

Dreiphasen-USV-Topologie und Wirkungsgradverbesserung

Liao Jen-ch'uan Kuo ch'ao-lung
Delta Electronics, Inc.

Abstract

In Taiwan werden bei der Entwicklung der elektronischen Wissenschaft und Technologie sowie der Halbleiterindustrie zunehmend höhere Anforderungen an die Qualität der Stromversorgung für Präzisionsinstrumente und -geräte in der Fertigung gestellt, was einen erhöhten Bedarf an Dreiphasen-USV-Systemen mit großen Kapazitäten zur Folge hat. Im Zusammenhang mit der Energiekrise und dem Treibhauseffekt ist die Frage, wie sich die USV-Betriebseffizienz steigern und gleichzeitig Energieverbrauch und Betriebskosten senken lassen, ein wichtiger Faktor für USV-Anbieter geworden. Ausgehend von Dreiphasen-USV-Systemen beschreibt dieses Dokument daher eine Methode für die Verbesserung des USV-Wirkungsgrads anhand eines Vergleichs von PFC- und Wechselrichter-Topologien sowie durch Optimierung der Steuerverfahren, Auswahl der wichtigsten Bauteile und -gruppen und Betrieb eines hocheffizienten ECO-Modus. In einer kurzen Einführung werden auch die aktuellen internationalen Bestimmungen für USV-Wirkungsgrade dargestellt.

I. Einführung

Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) dienen zur Bereitstellung einer stabilen Stromversorgung für kritische Lasten, um den Verlust wichtiger Daten aufgrund einer schlechten Stromversorgung zu verhindern. Auf die Qualität der Energieversorgung wirken sich unter anderem folgende Faktoren aus: Über- und Unterspannung, Spannungsspitzen und Störungen, Spannungsflackern, Dreiphasenasymmetrie, harmonische Verzerrung, Frequenzabweichungen und Netzausfälle. Vor dem Hintergrund der Energiekrise und des Treibhauseffekts wird von USV eine verbesserte Umwandlungseffizienz ohne gleichzeitige Beeinträchtigung ihrer Zuverlässigkeit erwartet. Und natürlich sollen sie auch ihre Hauptaufgabe einer stabilen

Stromversorgung erfüllen. Neben dem Umweltschutzeffekt werden durch eine solche Wirkungsgradverbesserung auch Strom- und Betriebskosten reduziert. Wenn wir zum Beispiel davon ausgehen, dass eine 200-kW-USV ihren Wirkungsgrad von 92 % auf 96 % bei Vollastbetrieb verbessert, dann können dadurch jährlich etwa 80.000 kWh Strom eingespart werden. Gleichzeitig können durch eine reduzierte Wärmeabgabe aufgrund des verbesserten USV-Wirkungsgrads auch die Kosten für die Installation von Klimaanlage in Rechenzentren sowie deren Energieverbrauch gesenkt werden. Folglich ist die Verbesserung des USV-Wirkungsgrads ein wichtiges Thema.

In diesem Dokument werden in Abschnitt 2 die Grundtopologien von Dreiphasen-USV-Systemen erläutert und der USV-Aufbau sowie die Betriebsarten kurz vorgestellt. Abschnitt 3 bietet einen Überblick über die aktuellen internationalen Bestimmungen in Bezug auf USV-Wirkungsgrade. Abschnitt 4 beschreibt die PFC-Topologien bei USV-Doppelwandlung, analysiert deren Eigenschaften und stellt ihre Vor- und Nachteile gegenüber. In Abschnitt 5 werden die häufig in USV verwendeten Schaltungstopologien von Wechselrichtern samt ihrer Eigenschaften beschrieben und die Vor- und Nachteile gegenübergestellt. In Abschnitt 6 wird die Beziehung zwischen USV-Steuerverfahren und Wirkungsgrad erläutert. Abschnitt 7 beschreibt und vergleicht mit Leistungsschaltern und magnetischen Bauelementen weitere wichtige Elemente einer USV. Abschnitt 8 stellt den hocheffizienten ECO-Modus vor und in Abschnitt 9 werden die Schlussfolgerungen zusammengefasst.

II. Grundtopologien von USV-Systemen

Die Topologien von USV-Systemen lassen sich in Online-USV, netzinteraktive USV und Offline-USV einteilen. Bei einer Offline-USV wird die Last normalerweise direkt aus dem Netz gespeist. Bei Stromausfällen wird mittels Wechselrichter auf Batteriebetrieb umgeschaltet. Eine netzinteraktive USV unterscheidet sich von einer Offline-USV hauptsächlich dadurch, dass die Last bei einer instabilen Netzeingangsspannung mittels Spannungsregulierung mit einer stabilen Ausgangsspannung versorgt wird. Bei Stromausfällen oder Frequenzabweichungen wird der Strom über die Batterie geliefert. Eine Online-USV mit Doppelwandler verhindert, dass die Ausgangsspannung der USV durch die Qualität der Eingangsspannung beeinträchtigt wird, und versorgt die

Last kontinuierlich mit Strom. Auch bei der Online-USV wird die Last bei Stromausfällen über eine Batterie mit Strom beliefert. Im Hinblick auf ihren Wirkungsgrad stellt sich die Reihenfolge der drei Arten an USV-Systemen folgendermaßen dar: Offline-USV > netzinteraktive USV > Online-USV. Im Hinblick auf die der Last zugeführten Stromqualität ergibt sich folgende Reihenfolge: Online-USV > netzinteraktive USV > Offline-USV.

Die derzeit auf dem Markt erhältlichen Dreiphasen-USV-Systeme sind hauptsächlich Online-USV, daher werden die Grundtopologien der Dreiphasen-Online-USV-Systeme im Folgenden kurz erläutert. Die Grundtopologie einer Dreiphasen-USV besteht hauptsächlich aus einem statischen Bypass-Schalter (Bypass STS), einer Leistungsfaktorkorrektur (PFC), einem Wechselrichter (INV), einem statischen Wechselrichter-Schalter (INV STS) und einer Ladestation (siehe Abb. 1). Normalerweise erfolgt die Ausgabe von Strom über eine USV vorwiegend entlang der Netzversorgungsrouten: → PFC-Schaltung → Wechselrichter → Last, um die Qualität der Stromversorgung sicherzustellen und gleichzeitig die Batterie aufzuladen. Bei einem Ausfall der Netzspannung liefert die USV Strom über ihre Batterie und der Wechselrichter wandelt Gleichstrom in reinen Sinuswellen-Wechselstrom um und versorgt die Last. Wenn die Stromversorgung wieder hergestellt ist, wird die USV wieder über das Netz beliefert. Wenn bei dem Wechselrichter Anomalien festgestellt werden, erfolgt die Stromzufuhr zur USV über den Bypass. Somit ist eine USV eine stabile unterbrechungsfreie Stromversorgung für kritische Lasten, die den Kunden vor riesigen Verlusten durch Stromausfälle schützt. Eine USV fungiert in erster Linie als Brücke für die Stromwandlung zwischen Netzstrom und Last. Bei der Umwandlung von Wechselstrom zu Gleichstrom und zurück zu Wechselstrom kommt es naturgemäß zu Strom- und Umwandlungsverlusten. Im Zusammenhang damit haben viele Länder entsprechende Bestimmungen zur Standardisierung der USV-Umwandlungseffizienz erlassen. Im nächsten Abschnitt werden die internationalen Bestimmungen für USV-Wirkungsgrade vorgestellt.

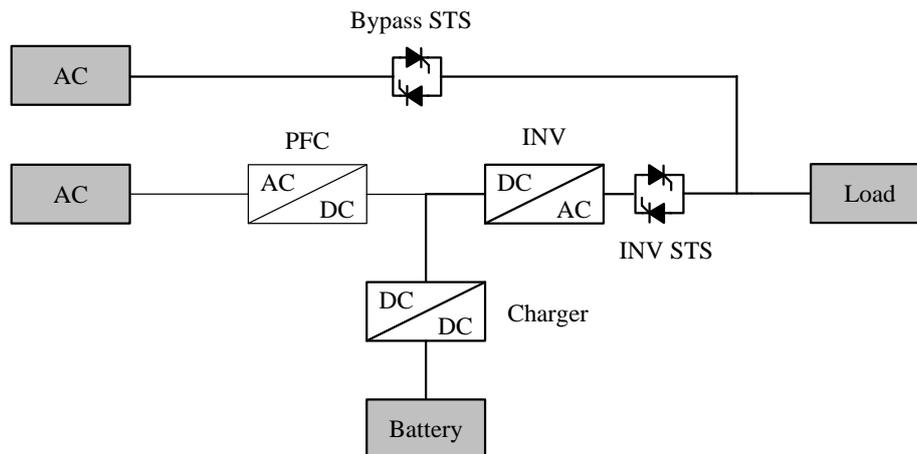


Abb. 1 Grundtopologie einer Dreiphasen-Online-USV

III. Internationale Bestimmungen für USV-Wirkungsgrade

In diesem Abschnitt werden vor allem die internationalen Bestimmungen für USV-Wirkungsgrade in China, Europa und USA (Energy Star) vorgestellt. Abb. 2 zeigt die USV-Wirkungsgradnormen, die vom China Quality Certification Centre (CQC) im April 2011 erlassen wurden. Aus der Tabelle ist zu ersehen, dass der festgelegte normale Wirkungsgrad für große Online-USV-Systeme (größer als 100 kVA) 92 % beträgt.

Abb. 3 zeigt die in Europa im März 2011 festgelegten USV-Wirkungsgradnormen. Aus Abb. 3 ist ersichtlich, dass bei den europäischen Bestimmungen nicht nur nach Leistungsstufe klassifiziert wird, sondern auch nach Lastgröße. Zum Beispiel wird für eine 200-kVA-USV ein Wirkungsgrad von 90 % bei einer Last von 25 % gefordert, von 92,5 % bei 50 % Last sowie 93,5 % bei 75 % Last und 100 % Last.

Abb. 4 zeigt den Entwurf der USV-Wirkungsgradnormen für US Energy Star, die in etwa den chinesischen CQC-Normen entsprechen und in erster Linie eine Klassifizierung nach Betriebsart und Nennleistung vorsehen. Bei Energy Star entspricht VFD (Voltage Frequency Dependent) der vorstehend erläuterten Offline-USV, VI (Voltage Independent) ist eine netzinteraktive USV und VFI (Voltage Frequency Independent) entspricht einer Online-USV. Nehmen wir eine 200-kVA-Online-USV als Beispiel. Gemäß der Energy Star-Norm sollte ihr Wirkungsgrad größer als $0.0099 \times \ln(P) + 0.805$ sein oder 92,58 % betragen.

Um die Anforderungen der internationalen Bestimmungen für USV-Wirkungsgrade einzuhalten und Energieeinsparungs- und Umweltschutzziele gerecht zu werden, sollten bei der Auslegung einer USV PFC-Topologie, INV-Topologie, USV-Steuerverfahren und die Auswahl von Leistungshalbleitern und magnetischen Bauelementen optimiert werden. Nur auf diese Weise können USV-Systeme ihren Kunden einen hohen Wirkungsgrad bieten. Auf den nächsten Seiten dieses Dokuments werden nacheinander PFC-Topologie, INV-Topologie, USV-Steuerverfahren, Auswahl von Leistungshalbleitern und magnetischen Bauelementen sowie Betrieb und Steuerung des ECO-Modus analysiert und verglichen.

China Efficiency Requirement

CQC3108-2011

2011-04-01



分 类	微型在线式	小型在线式	中型在线式	大型在线式	ECO 状态*
技术要求	≥84%	≥88%	≥90%	≥92%	≥97%
*10kVA 及以上者必须具备 ECO 功能					

微型：额定输出容量 < 3 kVA。

小型：额定输出容量 3~10 kVA，不含 10 kVA。

中型：额定输出容量 10 kVA~100 kVA，不含 100 kVA。

大型：额定输出容量 ≥ 100 kVA。

Abb. 1 USV-Wirkungsgradnormen CQC

Mode	from 1-1-2011 to 31-12-2012			
	UPS range: • 10 – < 20 kVA	UPS range: • 20 – < 40 kVA	UPS range: • 40 – < 200 kVA	UPS range: • 200 kVA
Normal mode Minimum efficiency measured according to EN 62040-3 Annex AA				
25 % of nominal power	85,5%	85,5 %	87,8 %	89,8 %
50 % of nominal power	89,8 %	90,3 %	91,3 %	92,3 %
75 % of nominal power	91,3 %	91,8 %	92,5 %	93,3%
100 % of nominal power	91,5 %	92 %	92,5%	93,3 %
Mode	from 1-1-2013 to 31-12-2014			
	UPS range: • 10 – < 20 kVA	UPS range: • 20 – < 40 kVA	UPS range: • 40 – < 200 kVA	UPS range: • 200 kVA
Normal mode Minimum efficiency measured according to EN 62040-3 Annex AA				
25 % of nominal power	86,5%	87,5 %	89,0 %	90,0 %
50 % of nominal power	91,0 %	91,5 %	92,0 %	92,5 %
75 % of nominal power	92,0 %	92,5 %	93,0 %	93,5%
100 % of nominal power	92,0 %	92,5%	93,0%	93,5 %

Abb. 3 Europäische USV-Wirkungsgradnormen

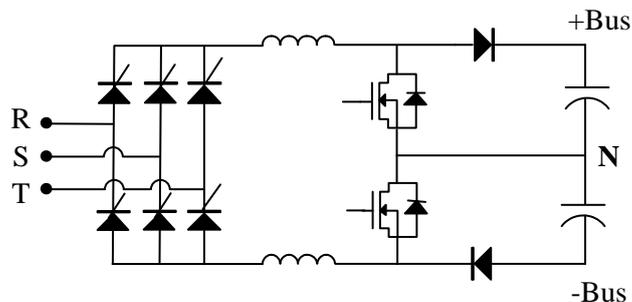
Minimum Average Efficiency Requirement ($Eff_{AVG MIN}$), Where:				
<ul style="list-style-type: none"> • P is the Output Power in watts (W), and • ln is the natural logarithm. 				
UPS Class	Output Power	Input Dependency		
		VFD	VI	VFI
Consumer	$P \leq 1500 \text{ W}$	0.97		
Commercial	$1500 \text{ W} < P \leq 10,000 \text{ W}$	0.97	0.96	$0.0099 \times \ln(P) + 0.805$
Data Center	$P > 10,000 \text{ W}$	0.97	0.95	$0.0099 \times \ln(P) + 0.805$

IV. PFC-Topologie

Der PFC-Schaltkreis dient in erster Linie dazu, eine stabile Gleichstromversorgung zu sichern sowie Oberwellen am Netzeingang zu reduzieren und Blindleistungsverluste zu senken. USV-Systeme sind mit verschiedenen Arten an PFC-Topologien ausgestattet. Alle Topologien haben Stärken und Schwächen im Hinblick darauf, wie sie sich auf den Wirkungsgrad auswirken, daher eignen sie sich für verschiedene Anwendungen, die nachfolgend beschrieben werden.

1. Dreiphasiger Aufwärtswandler mit zwei Schaltern und 3 Stufen

Ein dreiphasiger Aufwärtswandler mit zwei Schaltern und 3 Stufen wird in Abb. 5 dargestellt. Die dreiphasige Stromzufuhr wird zuerst durch eine Dreiphasen-SCR in eine stabile DC-Stromversorgung gleichgerichtet und dann nacheinander durch Induktor, IGBT und Diode geleitet. Da nur zwei IGBTs verwendet werden, zeichnet sich eine solche Topologie durch niedrige Kosten aus. Aufgrund der Verwendung von nur zwei IGBTs können jedoch Leistungsstufen nicht vergrößert werden. Der Nachteil dieser Topologie ist die große Oberwellenverzerrung. Der Vorteil einer solchen dreistufigen Topologie mit zwei Schaltern besteht darin, dass ihre Schaltgruppe nur der Busspannung unterliegt und daher Schalter mit niedriger Haltespannung verwendet werden können, was die Umwandlungseffizienz erhöht.



Ab. 5 Dreiphasiger Aufwärtswandler mit zwei Schaltern und 3 Stufen

2. Dreiphasiger Aufwärtswandler mit sechs Schaltern

Ein dreiphasiger Aufwärtswandler mit sechs Schaltern ist eine gängige Topologie für einen dreiphasigen PFC mit sechs aktiven Schaltern und drei Induktoren, wie in Abb. 6 dargestellt. Sie ist für Hochleistungsanwendungen geeignet. Der größte Nachteil des dreiphasigen Aufwärtswandlers mit sechs Schaltern ist, dass die Schalter auf eine Spannung ausgelegt sein müssen, die doppelt so groß wie die Busspannung ist, was zu einem erheblichen Anstieg der Schaltverluste führt. Folglich haben dreiphasige Aufwärtswandler mit sechs Schaltern im Allgemeinen eine relativ niedrige Schaltfrequenz, um die Schaltverluste zu reduzieren.

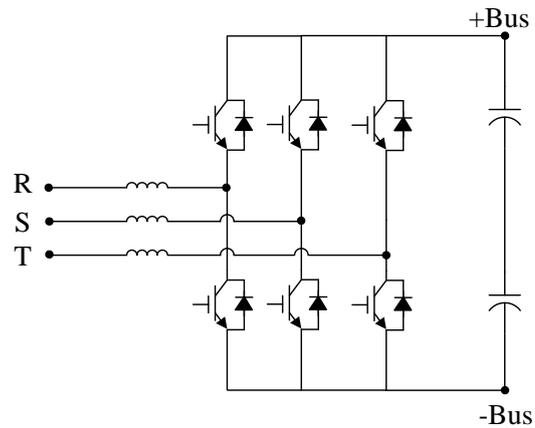


Abb. 6 Dreiphasiger Aufwärtswandler mit sechs Schaltern

3. Aufwärtswandler mit drei Stufen

Die Anwendung eines Aufwärtswandlers mit drei Stufen wird in Abb. 7 dargestellt. Er umfasst sechs Schalter, sechs schnelle Dioden, sechs langsame Dioden und drei Induktoren. Die Schaltgruppe des Aufwärtswandlers mit drei Stufen unterliegt nur der Busspannung, daher können für eine effiziente Reduzierung der Schaltverluste Schalter mit niedriger Haltespannung verwendet werden, was die Umwandlungseffizienz erhöht.

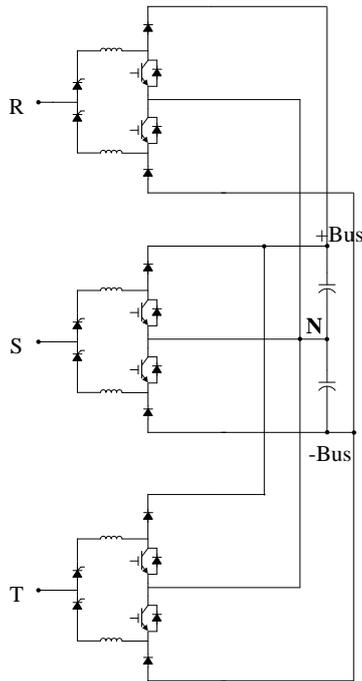


Abb. 7 Aufwärtswandler mit drei Stufen

4. Dreiphasiger Aufwärtswandler mit vier Schaltern

Die Funktionsweise eines dreiphasigen Aufwärtswandlers mit vier Schaltern entspricht der Funktionsweise des Aufwärtswandlers mit drei Stufen, wie in Abb. 8 gezeigt. Hauptmerkmal ist ein vereinfachter Dreistufen-Aufwärtswandler, der mit nur vier Schaltern denselben Effekt wie ein Dreistufen-Wechselrichter erzielen kann. Daher ist er besser für Anwendungen mit hoher Leistungsdichte geeignet. Der dreiphasige Aufwärtswandler mit vier Schaltern ist eine patentierte Topologie von Delta Electronics, mit der USV-Produkte eine hohe Leistungsfähigkeit und Leistungsdichte erreichen können.

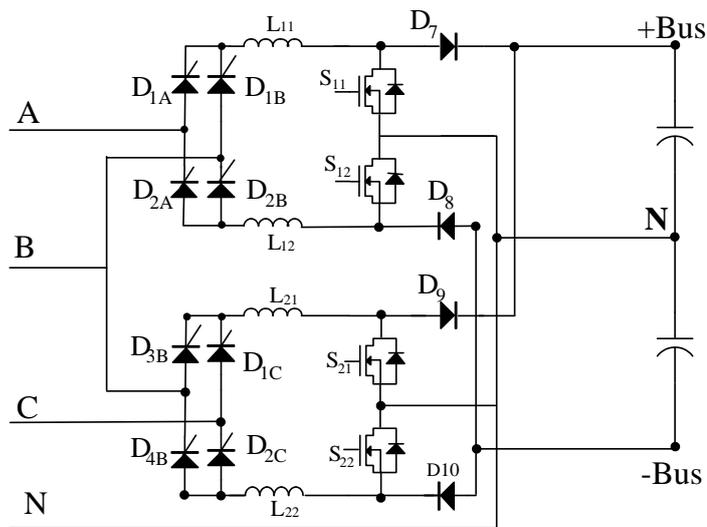


Abb. 8 Dreiphasiger Aufwärtswandler mit vier Schaltern

Tabelle 1 vergleicht die oben aufgeführten vier PFC-Schaltkreise in Bezug auf Oberwellenverzerrung, Wirkungsgrad, Menge an magnetischen Bauelementen, Kosten der Halbleiterbaugruppe und Verfügbarkeit der bidirektionalen Stromflusskapazität.

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass alle vier Topologien Vor- und Nachteile aufweisen. Die geeignete Topologie muss somit unter Berücksichtigung der jeweiligen Anwendung und Produktpositionierung ausgewählt werden.

Tabelle 1 Vergleich von PFC-Schaltkreistopologien

Topologie	Oberwellen- verzerrung	Wirkungs- grad	Menge an magnetischen Bauelementen	Kosten für Halbleite- r-bauteile	Bidirektion- a-ler Stromfluss
Dreiphasiger Aufwärtswandler mit zwei Schaltern und drei Stufen	Schlecht	Hoch	2	Niedrig	Nein
Dreiphasiger Aufwärtswandler mit sechs Schaltern	Gut	Hoch	3	Mittel	Ja
Aufwärtswandler mit drei Stufen	Gut	Relativ hoch	6	Hoch	Nein
Dreiphasiger Aufwärtswandler mit vier Schaltern	Gut	Relativ hoch	4	Mittel	Nein

V. Topologie der Wechselrichter

1. Dreiphasiger isolierter Vollbrücken-Wechselrichter

Ein dreiphasiger isolierter Vollbrücken-Wechselrichter wird in Abb. 9 dargestellt. Er hat eine relativ niedrige Busspannung und erzeugt hauptsächlich eine Verstärkung und einen N-Leiter über einen am Ausgang isolierten Wandler zur Belieferung der Last. Da der am Ausgang isolierte Wandler nicht nur groß und schwer ist, sondern auch einen hohen Stromverlust aufweist, ist der Wirkungsgrad eines dreiphasigen isolierten Vollbrücken-Wechselrichters relativ niedrig.

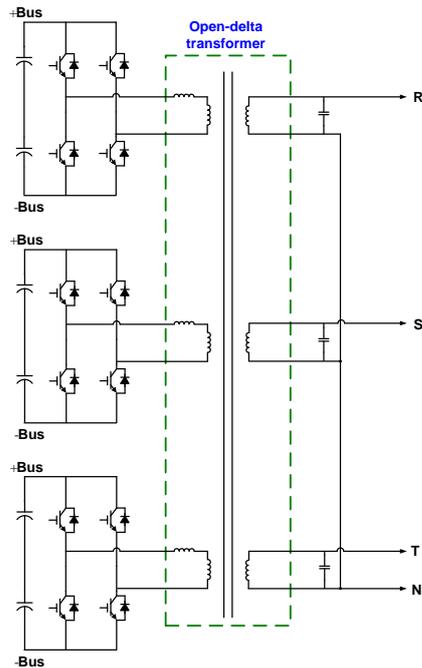


Abb. 9 Dreiphasiger isolierter Vollbrücken-Wechselrichter

2. Dreiphasiger Zweistufen-Wechselrichter

Ein dreiphasiger Zweistufen-Wechselrichter wird in Abb. 10 dargestellt. Hauptnachteil ist, dass die Schaltgruppe eine mehr als doppelt so große Haltespannung wie die Busspannung aufweisen muss, was die Schaltfrequenz einschränkt. Daher gehören die Auswahl einer Schaltfrequenz und die Änderung des Steuerungsalgorithmus zur Erhöhung der Umwandlungseffizienz der Zweistufen-Topologie zu den wichtigsten Faktoren bei der Auslegung.

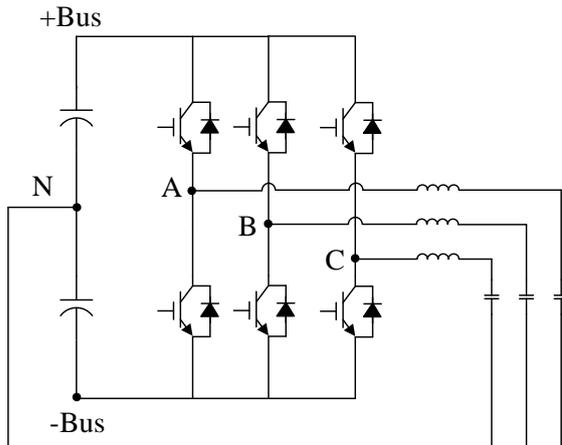


Abb. 10 Dreiphasiger Zweistufenwechselrichter

3. Dreiphasiger Dreistufen-Wechselrichter

Ein dreiphasiger Dreistufen-Wechselrichter wird in Abb. 11 dargestellt. Ebenso wie beim Dreistufen-Aufwärtswandler unterliegt die Schaltgruppe nur der Busspannung, daher ist diese Topologie von Natur aus hocheffizient. Obwohl die Topologie eines dreiphasigen Dreistufen-Wechselrichters viele Schaltgruppen erfordert, kann die Dreistufentopologie den Vorteil geringer Induktor-Stromwelligkeit, wenig Querspannung der Schaltgruppe und niedrige Leistungsverluste aufweisen, daher wird sie häufig in hocheffizienten USV-Topologien eingesetzt.

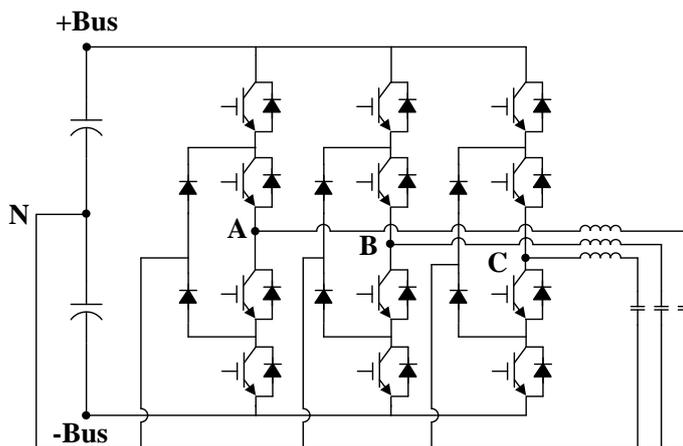


Abb. 11 Dreiphasiger Dreistufen-Wechselrichter

Tabelle 2 vergleicht die oben aufgeführten drei Wechselrichter-Topologien in Bezug auf Oberwellenverzerrung der Ausgangsspannung, Wirkungsgrad, Menge an magnetischen Bauelementen, Kosten der Halbleiterbaugruppe und Verfügbarkeit der bidirektionalen Stromflusskapazität. Derzeit geht der Trend dazu, Topologien ohne Wandler zu verwenden.

Tabelle 2 Vergleich von Wechselrichtertopologien

Topologie	Spannungsoberwellenverzerrung	Wirkungsgrad	Menge an magnetischen Bauelementen	Kosten für Halbleiterkomponenten	Bidirektionaler Stromfluss
Dreiphasiger Dreistufenwechselrichter	Gut	Hoch	3	Niedrig	Ja
Dreiphasiger Zweistufenwechselrichter	Gut	Am höchsten	3	Hoch	Ja
Dreiphasiger isolierter Vollbrückenwandler	Gut	Schlecht	3 (groß)	Hoch	Ja

VI. USV-Steuerverfahren

Für das Steuerverfahren eines USV-Wechselrichters wird gewöhnlich eine SPWM (sinusförmige Puls-Weiten-Modulation) für die Pulsweitenmodulation eingesetzt, wie in Abb. 12 dargestellt. Das Steuersignal (V_{ctrl}) wird mit Dreieckwellen verglichen, um ein PWM-Signal zur Betätigung der Schaltgruppe zu erzeugen. Die SPWM in Wechselrichter-Anwendungen hat eine Busspannungsausnutzung von 0,866, d. h. die Busspannung in einem 380-Vac-System sollte mindestens größer als 620 V sein. Da dieses Steuerverfahren eine niedrige Ausnutzung der Busspannung hat, wird eine hohe Busspannung benötigt, wodurch der Schaltverlust des Schaltbauteils steigt. Bei einer hohen Busspannung steigt die Spannungsbeanspruchung des

Schaltbauteils entsprechend und es müssen einige Snubber-Schaltkreise hinzugefügt werden, um die Spannungsspitzen zu absorbieren, was wiederum den Stromverlust erhöht. Wenn daher die Ausnutzung der Busspannung durch veränderte Steuerverfahren verbessert werden kann, erhöht sich der Systemwirkungsgrad entsprechend.

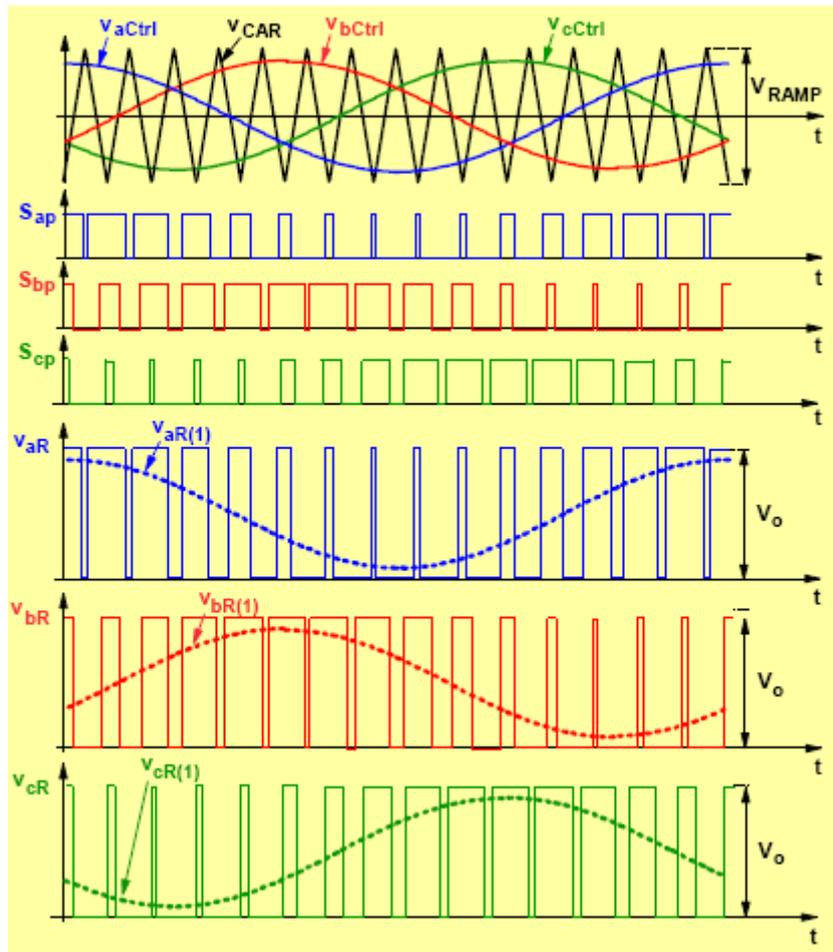


Abb. 12 Dreiphasiges SPWM-Stuerverfahren

Wie in Abb. 13 dargestellt, wird eine dritte Oberwelle V_z in das Originalsteuersignal (V_{ctrl}) injiziert und das dabei erzeugte neue Steuersignal wird anschließend mit der Dreieckswelle verglichen, um ein PWM-Signal für die Betätigung des Schaltbauteils zu erzeugen. Dieses Verfahren zur Oberwelleninjektion kann die Ausnutzung der Busspannung effektiv von 0,866 auf 1 erhöhen. In anderen Worten heißt das, dass mit der Oberwelleninjektion

ein System, das ursprünglich eine Busspannung von 620 V benötigte, nun nur noch 540 V benötigt. Wie wirkt sich die Reduzierung der Busspannung von 620 V auf 540 V auf den Wirkungsgrad aus? Bei einem 200-kW-Wechselrichter mit einer Schaltfrequenz von 5 kHz wird der Schaltverlust des Schaltbauteils in einem System mit 540 V Busspannung im Vergleich zu einem System mit 620 V Busspannung um 250 W gesenkt.

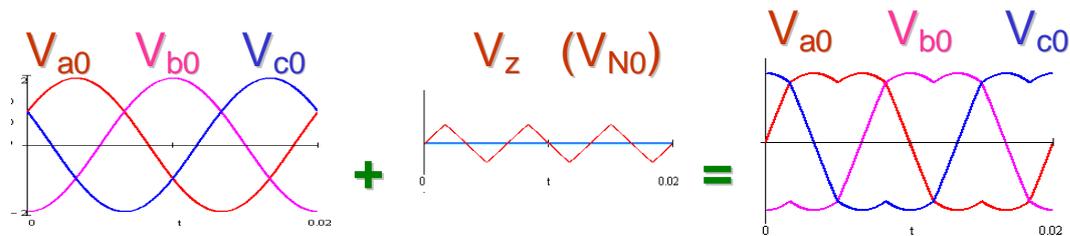


Abb. 13 Dreiphasige SPWM-Steuerung und Oberwelleninjektion

Dem obigen Beispiel lässt sich entnehmen, dass die USV-Umwandlungseffizienz durch verbesserte SPWM-Steuerverfahren erhöht wird, sodass die USV den Anforderungen an hohen Wirkungsgrad und Energieeinsparung besser gerecht wird. In allgemeinen USV-Topologien wirken sich neben der Topologie-Auswahl und den Steuerverfahren unter anderem hauptsächlich folgende Faktoren auf den Gesamtverlust der Einheit aus: Auswahl und Auslegung von Leistungsschaltern und magnetischen Bauelementen, die eine große Auswirkung auf den Wirkungsgrad haben können. Dies wird ausführlich im nächsten Abschnitt beschrieben.

VII. Auswahl von Leistungsschaltern und magnetischen Bauelementen

1. Leistungsschalter-Bauteil

Zu den bei USV-Systemen am häufigsten eingesetzten Leistungsschaltergruppen gehören der Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET) und der Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT). Im Folgenden wird vereinfacht dargestellt, wie diese beiden Bauteilarten verwendet werden: MOSFET wird hauptsächlich in Anwendungen mit relativ kleiner Haltespannung und kleinem Haltestrom eingesetzt, während sich ein

IGBT-Transistor für Anwendungen mit großer Haltespannung und großem Haltestrom eignet.

Der bei USV derzeit am häufigsten verwendete MOSFET ist CoolMOS, da CoolMOS einen niedrigen Durchlasswiderstand $R_{ds,on}$ und niedrige Leitungsverluste aufweist und somit auch hohe Stromspitzen aushalten kann. Daher werden für USV-Anlagen mit kleiner Leistung (unter 20 kVA) häufig MOSFETs eingesetzt. Obwohl sich der IGBT-Transistor in Bezug auf Schaltgeschwindigkeit und Schaltverlust nicht mit einem MOSFET-Transistor messen kann, hat er eine höhere Verarbeitungskapazität. Aus diesem Grund werden IGBT-Transistoren häufig für Hochleistungsanwendungen verwendet.

Nehmen wir beispielsweise eine 200-kW-USV und vergleichen wir den jeweiligen IGBT-Verlust. Zum Vergleich wird eine PFC-Topologie mit dreiphasigem Aufwärtswandler mit sechs Schaltern gewählt sowie eine INV-Topologie mit dreiphasigem Zweistufen-Wechselrichter. Auf dieser Basis vergleichen wir die IGBT-Verluste bei verschiedenen Schaltfrequenzen und Busspannungen und die Verluste der IGBT-Module von unterschiedlichen Anbietern.

Abb. 14 vergleicht IGBT-Verluste bei verschiedenen Schaltfrequenzen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der IGBT-Verlust mit steigender Schaltfrequenz ebenfalls wächst. Der IGBT-Verlust bei einer Schaltfrequenz von 2 kHz beläuft sich etwa auf ein Fünftel des Verlusts bei einer 20-kHz-Schaltfrequenz. Obwohl der IGBT-Verlust bei einer niedrigeren Schaltfrequenz kleiner ist, gehen Kosten für ein größeres magnetisches Bauelement damit einher, was zu größeren Verlusten des magnetischen Bauelements und einer niedrigeren Reaktionsgeschwindigkeit und schlechter Bandbreite führt. Die Auswahl der Schaltfrequenz wirkt sich direkt auf den USV-Wirkungsgrad aus, aber auch andere Bedingungen sollten geprüft werden, um einen guten Schaltfrequenzpunkt zu finden, der für den Anlagenwirkungsgrad günstig ist.

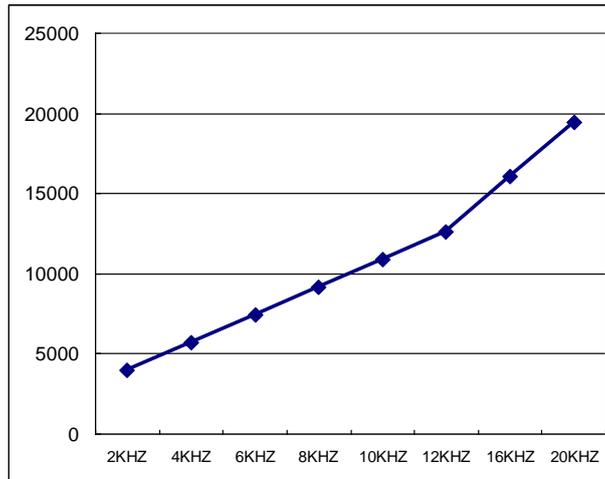


Abb. 14 Analyse der IGBT-Verluste bei verschiedenen Schaltfrequenzen (200-kW-USV; Eingangs- und Ausgangsspannung: 380/220 V; Busspannung: 800 V)

Abb. 15 zeigt eine Analyse von IGBT-Verlusten bei verschiedenen Busspannungen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der IGBT-Verlust umso höher ist, je höher die Busspannung ist. Die Busspannung wirkt sich in erster Linie auf den Schaltverlust der IGBT aus und hat kaum Auswirkung auf den Leitungsverlust. Die Abbildung macht deutlich, dass es auch ein wichtiger Indikator für den USV-Wirkungsgrad ist, wie eine niedrige Busspannung in USV-Systemen erreicht wird.

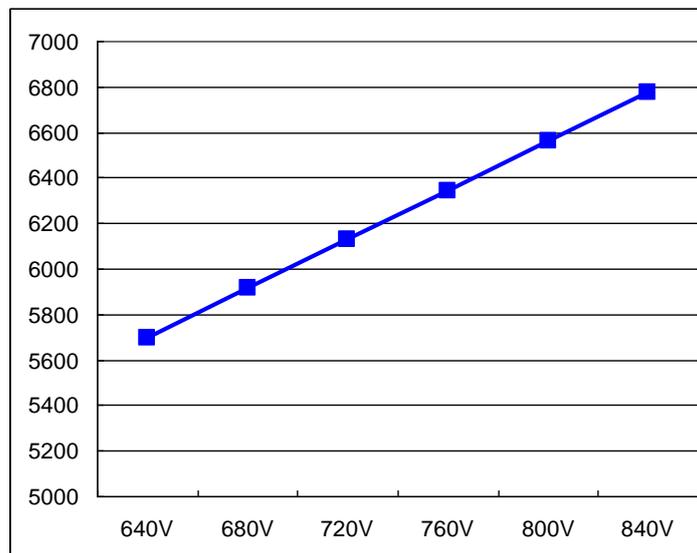


Abb. 15 Analyse von IGBT-Verlusten bei verschiedenen Busspannungen (200-kW-USV; Eingangs- und Ausgangsspannung: 380/220 V; Schaltfrequenz: 5 kHz)

Tabelle 3 vergleicht die Verluste verschiedener IGBT-Module unter den gleichen Prüfbedingungen. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass unterschiedliche IGBT-Module auch mit dem gleichen Paket und der gleichen Größe verschiedene Stromverluste haben können und die Unterschiede dabei bis zu 20 % ausmachen können. Daher ist für einen besseren USV-Wirkungsgrad besonders auf die unterschiedlichen Merkmale und die Auswahl der richtigen IGBT zu achten.

Tabelle 3 Verlustanalyse der IGBTs von verschiedenen Anbietern
(200-kW-USV; Eingangs- und Ausgangsspannung: 380/220 V; Schaltfrequenz: 5 kHz)

	A	B	C	D	E
Leitungsverlust PFC	1165	1290	1066	1020	1141
Schaltverlust PFC	2208	2542	2391	2479	1948
Leitungsverlust INV	1087	1105	1017	1022	1165
Schaltverlust INV	2133	2428	2294	2383	1857
Gesamtverlust	6593	7365	6768	6904	6111

2. Magnetisches Bauelement

Auch die Verluste magnetischer Bauelemente tragen beträchtlich zu den Verlusten der USV-Anlage bei. Bei der Auswahl eines magnetischen Bauelements sind Schaltfrequenz und Topologie die wichtigsten Faktoren. Die Auslegung magnetischer Bauelemente hängt in erster Linie vom Ripplestrom beim Schalten ab, der Topologie und Schaltfrequenz unterliegt. Zum Beispiel ist der von einem Dreiphasen-Wechselrichter mit zwei Stufen benötigte Induktivitätswert größer als der für einen Dreiphasen-Wechselrichter mit drei Stufen benötigte Wert. Das liegt hauptsächlich daran, dass die Querspannung des Induktors eines Dreiphasen-Wechselrichters mit zwei Stufen größer ist.

Auch die Schaltfrequenz wirkt sich direkt auf den Rippelstrom eines Induktors aus. Im Allgemeinen gilt, dass je höher die Schaltfrequenz, desto geringer der benötigte Induktivitätswert und Verlust der magnetischen Baugruppe.

Neben Schaltfrequenz und Topologie werden die Verluste magnetischer Bauelemente auch durch die Materialien beeinflusst, aus denen sie bestehen. Üblicherweise setzen sich magnetische Bauelemente aus Siliziumstahlblech, amorphen Legierungen und einem Eisenpulverkern usw. zusammen. Eisenkerne aus anderen Materialien sind in entsprechenden Anwendungen zu finden. Daher ist auch die Auswahl der richtigen Materialien für magnetische Bauelemente ein wichtiger Faktor für den USV-Wirkungsgrad. Siliziumstahlblech wird meistens bei Anwendungen mit niedriger Schaltfrequenz verwendet. Eine hohe Schaltfrequenz erhöht den Eisenverlust des Siliziumstahlblechs erheblich und verringert dadurch den USV-Wirkungsgrad. Die Verwendung von amorphen Legierungen und Eisenpulverkernen ist in USV-Systemen wegen des geringen Eisenverlusts gemeinhin sehr verbreitet. Es gibt verschiedene Arten an Eisenpulverkernen, wie beispielsweise MPP, High Flux, Mage Flux und Sendust, daher ist die Auswahl des richtigen Eisenpulverkerns für Ihre Anwendung für die Sicherstellung des USV-Wirkungsgrads von großer Bedeutung.

VIII. Hocheffizienzbetrieb im ECO-Modus

Der ECO-Modus läuft folgendermaßen ab: Bei normaler Stromversorgung erhält die Last ihre Energie direkt aus dem Netz und der Wechselrichter befindet sich im Status „Keine Last“. Bei einem Stromausfall wird die Last über den Wechselrichter versorgt, siehe Abb. 16 und 17. Hauptvorteil des ECO-Modus sind die hohen Energieeinsparungen. Der USV-Wirkungsgrad bei Doppelwandlung beläuft sich im Allgemeinen auf 92 %~94 %. Beim Betrieb im ECO-Modus erhöht sich der Wirkungsgrad auf über 98 %. Größter Nachteil des ECO-Modus ist, dass er bei einem Netzausfall Schaltzeit für den Transfer vom Bypass-Modus in den Wechselrichtermodus benötigt. Vor allem bei induktiven Lasten wie bei einem Wandler birgt die Phasentrennung von Netzversorgung und Wechselrichterspannung bei einem solchen Transfer das

Risiko, dass der Transfer fehlschlägt und die Stromzufuhr unterbrochen wird. Das patentierte Steuerverfahren für den Transfer auf den ECO-Modus von Delta Electronics nutzt einen Schnellsteuer- und Erkennungsmechanismus für die Phasenverriegelung, um die Transferzeit wesentlich zu verringern und das Risiko eines fehlgeschlagenen Transfers durch Entriegelung zu beseitigen, siehe Abb. 18.

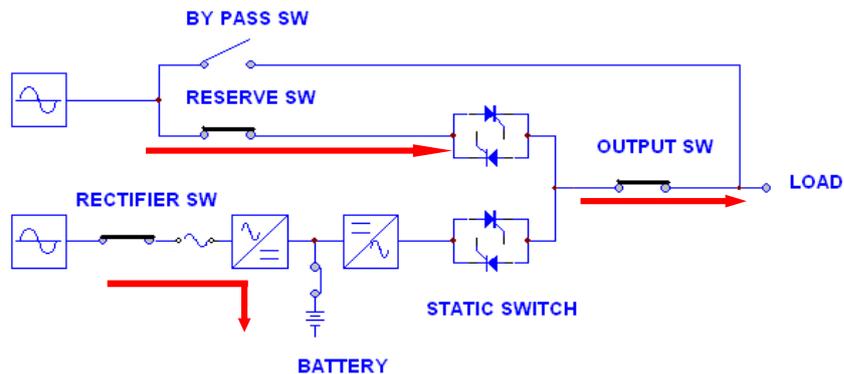


Abb. 16 ECO-Modus bei normaler Netzversorgung

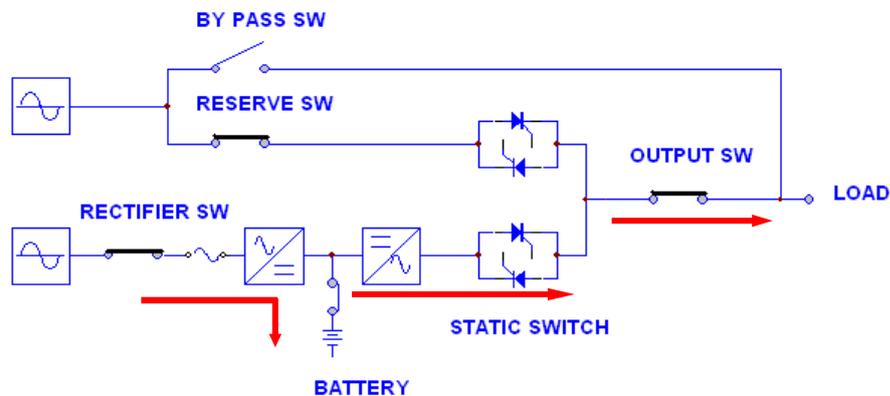
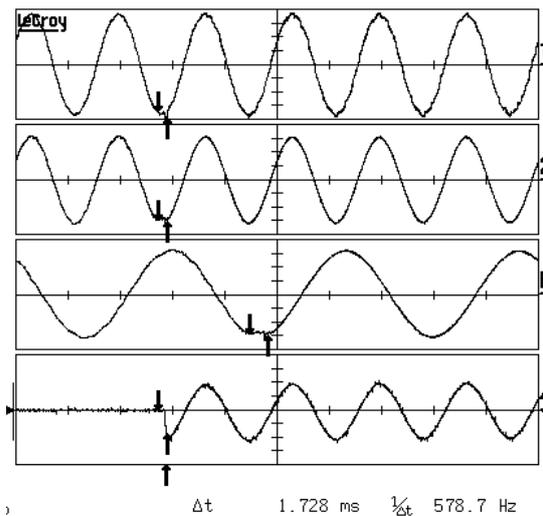


Abb. 17 ECO-Modus bei anomaler Netzversorgung



Prüfbedingung:

BYPASS-MODUS → INV. MODUS

CH1:R Phase Bypass-Spannung (100 V/DIV)

CH2:R Phase O/P-Spannung (100 V/DIV)

CH3:R Phase O/P-Spannung ZOOM (100 V/DIV)

CH4:R Phase INV. Strom (100 A/DIV)

Transferzeit 1.728 ms

Abb. 18 ECO-Modus Transfer-Wellenformen

IX. Schlussfolgerungen

Dieses Dokument bietet eine Einführung zu dreiphasigen USV-Topologien und erläutert, wie die USV-Umwandlungseffizienz durch eine Optimierung von Schaltungstopologie, Steuerverfahren und eine Kombination aus wichtigen Bauteilen und -gruppen verbessert werden kann. Das große und leistungsfähige Dreiphasen-USV-System von Delta Electronics konnte das Ziel eines hohen Wirkungsgrads sowie die Anforderungen an Hochleistung durch die vorstehend genannte Optimierung der Schaltungstopologien, Steuerverfahren und Leistungsbauteile und -gruppen erfüllen. Abb. 19 stellt die Wirkungsgradkurven einer 200-kVA-USV dar, die von einem Zertifizierungsinstitut gemessen wurden. Der höchste Wirkungsgrad kann bis zu 96,43 % bei Doppelwandlung betragen (Online-Modus) und 99,17 % bei einer Stromversorgung im ECO-Modus

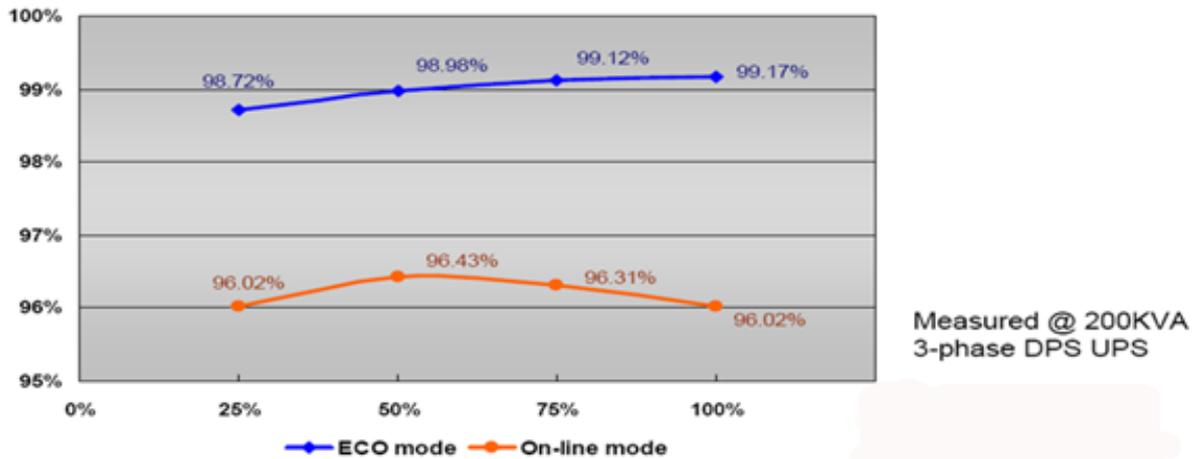


Abb. 19 Wirkungsgradkurven für die USV von Delta Electronics

X. Referenzen

1. Relationship between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis, IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 49, NO. 1. Februar 2002
2. High Performance Power Converter Systems for Nonlinear and Unbalanced Load/Source, Thesis , Virginia Tech, 1999
3. Analysis and Comparison of Space Vector Modulation Schemes for Three-leg and Four-leg Voltage Source Inverters, Virginia tech. thesis, 1997