

3-LEVEL-INVERTER – EINFACHE DIMENSIONIERUNG ONLINE

Von verschiedenen Herstellern gibt es thermische Auslegungen von 3-Level Schaltungen, die jedoch nicht an die Genauigkeit einer Berechnung auf Basis von numerischen Rechnungen heranreichen. Semikron hat die thermische Berechnungssoftware SemiSel um die 3-Level Topologie 3L NPC (Neutral Point Clamped) erweitert, womit die optimale Auswahl zwischen 3-Level Modulen von 10 kVA bis 300 kVA möglich ist.

TEXT: Alexander Langenbacher & Ingo Staudt FOTOS: Semikron

Die erste 3-Level Topologie wurde vor fast 30 Jahren vorgeschlagen [1], doch bisher war der technologische Fortschritt in dieser Richtung im Inverter-Markt sehr langsam. Wegen der hohen Effizienz wurde diese Konfiguration zuerst im Hochspannungsbereich eingesetzt. Seit einiger Zeit kommen 3-Level-Topologien wegen der hohen Anforderungen bezüglich Wirkungsgrad und Netzqualität auch im Markt für unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und Solar-Wechselrichter-Markt zum Einsatz. Auch Anwendungen, bei denen hohe Schaltfrequenzen gefordert werden, da z.B. durch geringe Klirrfaktoren des Ausgangsstromes teure Netzfilter eingespart werden können, oder ein andauerndes Geräusch des Umrichters in Arbeitsumgebungen wie Büro oder Werkstatt verhindert werden soll, können durch den Einsatz von 3-Level Modulen optimiert werden. Mit jeweils vier Halbleitern im Strompfad sind die Durchlassverluste eines 3-Level Umrichters höher als bei einer konventionellen 2-Level-Lösung. Durch die deutlich reduzierten Schaltverluste ergeben sich aber Einsparungen bei den Gesamtverlusten von bis zu 44% [2], gerade bei hohen Schaltfrequenzen. Für diese Anwendungen, in denen der Einsatz der 3-Level Technologie erhebliche Vorteile bringt, hat Semikron ein breites Produktspektrum entwickelt.

Bei der Entwicklung eines Umrichters - sowohl in der 2-Level als auch in der 3-Level Topologie - ist die korrekte Dimensionierung von Modulleistung, Kühlsystem und Ansteuerung ein wichtiger Schritt. Die 3-Level Schaltung bietet wegen der höheren Anzahl von Schaltern im Strompfad mehr Kommutierungsmöglichkeiten, eine Verlustleistungsberechnung ist deshalb sehr komplex. Damit der Kunde die optimale Topologie und das richtige Modul in Bezug auf Verlustleistung und Betriebstemperatur wählen kann, hat Semikron die 3-Level-Topologie in die Simulationssoftware SemiSel implementiert.

Vielfältiges 3-Level-Produktspektrum

Die 3-Level-Technologie wird auf ein größeres Leistungsspektrum erweitert. Semikron bietet 3-Level-Module mit Leistungen von 10 kVA bis 300 kVA und verschiedenen Ansteuertechnologien an. Ein Modul enthält je eine 3-Level Inverter Phase (Abbildung. 1)

Klassisches 3-Level-Lötmodul für 10 bis 80 kVA

Für Ausgangsleistungen bis 100 kVA bietet Semikron 3-Level-Module in zwei verschiedenen Aufbautechnologien an, die

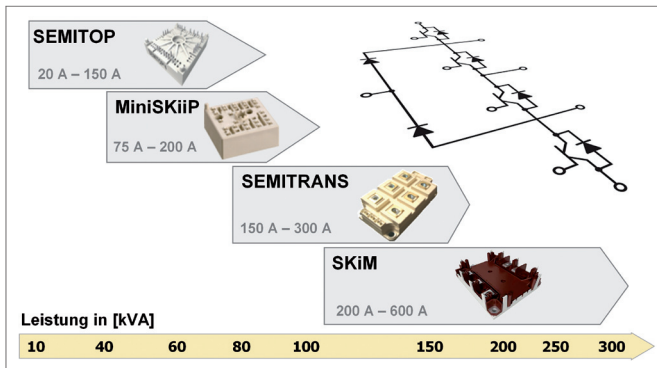


Abbildung 1: 600V-3-Level-Module von 10 kVA bis 300 kVA als Lötmodul (SEMITOP), Federkontaktmodul (MiniSKiiP) und Schraubmodul mit Bodenplatte (SEMITRANS) und ohne Bodenplatte (SKiM) werden angeboten.

durch ihr kompaktes und niederinduktives Design erhebliche Vorteile gegenüber diskreten Lösungen oder Lösungen mit Halbbrücken-Modulen bringen. Das klassische Lötmodul Semitop ist in der Spannungsklasse 600V und $I_{c,nom} = 20 - 150$ A verfügbar.

Niederinduktives Federkontaktmodul für einfache Umrichterfertigung

Das MiniSKiiP-Modul ermöglicht durch seine Federkontakttechnologie und seine schnelle Ein-, bzw. Zweischraubenmontage eine einfache und zuverlässige Umrichterfertigung. Mit über 14 Jahren Felderfahrung und mehr als 12 Mio. Modulen im Feld steht für 3-Level-Topologien eine Modulplattform zur Verfügung, die sich in allen Standardanwendungen bewährt hat. Das 3-Level-Modul layout wurde im MiniSKiiP unter verschiedenen Aspekten optimiert. Das Modulplättchenlayout wurde so gestaltet, dass die vier verschiedenen Kommutierungskreise so wenig Fläche wie möglich aufspannen und deren Anschlüsse möglichst nahe zusammen liegen, um die Modulinduktivität und die dadurch bedingten Überspannungen möglichst gering zu halten. Die Leiterbahnen auf der DCB und die Kupferflächen um die Halbleiterchips wurden für gute thermische Anbindung an den Kühlkörper gute Wärmespreizung optimiert. Die maximale Sperrspannung V_{CES} der IGBTs und Dioden wurde auf 650V erhöht, wodurch Zwischenkreisspannungen bis 900V beherrschbar werden, die man für das nordamerikanische 3x480V Netz benötigt.

Kompaktes Design für Leistungen ab 100 kVA

Für höhere Leistungen bietet Semikron die Schraubmodule SKiM und SEMITRANS mit $V_{CES} = 600$ V und $I_{c,nom} = 150 - 600$

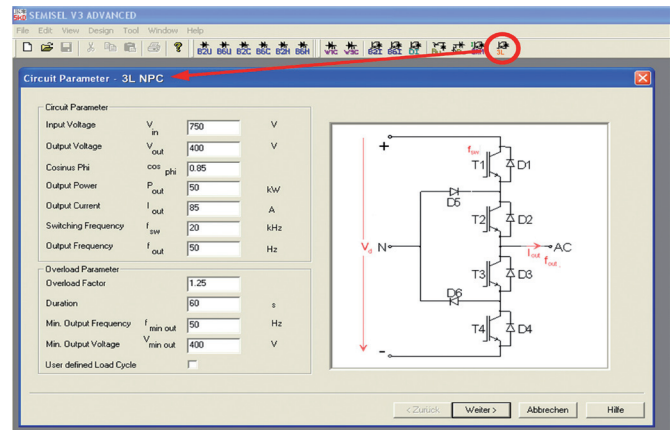


Abbildung 2: Die Betriebswerte des Umrichters können in die 3-Level-SemiSel-Eingabemaske eingegeben werden. Das Programm errechnet daraus die Betriebstemperaturen der Leistungshalbleiter.

A an. Für Hochleistungs-Photovoltaik-Umrichter mit Zwischenkreisspannungen bis 1500V steht auch ein SKiM-Modul mit $V_{CES} = 1200$ V und $I_{c,nom} = 200$ A zur Verfügung.

Berechnung der Verlustleistung im 3-Level-Modul

SemiSel ist eine Software zur Berechnung der Betriebstemperaturen von Halbleitermodulen. Das Programm ist seit 2001 online verfügbar [3]. Seither wurden in drei Updates alle neuen Semikron-Module zur Berechnung der gängigen un- und halb-gesteuerten Gleichrichtertopologien, Wechselrichtertopologien als H-Brücke und Sixpack, Hoch- und Tiefsetzsteller sowie Lösungen für System- und Treiberauswahl implementiert.

Im Gegensatz zu aufwändigen iterativen Simulationsprogrammen verwendet SemiSel einen numerischen Lösungsansatz und benutzt linearisierte Halbleiterkennlinien. Der Vorteil ist eine wesentlich kürzere Rechenzeit, auch bei komplexen Lastzyklen.

Die Erfahrung zeigt, dass die SemiSel-Berechnungen für Standardtopologien gut mit den tatsächlich gemessenen Verhältnissen im Leistungsmodul übereinstimmen. Für die 3-Level-NPC-Topologie wurde ein numerischer Formelsatz entwickelt, um Umrichterkunden ein schnelles und genaues 3-Level Dimensionierungstool zur Verfügung zu stellen. Diese Funktion wird bis Frühjahr 2011 implementiert (Abbildung. 2).

Um von den Eingangsgrößen wie Spannung und Strom zu Betriebstemperaturen der Leistungshalbleiter zu gelangen, sind einige Zwischenschritte notwendig. Zunächst müssen der Mittelwert und der Effektivwert des Stromes durch jeden IGBT und jede Diode im 3-Level-Modul berechnet werden. Mit Hilfe der Ströme können dann sowohl Leit- als auch Schaltverluste bestimmt werden. Im letzten Schritt werden aus Verlustleis-

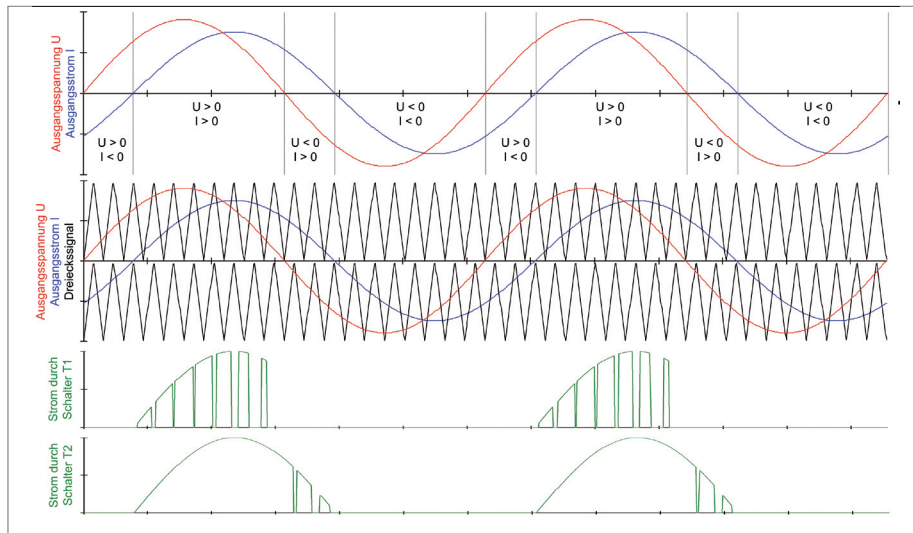


Abbildung 3: Die Grafik zeigt beispielhaft die Ausgangsspannung U und den um den Phasenwinkel verschobenen Ausgangsstrom I an einer induktiven Last. Das Vorzeichen von U und I bestimmt, welche Schalter takten. Das Taktverhältnis, hier für Schalter T1 und T2, wird durch den Vergleich der Referenzspannung mit einem Dreiecksignal bestimmt.

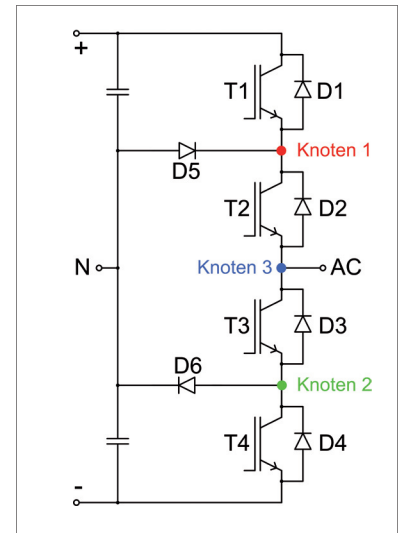


Abbildung 4: Diese zehn Leistungshalbleiter sind in einem Semikron 3-Level-Modul enthalten. Mit drei solchen Zweigen kann ein NPC (Neutral Point Clamped) 3-Level Umrichter aufgebaut werden.

tung und thermischen Eigenschaften des Moduls die Temperaturzyklen berechnet.

Während die Berechnung der Verlustleistungen und des Temperaturzyklus bei 2-Level- und 3-Level-Modulen vergleichbar sind, unterscheidet sich die Berechnung der Chipströme maßgeblich: Im 3-Level-Modul sind pro Zweig zehn Leistungshalbleiter verbaut (vier IGBTs in Reihe samt antiparalleler Dioden und zwei Clamping-Dioden), im Vergleich zu vier Halbleitern im 2-Level-Modul. Daraus ergeben sich mehr mögliche Schaltzustände mit komplexeren Schaltmustern für die einzelnen Schalter.

Um die Schaltmuster der IGBTs zu ermitteln, werden im einfachsten Fall zwei Dreieckssignale mit einem Sinussignal verglichen (siehe Abbildung 3) und daraus die Taktsequenzen (DutyCycle, DC) für die einzelnen Schalter bestimmt. Während die äußeren IGBTs (T1 und T4) in ihrer aktiven Phase den Strom takten, können die inneren Schalter (T2 und T3) in Abhängigkeit des Phasenwinkels auch bis zu einer kompletten Halbwelle dauerhaft eingeschaltet sein.

Der allgemeine Ansatz zur Berechnung der Ströme lautet:

$$I_{avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} DC(\omega t) \cdot I_{pk} \cdot \sin(\omega t - \varphi) d(\omega t)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} DC(\omega t) \cdot I_{pk}^2 \cdot \sin^2(\omega t - \varphi) d(\omega t)}$$

Für jeden der zehn Schalter müssen diese beiden Formeln mit den entsprechenden DutyCycles und Integralgrenzen und

in Abhängigkeit des Phasenwinkels aufgestellt und gelöst werden. Mit den Lösungen der Integrale ist es möglich, die Leit- und Schaltverluste in den Halbleitern zu ermitteln. Lediglich bei den Schaltverlusten der inneren IGBTs ist es notwendig, die Integrale mit anderen Grenzen erneut zu lösen: Diese beiden Schalter takten nicht während einer gesamten Halbwelle, sondern sind auch eine Zeit lang dauerhaft leitend. Während dieser Zeit entstehen keine Schaltverluste. Daher müssen die Integralgrenzen so gesetzt werden, dass eine Berechnung nur innerhalb der Taktzeit erfolgt und nur für diese Zeit Schaltverluste bestimmt werden.

Eine erste Plausibilitätsprüfung der Strommittelwerte erhält man durch Anwenden der Kirchhoff'schen Knotenregel an den drei in Abbildung 4 gezeigten Knoten. Die endgültige Verifizierung erfolgt durch den Vergleich des numerischen Ansatzes mit Simulationen und Messergebnissen.

Zur Berechnung der Leitverluste aus Mittel- und Effektivwert des Stromes wird die Durchlasskennlinie der Halbleiter so linearisiert, dass sie den Bereich des Nennstroms möglichst genau beschreibt. Deshalb liefert SemiSel sehr genaue Ergebnisse in diesem Bereich. Bei sehr kleinen Leistungen mit kleinerem Aussteuergrad und weniger als 20 Prozent des Nennstroms werden statische Verlustleistungen berechnet, die etwas größer sind, als in der Realität. Da das Kühlsystem im Umrichter für den Nennpunkt und Überlastfälle ausgelegt wird, ist es wichtig, die Verlustleistung im Nennpunkt möglichst genau zu bestimmen. Die Abweichung bei kleinen Leistungen spielt keine Rolle.

Zusammenfassung

Mit einem breiten 3-Level-Produktspektrum bietet Semikron Lösungen für verschiedene Montagetechnologien für 3-Level-Inverter mit Ausgangsleistungen zwischen 10 und 300 kVA. Das neue SemiSel-Programm liefert durch die numerischen Berechnungen der Betriebstemperaturen der Halbleiterchips schnelle und genaue Ergebnisse. Deshalb können Inverter-Hersteller schnell entscheiden, welche Topologie und welches Modul für ihre Anwendung die effektivste und kostengünstigste Lösung ist. □

Literatur

- [1] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point clamped PWM inverter," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-17, pp. 518–523, Sept./Oct. 1981.
- [2] M. Ikonen, O. Laakkonen, and M. Kettunen, "Two-Level and Three-Level Converter Comparison in Wind Power Application", www.elkraft.ntnu.no/smolaz2005/Topics/15.pdf
- [3] SemiSel Software: www.semikron.com/?mode=semisel

> [MORE@CLICK MMXXXXXX](#)