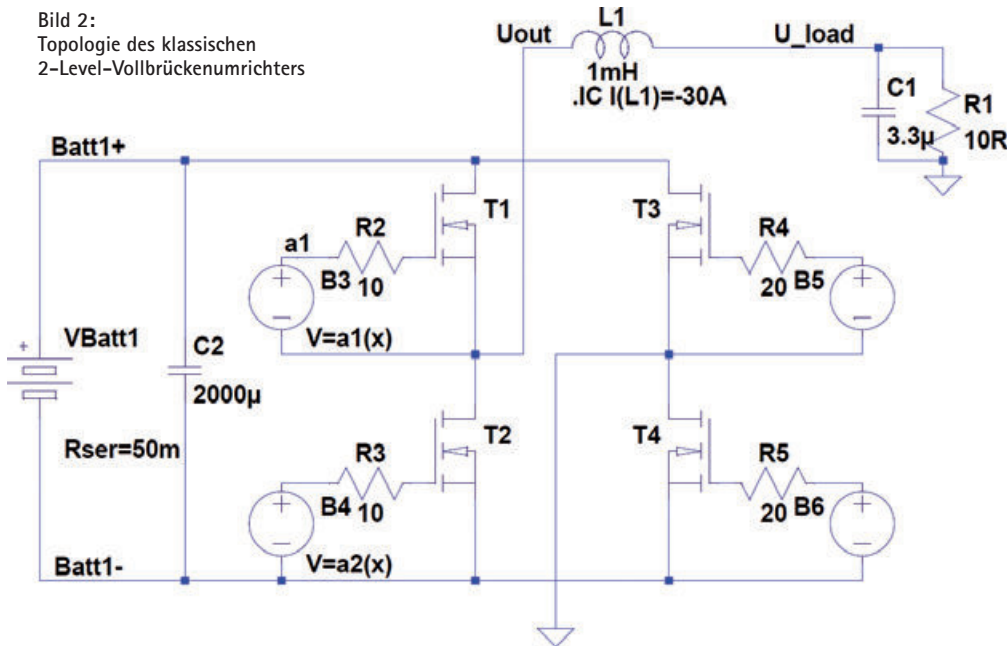


Bild 3: Simulationsergebnisse
des klassischen 2-Level-Vollbrückenumrichters

wender im Netzfrequenz-Takt umgesteuert. Bild 3 zeigt die entsprechenden Signalverläufe. Der Polwender hat den Vorteil eines besseren Wirkungsgrades, da an dieser Halbbrücke kaum Schaltverluste auftreten. Nachteilig dabei ist, dass induktive oder kapazitive Ströme nur möglich sind, wenn die Ansteuerung der kommutierenden Halbbrücke auf die entsprechende Phasenverschiebung eingestellt ist. Im Inselbetrieb, wo beliebige Verbraucher mit unbekanntem Leistungsfaktor daran angeschlossen werden sollen, würde dieses Verfahren Kommutierungsprobleme hervorrufen.

Gehen wir nun davon aus, wir hätten zwei Einzelumrichtermodule miteinander wie in Bild 4 verschaltet. Durch die Erweiterung des Single-Modul-Prinzips ist das Ansteuerprinzip auch hier anwendbar. Zusätzlich wird das Prinzip der Phase-Shift-Ansteuerung verwendet, das heißt, Modul 2 wird gegenüber Modul 1 phasenverschoben getaktet.

Die Vorteile...

Um zur gleichen effektiven Schaltfrequenz zu kommen, ist jedes Modul nur noch halb so schnell zu takten, wenn es um 180° phasenversetzt angesteuert wird. In der Simulation ist ein weiterer Vorteil dieser Topologie erkennbar: Neben der Verdoppelung der resultierenden Taktfrequenz halbiert sich die zu schaltende Spannung.

Wir erreichen also nicht nur eine Halbierung der Schaltverluste wegen halb so häufigem Schalten; die Schaltverluste werden nochmals um etwa den Faktor 4 geringer. Im Detail hängt dies von den in der jeweiligen Spannungs-kategorie verfügbaren MOSFET-Schaltern ab. Hier könnte man einwenden, dass wegen der in Reihe geschalteten Endstufen dafür die Leitverluste ansteigen müssten. Da aber MOSFETs in der halben Spannungs-kategorie in der Regel bei gleichen Kosten auch nur etwa den halben $R_{DS(on)}$ aufweisen, kompensiert sich dieser Effekt.

Neben der deutlichen Reduktion der Schaltverluste sehen wir in Bild 5 aber noch einen weiteren Vorteil: Bei gleicher Induktivität halbiert die halbe Schaltspannung an der Drossel den Ausgangs-Ripple-Strom. Im Umkehrschluss heißt das: Bei gleichem Ausgangs-Ripple-Strom könnte man nur durch Verwendung von zwei anstatt einem Inverter-Modul die Ausgangs-Sinusdrossel etwa halbieren. Das System ist eingeschränkt redundant, da es sich bei Ausfall eines Moduls pro Phase mit minimal reduzierter Leistung weiterbetreiben lässt. Die H-Brücken lassen sich räumlich eng mit den Batteriepacks platzieren, sodass hohe Störabstrahlung durch Pulsströme erheblich verringert wird.

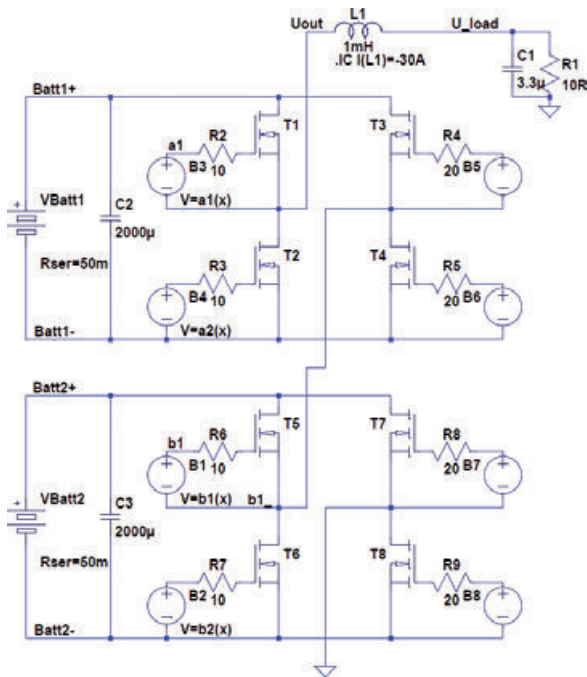


Bild 4: Topologie des 5-Level-Umrichters als Kombination von zwei Vollbrückenumrichtern

... und Nachteile

Gegenüber einer aktiv geschalteten B6-Brücke besteht der offensichtlichste Nachteil in der hohen Zahl an Schalttransistoren, je nachdem, wie viel Module zum Einsatz kommen. Würde man ein Gerät gleicher Leistung mit einer B6-Brücke realisieren, würde man aufgrund der zu schaltenden Leistung sicher

auf integrierte SiC-Module zurückgreifen. Ein Kostenvorteil bei den Leistungsschaltern dürfte damit aber eher nicht entstehen. Der wirkliche Kostenvorteil entsteht erst, wenn man den hohen Aufwand an Ansteuerung und Überwachung beim Multi-Level-Inverter mit ins Kalkül zieht.

Um die Module nicht mit störungsempfindlichen und verdrahtungsaufwändigen Einzelleitungen ansteuern zu müssen, sind neben dem Gesamtsystem-Controller auch noch weniger leistungsfähige Sub-Prozessoren pro Modul nötig, um die Steuer- und Überwachungssignale vom und zum Bus zu bedienen. Dazu kommt, dass die Batterien mit gepulstem Strom belastet werden, wenn er nicht durch externe Kapazitäten geglättet wird. Eine höhere Zahl an Bauteilen erhöht zudem die Ausfallwahrscheinlichkeit.

Alternative Ansteuerung mit Level Shift

Alternativ zur eben beschriebenen Phase-Shift-Ansteuerung soll hier noch die Anstermethode Level Shift gezeigt werden. Im Unterschied zu oben wird diesmal die Halbbrücke entsprechend der Amplitude der Eingangsspannung getaktet oder nur statisch ein- oder ausgeschaltet. Damit wird die zum Takten vorgesehene Halbbrücke eines Moduls nur dann getaktet, wenn es der Spannungspegel erfor-

dert. Unabhängig von der Anzahl der Module wird immer nur eines getaktet. Alle anderen haben die Batteriespannung hinzu- oder weggeschaltet.

Auf den ersten Blick klingt das nach mehr Steuerungsaufwand, aber auch nach mehr Effizienz, weil nur ein Modul getaktet wird. Die Überprüfung erfolgt wieder per Simulation.

Generell ist der Aufbau des Schaltbildes identisch zu Bild 4, womit auch der höhere Steuerungsaufwand schon einmal entkräftet werden kann. Zwischen den verschiedenen Pegeln umzuschalten ist weniger kompliziert, als es sich anhört. Mittels eines digitalen Busses ist die Ansteuerung sogar einfacher, weil die Taktsynchronisierung der Module nicht zeitkritisch ist. Wie in Bild 6 zu sehen ist die Spannung an der Sinus-Drossel und folglich auch der Strom durch die Drossel genau gleich dem Beispiel aus Bild 5.

Wie sieht es aber mit den Schaltverlusten an den Transistoren aus?

Wird das Modul getaktet, beträgt die Schaltfrequenz hier 8 kHz, im Gegensatz zu 8 kHz/n (n=Modulzahl) im ersten Beispiel. Allerdings ist hier jedes Modul nur zu 50 Prozent der Zeit im Schaltbetrieb und für den Rest statisch ein oder aus. Damit ist klar: Die Schalthäufigkeit ist identisch, jedoch in diesem Beispiel ungleicher verteilt. Die Verluste sind also identisch.

Bild 5: Simulationsergebnisse des 5-Level-Umrichters mit Phase-Shift-Ansteuerung

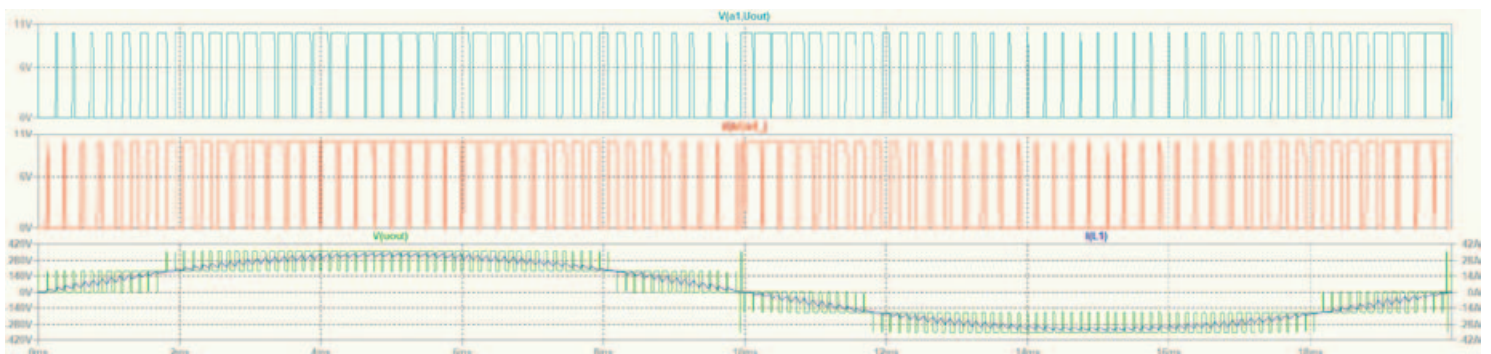


Bild 6: Simulationsergebnisse des 5-Level-Umrichters mit Level-Shift-Ansteuerung



In der Praxis

Alle eingangs aufgezählten Vorteile des CHB multiplizieren sich mit dem Faktor der verwendeten Modul-Zahl. Ebenso multipliziert sich aber auch der Aufwand. Wie fast immer kann es auch hier keine allgemeingültige Empfehlung geben. Wie dargestellt, hat die CHB-Topologie unschlagbare Vorteile. Ob sich der erhöhte Aufwand an Ansteuerung und Überwachung für den jeweiligen Anwendungsfall rechnet, hängt von vielen Faktoren ab.

Zuerst von der gewünschten Leistung und der Art der verwendeten Batteriepacks, denn Bedingung zur Nutzbarkeit ist, dass die Packs untereinander isoliert sind und sich gegeneinander mit ihrem Spannungsbezug unterscheiden. Für diese Anwendung ist ein Dreiphasen-Netz

nicht Bedingung, sie lässt sich mit anderer Regelung auch im Einphasenbetrieb sinnvoll einsetzen. Bei Invertern mit nur wenigen kW wird sich der erhöhte Aufwand eher nicht rechnen.

Wenn man sich für den Multi-Level-Inverter entschieden hat, bleibt immer noch die Frage, mit wie viel Modulen er sich am wirtschaftlichsten betreiben lässt. Hier lohnt sich zuerst ein Blick in das Datenblatt der MOSFET-Hersteller. Erfahrungsgemäß werden die $R_{DS(on)}$ -Werte bei Spannungsfestigkeiten >100 V unverhältnismäßig höher. Bereits daraus geht hervor, dass sich ein System mit nur zwei Modulen, wie wir es in obigem Beispiel betrachtet haben, aus Transistorsicht am 230-V-Netz nicht optimal auszulegen ist. Für eine Inverter-Brücke würde man Transistoren mit einer U_{DS} -Spannung von 600 bis 650 V verwenden. Bei zwei Modulen bräuchte man also Transistoren ≥ 300 V mit halbem $R_{DS(on)}$ -Wert. In dieser

Spannungsklasse steht aber nur wenig Brauchbares zur Verfügung. Bei dieser Betrachtung wurde noch nicht der Spannungsbereich der verwendeten Batterien berücksichtigt. Soll hier die verfügbare Kapazität optimal genutzt werden, muss die maximale Brücken- oder Transistorspannung gegebenenfalls noch deutlich erhöht werden.

Eine für batteriebetriebene Anwendungen optimale Auslegung erfolgt dann, wenn einzelne Batterie-Stacks noch im sicheren Spannungsniveau <60 V liegen (SELV), wie bereits einleitend erwähnt wurde. In diesem Fall kann man auch auf ein weites Portfolio von Halbleitern zurückgreifen mit Durchbruchspannungen von maximal 100 V. Hier kann Finepower auch mit Komponenten unterstützen, zum Beispiel mit MOSFETs der Firma MaxPower oder in Spezialanwendungen auch mit GaN-HEMTs von EPC. (eg)

Forum Power Architectures

Auswahl und Einsatz von Stromversorgungen

Stromversorgungen bilden das Herz jedes Geräts und jeder Maschine. Wie sich durch passende Auswahl und Einsatz Zeit und Kosten in der Entwicklung sparen lassen, vermitteln Stromversorgungsspezialisten in Vorträgen und Workshops am 28./29. Januar 2020 in München.

Zeitgleich mit der BatteryWorld 2020 findet am 28./29. Januar im Münchner Hilton Park Hotel das Forum Power Architectures statt. Hervorgegangen aus den „Stromversorgungs-Anwenderforen“, intensiviert das neue Konzept in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern TDK-Lambda, inpotron Schaltnetzteile, Egston, Recom Power, Emtron electronic und Traco Power noch einmal den praxisorientierten Ansatz der Veranstaltung und kombiniert applikationsorientierte Vorträge zusätzlich mit intensiven Hands-on-Workshops.

Das Forum Power Architectures bietet auch direkte Bezüge zum Thema Batterieladung und -management. Für eine Teilnahmegebühr von 99 Euro (zzgl. MwSt.) haben die Besucher die Möglichkeit, an beiden Veranstaltungen teilzunehmen und sich ihr ganz persönliches

„Power Package“ zusammenzustellen. So bietet allein Power Architectures 16 Vorträge von 13 Firmen und Institutionen sowie jeweils vier Workshops an den beiden Veranstaltungstagen.

Eröffnet wird die Veranstaltung am Dienstag, dem 28. Januar durch zwei Keynotes: Dr. Michael Heidinger vom KIT widmet sich dem Thema „Zukunftweisende Kommunikation mit innovativer Stromversorgung“, und Sebastian Fischer, Traco Power, stellt in seinem Vortrag die Frage: „Wirkungsgrade von 96 Prozent und mehr: Gehört den ultraschnellen GaN-Transistoren die Schaltnetzteil-Zukunft?“

Nach den beiden Keynotes können die Teilnehmer des Forums Power Architectures sich ab 10:30 Uhr zwischen zwei weiteren Vorträgen und einem Workshop entscheiden. Her-