

EMV- und Effizienzvergleich von hart und weich schaltenden 3 Stufen - Pulswechselrichtern

Prof. Dr. Manfred W. Gekeler, HTWG Konstanz, University of Applied Sciences,
Brauneggerstraße 55, D-78464 Konstanz, gekeler@htwg-konstanz.de

B. Eng. Stefan Schreitmüller, HTWG Konstanz, University of Applied Sciences,
Brauneggerstraße 55, D-78464 Konstanz, stefan.schreitmuller@gmx.de

Prof. Dr. Gunter Voigt, HTWG Konstanz, University of Applied Sciences,
Brauneggerstraße 55, D-78464 Konstanz, gvoigt@htwg-konstanz.de

1 Kurzfassung

3 Stufen - Pulswechselrichter (3 Level Inverter) werden eingesetzt in der elektrischen Drehstromantriebstechnik, als Netzeinspeisewechselrichter z.B. in der Photovoltaik oder als Aktive Leistungs-Netzfilter. Neben den bislang üblichen hart schaltenden Ausführungen gibt es seit kurzem mit dem „Soft Switching Three Level Inverter (S3L Inverter)“ eine weich schaltende Version mit geringeren Schaltverlusten und damit höherer Effizienz. Zusätzlich zeigt der S3L Inverter aufgrund der weichen Schaltvorgänge auch Vorteile hinsichtlich der Elektromagnetischen Verträglichkeit, insbesondere in der als „Super Soft Switching Three Level Inverter (SS3L Inverter)“ bezeichneten Varianten.

2 3 Stufen Pulswechselrichter

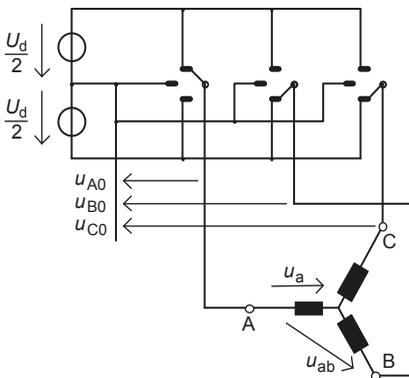


Abb. 1: Prinzipschaltbild eines 3-phasigen 3 Stufen PWR (mit Schaltern)

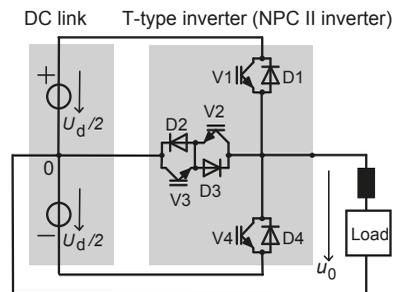


Abb. 2: 1-phasiger hart schaltender 3 Stufen NPC II (T-Type) PWR

3 Stufen - Pulswechselrichter (3 Level Inverter) werden mit Leistungen ab ca. 50 kVA bis in den MVA-Bereich eingesetzt in der elektrischen Drehstromantriebstechnik, als Netzeinspeisewechselrichter, in USV Anlagen oder als Aktive Leistungs-Netzfilter. Als Schalter (Abb. 1) werden heute insbesondere IGBTs verwendet. Im 3 Level Inverter

nehmen die Klemmenspannungen u_0 je nach Schalterstellung einen der 3 Werte $+U_d/2$, 0 oder $-U_d/2$ an. Die Schalter werden gemäß einer Pulsweitenmodulation (PWM) mit Schaltfrequenzen von einigen Hundert Hz bis ca. 18 kHz betätigt.

2.1 Hart schaltende 3 Stufen PWR (H3L Inverter)

Diese Ausführung (Abb.2) wurde als NPC II Inverter bereits 1980 in [1] vorgeschlagen. Die beiden äußeren IGBTs V1 und V4 bilden zusammen mit den antiparallel geschalteten Dioden D1 und D4 einen herkömmlichen 2 Stufen Pulswechselrichter. Mit den IGBTs V2 und V3 sowie den zugehörigen Dioden D2 und D3 entsteht ein schaltbarer Pfad zum Mittelabgriff der Eingangsgleichspannung U_d , mit dem die Klemmenspannung u_0 auf den Wert Null geschaltet werden kann.

Diese auch als T-Type Inverter bekannte Ausführung weist besonders geringe Durchlassverluste auf und somit einen hohen Wirkungsgrad [2]. Der wesentliche Grund hierfür liegt darin, dass dann, wenn V1 bzw. D1 oder V4 bzw. D4 leitend sind, nur ein Leistungshalbleiter von Strom durchflossen ist. Im Gegensatz dazu sind es beim NPC I Inverter zwei Leistungshalbleiter, was einen doppelten Wert der Durchlassspannung bedeutet [1]. Als Schalter werden meist IGBTs eingesetzt; seit kurzem auch als Module.

Schaltverluste entstehen, wenn beim Ein- bzw. Ausschalten eines IGBTs gleichzeitig hohe Werte von Spannung und Strom auftreten, was als „hartes“ Schalten bezeichnet wird [3]. Abb. 3a zeigt ein Beispiel mit den Zeitverläufen der Kollektor-Emitter-Spannung $u_{CE}(t)$ und des Kollektorstroms $i_C(t)$ während eines Einschaltvorgangs. Die Einschaltverlustenergie E_{on} wurde mit 4,5 mJ gemessen.

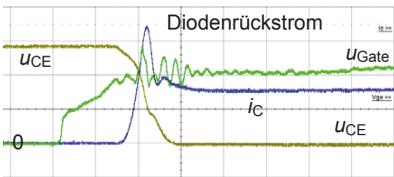


Abb. 3a: harter Ausschaltvorgang
Verlustenergie $E_{on} = 4,5$ mJ

$u_{CE} : 200$ V/div; $i_C : 50$ A/div; $u_{Gate} : 10$ V/div; $t : 200$ ns/div

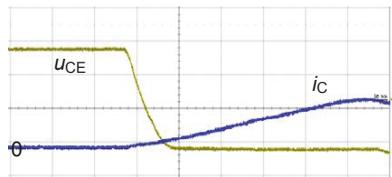


Abb. 3b: weicher Ausschaltvorgang
Verlustenergie $E_{on} = 0,1$ mJ

Diese Schaltverluste können insbesondere bei höheren Werten der Schaltfrequenz zeitliche Mittelwerte erreichen, die die Durchlassverluste deutlich übersteigen und sind daher hinsichtlich der Schaltfrequenz der limitierende Faktor. Der heute übliche Ansatz zur Reduzierung der Schaltverluste und damit der Erhöhung des Wirkungsgrads besteht darin, die Dauer der Schaltvorgänge so kurz wie möglich zu halten, also Transistoren mit möglichst geringen Schaltzeiten einzusetzen.

Solche kurze Schaltzeiten verringern zwar wie gewünscht die Schaltverluste, die hohen Stromsteilheiten dI/dt während der Schaltvorgänge induzieren jedoch an den parasitären Induktivitäten der Verbindungsleitungen erhebliche Spannungsspitzen. Die hohen Spannungssteilheiten dU/dt , die bei Silizium-IGBTs Werte bis ca. 5 kV/ μ s und bei SiC deutlich über 10 kV/ μ s betragen können, wirken sich negativ auf die Störemissionen aus.

2.2 Weich schaltende 3 Stufen PWR

Mit dem im Folgenden beschriebenen weich schaltenden 3 Stufen Pulswechselrichter gelingt es, sowohl die Schaltverluste äußerst gering zu halten als auch die Spannungssteilheiten du/dt sowie die Stromsteilheiten di/dt auf niedrige Werte zu begrenzen. Parasitäre Leitungsinduktivitäten sind daher weniger kritisch, und die Störemission wird reduziert.

2.2.1 Soft Switching Three Level Inverter (S3L Inverter)

Diese neuartige und patentierte [4] Schaltungstopologie (Abb. 4) wurde erstmals 2011 vorgestellt [5] [6]. Ausgangspunkt ist der T-Type Inverter (NPC II Inverter, Abb. 2). Dieser wurde um ein Netzwerk aus 4 Dioden, 2 Kondensatoren und 1 Spule erweitert (Abb. 4, „S3L snubber circuit“). Dieses Netzwerk bewirkt, dass jeder Ein- bzw. Ausschaltvorgang eines der 4 IGBTs „weich“ abläuft [5] [6] [7] [8]. Diese Schaltentlastung arbeitet prinzipbedingt verlustfrei. Abb. 4 zeigt, dass keinerlei ohmsche Widerstände vorgesehen sind, wie dies bei verlustbehafteten Entlastungsnetzwerken der Fall ist.

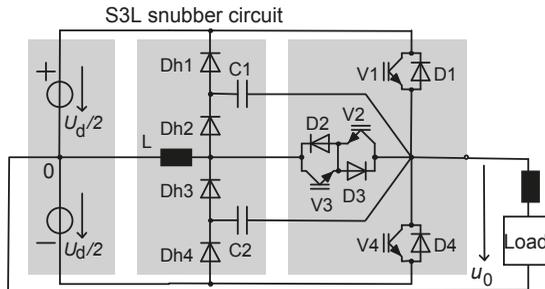


Abb. 4: Weich schaltender 3-Stufen PWR (Soft Switching Three Level (S3L) Inverter)

Abb. 3b zeigt beispielhaft, wie sich bei diesem weichen Schalten die Zeitverläufe für $u_{CE}(t)$ und $i_C(t)$ gegenüber dem harten Schalten nach Abb. 3a verändert haben. Die Kollektorspannung fällt schnell auf den niedrigen Wert der Durchlassspannung, während der Kollektorstrom nur langsam mit niedriger Stromsteilheit di/dt ansteigt. Das gleichzeitige Auftreten von Spannung und Strom wird vermieden, die Verlustleistung bleibt sehr gering. Die Einschaltverlustenergie E_{on} sinkt von 4,5 mJ auf 0,1 mJ.

Bei einem Prototypen mit einer Leistung von 20 kVA ergaben sich Werte $di/dt < 28$ A/ μ s und $du/dt < 1000$ V/ μ s. Werte $du/dt < 500$ V/ μ s sind einstellbar. Bei hart schaltenden Si IGBTs ergeben sich dagegen bis zu ca. 5000 V/ μ s, bei SiC IGBTs bis ca. 50000 V/ μ s.

Beim S3L Inverter entstehen hohe Werte der Spannungssteilheit nur beim Einschalten der äußeren IGBTs V1 bzw. V4, in allen anderen Fällen liegt eine du/dt Limitierung vor. Damit sind Störspannungen deutlich reduziert.

2.2.2 Super Soft Switching Three Level Inverter (SS3L Inverter)

Mit einer einfachen Modifikation des S3L Inverters lassen sich die vorgenannten Spannungssteilheiten auch beim Einschalten der äußeren IGBTs begrenzen. Um Spannungssteilheiten beim Einschalten von IGBTs zu verringern kann in bekannter

Weise die Einschaltzeit dadurch vergrößert werden, dass der Anstieg der Gate-Emitter-Spannung verzögert wird. Dies geschieht im einfachsten Fall durch einen nur beim Einschalten wirksamen Gate Vorwiderstand (Abb. 5).

Bei hart schaltenden Wechselrichtern hat diese Methode den gravierenden Nachteil, dass die Einschaltverluste drastisch ansteigen. Beim S3L Inverter ist dagegen die Stromanstiegsgeschwindigkeit beim Einschalten der IGBTs durch die Spule L begrenzt (vgl. Abb. 3b oder 6a). Wenn nun beim langsamen Einschalten des IGBTs dessen Kollektor-Emitter-Spannung vergleichsweise langsam fällt und der Kollektorstrom nur langsam ansteigt, tauchen gleichzeitig hohe Werte von Spannung und Strom nur begrenzt auf (Abb. 6b). Diese Variante des S3L Inverter wird als „Super Soft Switching Three Level (SS3L) Inverter“ (Abb. 5) bezeichnet.

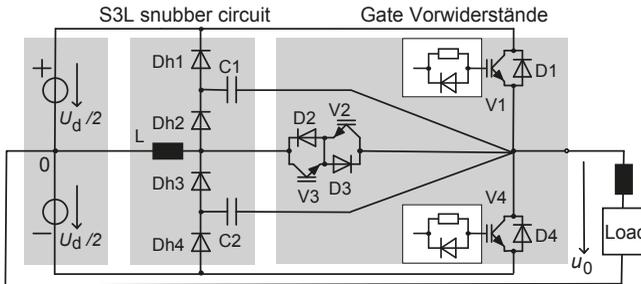


Abb. 5: Super Soft Switching Three Level (SS3L) Inverter
Die Gate-Vorwiderstände bewirken ein langsames Einschalten von V1 und V4.

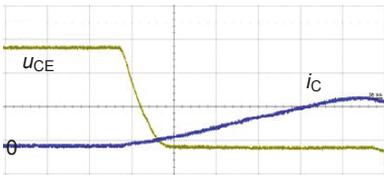


Abb. 6a: Ausschaltvorgang S3L Inverter
 i_c : 50 A/div
 u_{CE} : 200 V/div; t : 200 ns/div
Verlustenergie $E_{on} = 0,1$ mJ

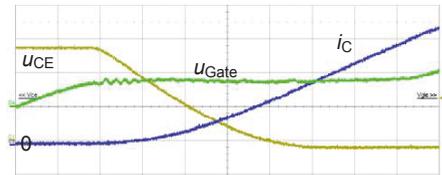


Abb. 6b: Ausschaltvorgang SS3L Inverter
 i_c : 25 A/div; u_{Gate} : 10 V/div
 u_{CE} : 200 V/div; t : 200 ns/div
Verlustenergie $E_{on} = 1,5$ mJ

3 EMV- und Effizienzvergleich

Um einen direkten Vergleich der drei Schaltungstopologien H3L, S3L und SS3L sowie verschiedener Steuerverfahren hinsichtlich der Störspannungen und des Wirkungsgrads vornehmen zu können, wurde ein 3-phasiger S3L Prototyp (20 kVA, 1000 VDC, 29 A; s. Abb. 8) so ausgestaltet, dass die Topologien H3L, S3L und SS3L durch einfache Umkonfigurationen geschaltet werden konnten. Da sämtliche Leistungshalbleiter, die Leiterplatte etc. immer dieselben waren, ist eine direkte Vergleichbarkeit gegeben.

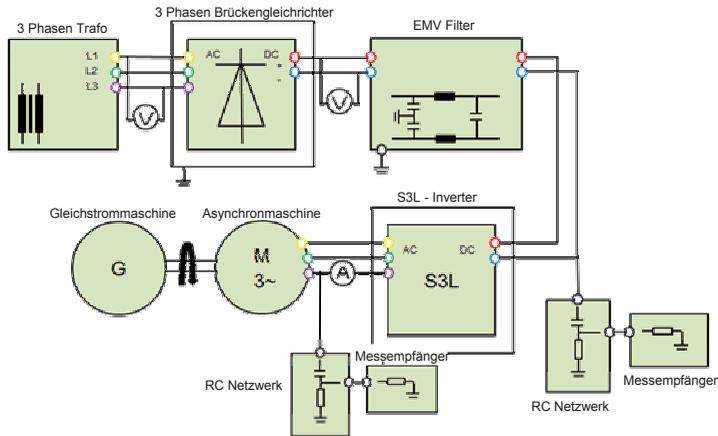


Abb. 7: Versuchsaufbau mit EMV Messpunkten



Abb. 8: S3L Prototyp 1000 VDC, 20 kVA, 29 A

Abb. 7 zeigt den Versuchsaufbau [9]. Die Eingangsgleichspannung wird über einen Stelltrafo und einen ungesteuerten Gleichrichter bereitgestellt. Der Pulswechselrichter speist eine Asynchronmaschine, die mit einer Gleichstrommaschine mechanisch belastet werden konnte. Als Steuerverfahren dient eine digital implementierte Sinus-Dreieck-Modulation [8]. Für die Vergleichsmessungen wurden 4 Betriebsarten gewählt: 3 Verfahren mit jeweils konstanter Pulsfrequenz von 8 kHz, 16 kHz und 32 kHz (entsprechend Schaltfrequenzen von 4 kHz, 8 kHz bzw. 16 kHz für jeden einzelnen Leistungshalbleiter), und 1 Verfahren mit einer variablen Schaltfrequenz (8-32 kHz) [7] [8].

Gemessen wurde die Störspannung auf Seiten der Eingangsgleichspannung und auf einer Motorklemme. Im Pulswechselrichter waren keinerlei EMV Filter verbaut. Der gesamte Messaufbau war nicht normgerecht, da nur Vergleichsmessungen geplant waren.

Bei den Wirkungsgradmessungen wurden die Eingangsleistung des Pulswechselrichters sowie 3 Ausgangsleistungen erfasst und hieraus der Wirkungsgrad berechnet. Auch hier bestand wie oben ausgeführt das Ziel in einer relativen Vergleichsmessung.

4 Ergebnisse EMV Vergleich

Abb. 9 zeigt einen Vergleich der 3 Schaltungstopologien H3L (Hard Switching Three Level Inverter), S3L (Soft Switching Three Level Inverter) und SS3L (Super Soft Switching Three Level Inverter). H3L und S3L weisen ähnlichen Störspannungspegel auf, SS3L dagegen deutlich geringere, da hier alle Schaltflanken du/dt -begrenzt sind.

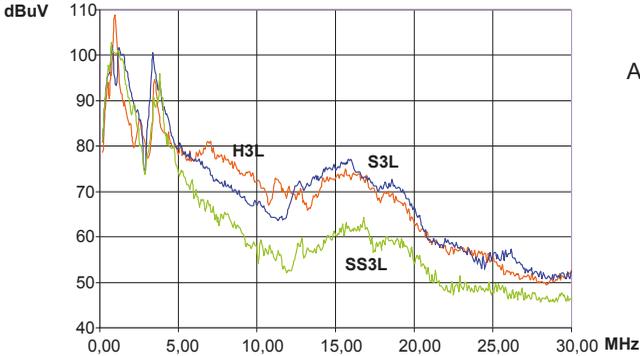


Abb. 9: DC-Seite

$$f_{\text{puls}} = 8 \text{ kHz}$$

$$f_1 = 50 \text{ Hz}$$

$$m = 0,08$$

$$M = M_N$$

Abb. 10 zeigt die AC-seitigen Störpegel für denselben Betriebsfall wie zuvor. Auch hier ist die SS3L Ausführung im Vorteil.

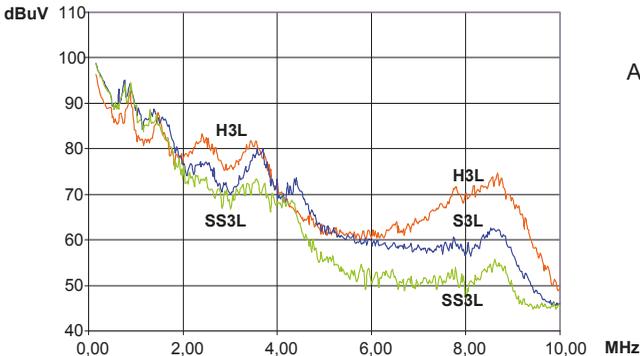


Abb. 10: AC-Seite

$$f_{\text{puls}} = 8 \text{ kHz}$$

$$f_1 = 50 \text{ Hz}$$

$$m = 0,08$$

$$M = M_N$$

Bezüglich der Störspannungen zeigt die S3L Ausführung nur geringe Vorteile gegenüber H3L. Dass diese trotz der weichen Schaltvorgänge nicht deutlicher ausfallen, liegt daran, dass es bei S3L doch noch einige harte Schaltflanken gibt. Diese entfallen bei der SS3L Ausführung, so dass diese deutliche Vorteile aufweist.

Abb. 11 zeigt die Auswirkung verschiedener Steuerverfahren. Gegenübergestellt wurde eine Pulsfrequenz von 8 kHz beim H3L Inverter, 16 kHz beim S3L Inverter sowie 32 kHz bei der SS3L Ausführung. Zusätzlich wurde beim SS3L Inverter mit einer variablen Pulsfrequenz gearbeitet, die zwischen 8 kHz und 32 kHz gewobelt wurde mit einem Mittelwert von 16 kHz. Der Motor wurde mit Nenndrehzahl und Nenndrehmoment betrieben.

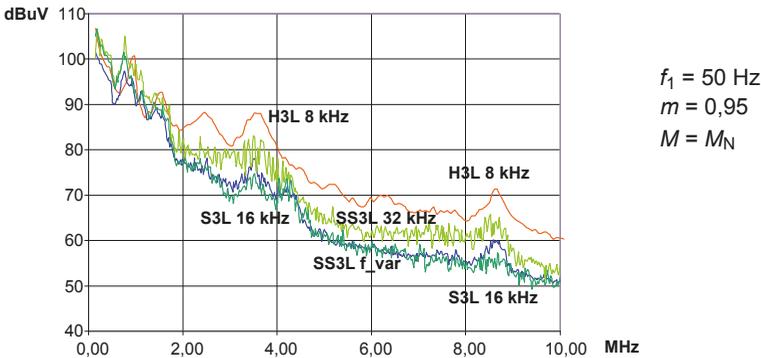


Abb. 11: Einfluss der Steuerverfahren (feste bzw. variable Pulsfrequenzen)

Im Bereich höherer Frequenzen hat letzteres Verfahren ähnliche Ergebnisse wie S3L mit 16 kHz. Interessante Unterschiede gibt es dagegen im unteren Frequenzbereich.

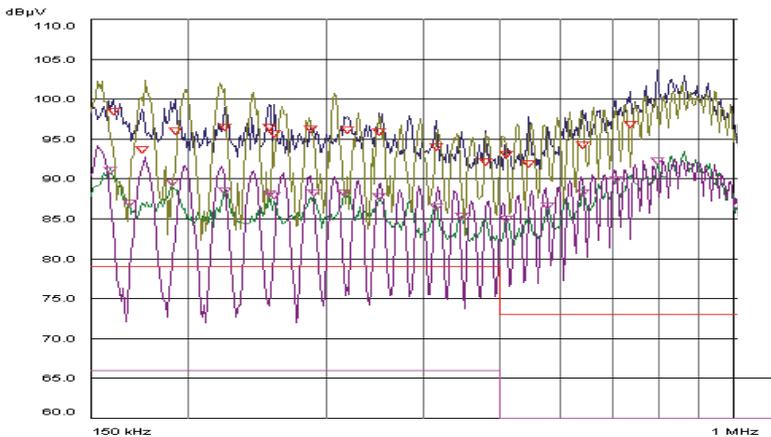


Abb. 12: Oberschwingungen bei konstanter und bei variabler Pulsfrequenz (Peak bzw. Average)

Abb. 12 zeigt den unteren Frequenzbereich bis 1 MHz. Bei der konstanten Pulsfrequenz 22 kHz sind die Oberschwingungen deutlich erkennbar; bei der variablen Schaltfrequenz (hier gewobelt zwischen 12 kHz und 32 kHz) verschwinden diese weitgehend.

5 Ergebnisse der Wirkungsgradmessungen

Erwartungsgemäß sollten die beiden weich schaltenden Topologien bessere Wirkungsgrade erzielen als die H3L Ausführung. Dies war bereits in anderen Messreihen bestätigt worden [7]. Zusätzlich sollte überprüft werden, ob die EMV-Vorteile des SS3L Inverters zu Lasten des Wirkungsgrads gehen (Abb. 13).

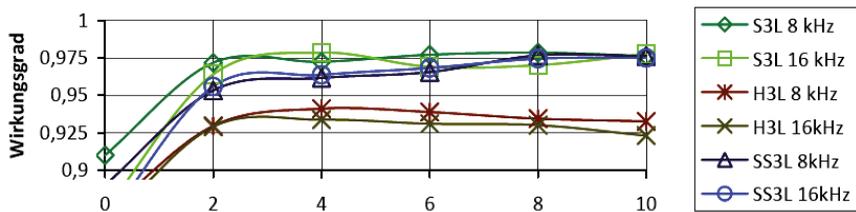


Abb. 13: Wirkungsgrade über Motorleistung in kW

6 Fazit

Bezüglich des Wirkungsgrads sind die beiden weich schaltenden Ausführungen S3L und SS3L vergleichbar und dem H3L Inverter deutlich überlegen. Bei der EMV weist der S3L Inverter nur geringe Vorteile gegenüber dem H3L Inverter auf, der SS3L Inverter dagegen sehr deutliche. Insbesondere in Verbindung mit der Betriebsart mit variabler Schaltfrequenz ist der SS3L Inverter somit die attraktivste Ausführung.

7 Literatur

- [1] Nabae, H. Akagi and I. Takahashi: A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-17, NO. 5, September/October 1981, pp. 518-523
- [2] Schweizer, M.; Kolar, J.W.: High efficiency drive system with 3-level T-Type inverter; EPE (European Conference on Power Electronics and Applications) 2011; August 2011, Birmingham, UK; ISBN 9789075815153
- [3] Applikationshandbuch IGBT- und MOSFET Leistungsmodule, Semikron International, Verlag Isle, 1998
- [4] 3-Stufen-Pulswechselrichter mit Entlastungsnetzwerk; Deutsches Patent DE 10 2010 008 426 B4; Anmeldetag: 18.02.2010; Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 01.09.2011; Patentinhaber: Hochschule Konstanz; Erfinder: Manfred W. Gekeler
- [5] Manfred W. Gekeler: Soft switching three level inverter with passive snubber circuit (S3L inverter); Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011, Birmingham); ISBN 9789075815153, S. 1–10
- [6] Manfred W. Gekeler: Weich schaltender 3-Stufen-Pulswechselrichter mit verlustfreiem Entlastungsnetzwerk; Internationaler ETG-Kongress 2011 (ETG-Fachbericht 130 Teil B); 2011, ISBN 978-3-8007-3376-7, S. 264-270
- [7] Manfred W. Gekeler: Soft Switching Three Level Inverter (S3L Inverter). Proceedings of the European Conference of Power Electronics and Applications (EPE 2013), 2013. ISBN 978-90-75815-17-7 and 978-1-4799-0114-2.
- [8] Manfred W. Gekeler: Optimierte PWM-Steuerung für Soft Switching Three Level Inverter (S3L Inverter). Internationaler VDE ETG-Kongress November 2013. ISBN 978-3-8007-3550-1
- [9] Stefan Schreitmüller: EMV-Messung am S3L Inverter. Bachelorarbeit HTWG Konstanz, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik. Februar 2015