

Kompensation von Asymmetrien im Aufbau beim gegenphasigen Inverterbetrieb zur Gleichtaktauslöschung

M. Sc. Jonas Bertelmann, Universität Stuttgart, Deutschland
Dr.-Ing. Michael Beltle, Universität Stuttgart, Deutschland
Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Deutschland
Dipl.-Ing. Roland Eidher, Robert Bosch GmbH, Deutschland

1 Einleitung

Um die elektromagnetische Verträglichkeit in der Automobilindustrie gewährleisten zu können, ist besonders bei leistungselektronischen Komponenten ein teurer und voluminöser Filter notwendig. In neuen Ansätzen mit aktiven Filtern sollen diese Nachteile kompensiert werden. Zur Gruppe der aktiven Filter zählen auch Verfahren zum gegenphasigen Inverterbetrieb, bei welchem durch synchrones Schalten von zwei geeigneten Halbleitern in einem sechsphasigen Wechselrichteraufbau das Gleichtaktspektrum durch destruktive Superposition reduziert werden kann. In einem prototypischen Aufbau können Dämpfungen von bis zu 40 dB bis in den Frequenzbereich der Mittelwelle (500 kHz – 2 MHz) erreicht werden [1]. In diesem Beitrag wird dargestellt, inwiefern Asymmetrien eines sechsphasigen Wechselrichters kompensiert werden können, welche unausweichlich zu einer Verschlechterung der Auslöschung führen [2]. Untersucht werden zeitliche Asymmetrien, also eine asynchrone Ansteuerung der Halbleiter oder ein ungleiches Schaltverhalten der Halbleiter selbst, aber auch bauteilabhängige und geometrisch bedingte Asymmetrien von Komponenten oder Streugrößen können zu zeitlichen Asymmetrien führen.

2 Stand der Technik des gegenphasigen Wechselrichterbetriebs

Die Spannungsänderung über parasitären Streukapazitäten C_{Streu} des Wechselrichters führt zu einem Gleichtaktstörstrom (CM) [3]. Die Störungsursache innerhalb des Wechselrichters sind die Schaltvorgänge der Halbleiter. Theoretisch ist eine ideale Auslöschung von Gleichtaktkomponenten möglich, wenn ein hochsymmetrischer Hardwareaufbau verwendet wird und jeweils ein High- und ein Lowsideschalter zweier Halbbrücken mit identischem Schaltverhalten synchron geschaltet werden. Ein gewöhnlicher dreiphasiger Wechselrichter, bestehend aus 3 Halbbrücken, bietet diese Möglichkeit aufgrund der vorliegenden Topologie nicht. Ein redundanter Wechselrichter mit insgesamt sechs Halbbrücken hingegen schon. Dieser lässt sich wie zwei voneinander unabhängige dreiphasige Wechselrichter mit 180° Phasenversatz betrachten, wie in Bild 1 dargestellt (Inverter A und Inverter B).

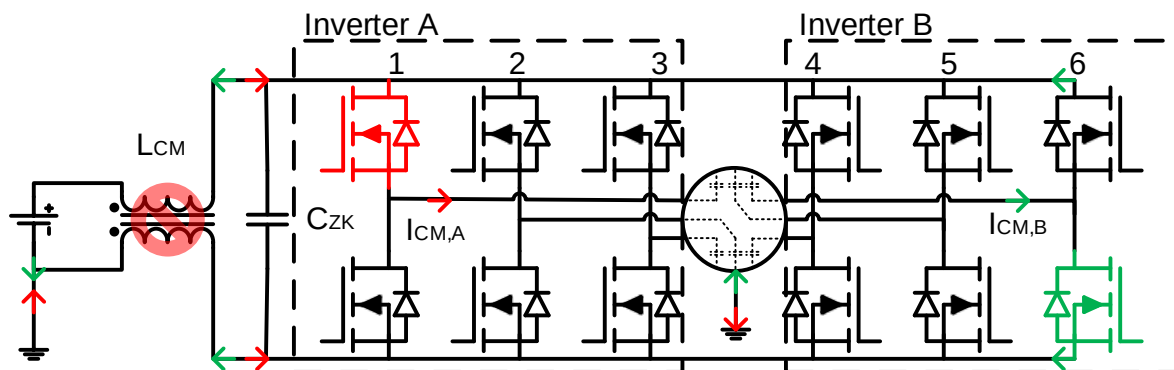


Bild 1: Vereinfachter Schaltplan eines sechsphasigen Wechselrichters mit zwei gleichzeitig schaltenden Leistungshalbleitern und den daraus resultierenden Gleichtaktstörströmen

Der CM-Strom lässt sich mit Gl. (1) bestimmen. Werden zeitgleich zwei dieser Störströme mit unterschiedlichem Vorzeichen, also 180°-Phasenverschiebung ausgelöst, so kommt es zur Auslöschung an allen relevanten Stellen im Aufbau des Wechselrichtersystems. Für eine ideale Kompensation ist es notwendig, dass alle Bauelemente im Schaltpfad der einen schaltenden Halbbrücke das gleiche elektrische Verhalten aufweisen wie die Bauelemente der zweiten schaltenden Halbbrücke, inkl. aller Streugrößen bspw. bedingt durch Leiterbahnen. Zusätzlich ist eine exakte zeitgleiche Ansteuerung der beiden schaltenden Halbleiter notwendig. Wenn all diese Bedingungen erfüllt sind, sind die resultierenden Absolutwerte der Gleichtaktströme $i_{CM,A/B}$ identisch. Sie unterscheiden sich lediglich im Vorzeichen. Da sie sich denselben Übertragungsweg teilen, kommt es zu destruktiver Interferenz und es gilt $i_{CM,ges} = 0$. [1]

$$i_{CM,A/B}(t) = C_{Streu} * \frac{du}{dt} \quad (1)$$

Der in Bild 2 gezeigte Aufbau wird für die Tests zur Kompensation von Asymmetrien verwendet. Er besteht aus einem eigens entwickelten sechsphasigen Wechselrichter (links im Bild) mit sechs Halbbrücken unter Verwendung des IPP80N04S4 MOSFET von Infineon. Die Steuerung der einzelnen Schalter ist auf einem FPGA (Field Programmable Gate Array, als Aufsteckplatine im linken oberen Eck der Wechselrichterplatine zu sehen) implementiert und über eine PC-Schnittstelle detailliert parametrierbar. An den Ausgängen des Wechselrichters (sechs Abgänge am rechten Ende der Wechselrichterplatine) kann eine passive Lastnachbildung oder ein sechsphasiger Synchronmotor verwendet werden. Die Messungen werden in einer Absorberhalle auf einem Komponententisch in Anlehnung an den CISPR25 Aufbau [4] mit einem Zeitbereichsmessempfänger (TDEMI) durchgeführt. Dafür dient die Stromzange ganz links im Bild, die über alle Phasen gleichsinnig gelegt, ausschließlich den Gleichtaktstrom detektiert.

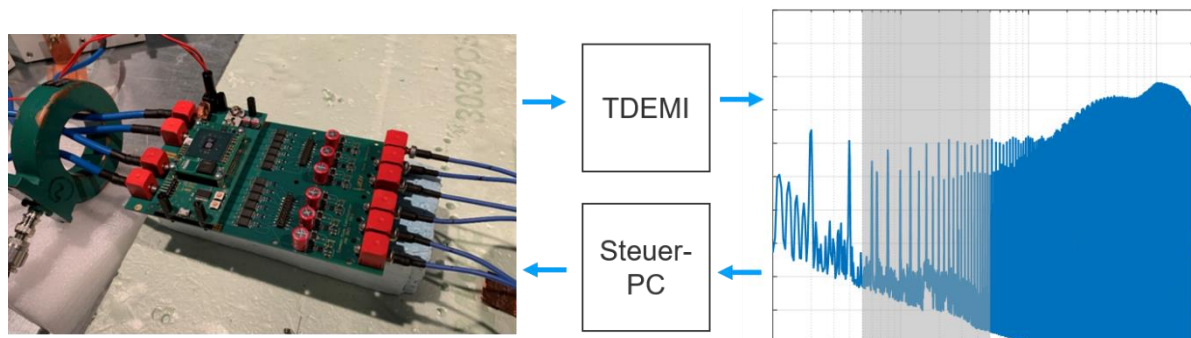


Bild 2: Messaufbau zur CM Bewertung eines sechsphasigen Wechselrichters inkl. Kompensation mithilfe eines Messempfängers und frequenzselektiver Bewertung der Harmonischen (grauer Balken)

Bild 4 zeigt den CM-Störstrom verschiedener Betriebszustände, der an den DC-Versorgungsleitungen des Wechselrichters mit einer Stromzange vom Typ Pearson 2100 gemessen wurde. Die blaue Kurve zeigt die Emission einer konventionellen dreiphasigen Konfiguration, bei der der verwendete sechsphasige Aufbau im Doppelmodus betrieben wird (gleiche Steuerung für beide Teil-Wechselrichter). Die rote Kurve stellt den sechsphasigen Betrieb dar, bei dem der zweite Teilwechselrichter im um 180° phasenverschobenen Betrieb gesteuert wird, jedoch ohne optimierte Parameter. Dies führt zu einem deutlich reduzierten Gleichtaktspektrum im Frequenzbereich bis 20 MHz und im unteren Frequenzbereich zu einer Dämpfung über 50 dB bei der Grundfrequenz.

3 Kompensation von zeitlicher Fehlanpassung

Unter zeitlicher Fehlanpassung ist gemeint, dass die gegenphasig arbeitenden Halbleiter nicht exakt gleichzeitig schalten und deshalb die Auslöschung der Gleichtaktkomponenten nicht optimal gelingt. Das ist beispielsweise durch Streuung von Parametern innerhalb der Leistungshalbleiter [5] oder der gesamten Ansteuerungskette (FPGA oder ASIC, Signalpfad, Gate-Treiber) möglich. Um die Asymmetrien zu kompensieren, müssen sie vorab bestimmt werden. Im Laboraufbau ist das durch hochwertige und teure Messtechnik und manuelles Anpassen der Schaltzeiten möglich. Soll das Verfahren der gegenphasigen Ansteuerung jedoch in eine Serienanwendung implementiert werden, sind alternative Verfahren notwendig. Da Abweichungen in Größenordnungen von wenigen Nanosekunden vorliegen, ist dies entweder mit sehr teuren Analog-Digital-Wandlern möglich oder durch eine einfache Puls-Flanken-Erkennung, wie sie in Bild 3a gezeigt ist. Die passive Impulsentkopplungsschaltung ist mit einem breitbandigen ohmsch-kapazitiven Teiler realisiert und in allen sechs Phasen am Schaltausgangspunkt integriert. Das dort anliegende Rechtecksignal der Halbbrücke wird mit entsprechendem Teilverhältnis direkt auf einen I/O-Port des FPGAs zurückgeführt. Mit dem dort implementierten Time-to-Digital-Controller lässt sich sowohl die steigende als auch die fallende Flanke mit 2 ns zeitlicher Auflösung erkennen. Sind die zeitlichen Asymmetrien für den jeweiligen Betriebspunkt einmal ermittelt, kann durch verzögertes Ansteuern einzelner Halbleiter eine Synchronität zwischen den Schaltflanken der Halbleiter bis auf 2 ns hergestellt werden.

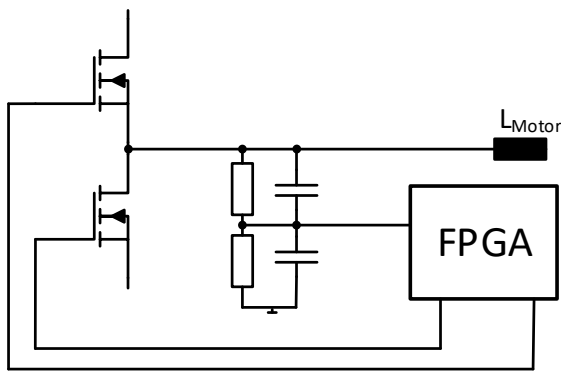


Bild 3a: Schaltbild zur Puls-Flanken-Erkennung (eine Phase)

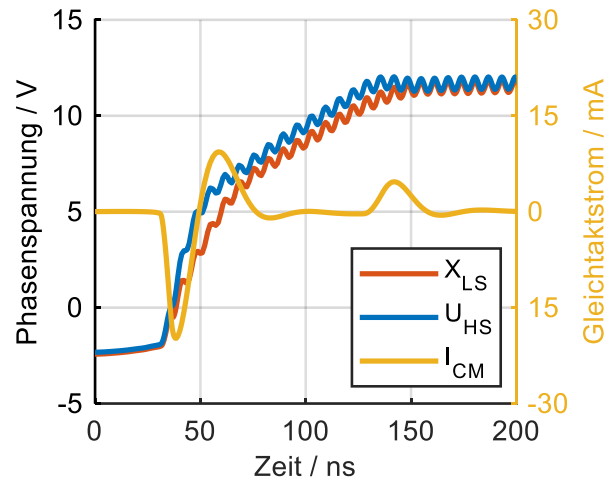


Bild 3b: Simulation zweier Schaltflanken mit Asymmetrie

In Bild 3b sind beispielhaft zwei Phasenspannungen U_{HS} und X_{LS} der beiden relevanten gegenläufig schaltenden Halbbrücken zu sehen, wobei zum besseren Vergleich die gegenläufig schaltende Phasenspannung X_{LS} invertiert dargestellt ist, um die zeitliche Verschiebung der Signale zueinander besser erkennen zu können. Des Weiteren ist der resultierende CM Störstrom in gelb abgebildet. Die hier simulierten Schaltflanken haben einen Versatz von 5 ns und eine Abweichung in der Motorinduktivität L_{Motor} von 20%. Letzteres resultiert in einer Abweichung des Überschwingens bei den Schaltspannungen hinsichtlich der Amplitude und der Phase. Ist dieses Delay mit der Methodik erkannt, so wird die nachfolgende Schaltflanke U_{HS} um 4 ns verzögert ausgegeben. Der Gleichtaktstrom wird sich daraufhin reduzieren.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Grundwelle des Rechtecksignals mit diesem Verfahren sehr gut getroffen werden kann. Aufgrund der Tatsache, dass der FPGA jedoch lediglich zwischen einem High- und Low-Pegel unterscheiden kann, lassen sich Effekte wie phasenverschobene Oberschwingungen oder Differenzen in der Flankensteilheit mit diesem Verfahren weder detektieren, noch kompensieren. Aufgrund dessen ist die Effektivität dieser Methode im niedrigen Frequenzbereich besonders hoch und nimmt mit zunehmender Ordnung der Harmonischen ab.

Dieser Aufbau ließe sich in eine Serienanwendung mit verhältnismäßig geringem Kostenaufwand integrieren. Dadurch könnten für jegliche Betriebszustände vollkommen automatisiert die Flanken synchronisiert werden. Auch mögliche alterungsbedingte Verhaltensänderungen an den Halbleitern oder passiven Bauelementen wären kompensierbar.

Eine weitere Methode zur Kompensation von Schaltverzögerungen einzelner Schalter basiert auf einer Messung mit externem Messempfänger und der iterativen Verschiebung von Schaltzeitpunkten. Bild 2 zeigt den Mess- bzw. Signalpfad im Aufbau mit dem Wechselrichter. Nach Inbetriebnahme des Wechselrichters wird eine erste Messung mithilfe des TDEMI durchgeführt. Die Auswertung des Frequenzspektrums findet im Steuer PC statt. Über eine Schnittstelle kann dieser die Schaltzeitpunkte parametrieren und an den FPGA übermitteln.

Nach der initialen Messung wird ein beliebiger Halbleiter mit einer Verschiebung von 2 ns angesteuert und erneut ein Spektrum mit dem TDEMI ermittelt. Über die Standardabweichung der Summe der Amplituden der Harmonischen lässt sich anschließend bewerten, ob die Verschiebung zu einer Verbesserung (Pegelminderung) geführt hat und der neue Schaltzustand behalten wird, oder zu einer Verschlechterung und die vorherigen Ansteuerungsverhältnisse wiederhergestellt werden. Im Falle einer Verbesserung wird eine weitere Verschiebung um 2 ns überprüft. Im Verlaufe der Arbeit wurden verschiedene Algorithmen dafür evaluiert, wobei sich herausgestellt hat, dass eine Beschränkung auf ein gewisses Frequenzband und die Standardabweichung hilfreiche Mittel sind. Betrachtet man beispielsweise nur die Summe der Harmonischen über den gesamten Frequenzbereich, droht die Gefahr auf ein lokales Minimum zu optimieren, bei dem nur gerade oder ungerade Harmonische reduziert werden. Die Einhüllende bleibt jedoch unverändert und die Emissionsbewertung des Wechselrichters somit auch. Dieser Prozess wird an allen 12 Halbleitern wiederholt, bis keine Verbesserung mehr erzielt werden kann.

Soll mit dieser Methode eine Verbesserung des Betriebsverhaltens des Wechselrichters erreicht werden, muss für sämtliche Betriebszustände die optimale Ansteuerung ermittelt werden und in einer Lookup hinterlegt werden. Mit einem End-of-Line Test ließe sich diese Aufgabe bewältigen und anders als bei der Zeitbereichsvariante sind keine zusätzlichen Hardwarekosten innerhalb des Wechselrichters notwendig.

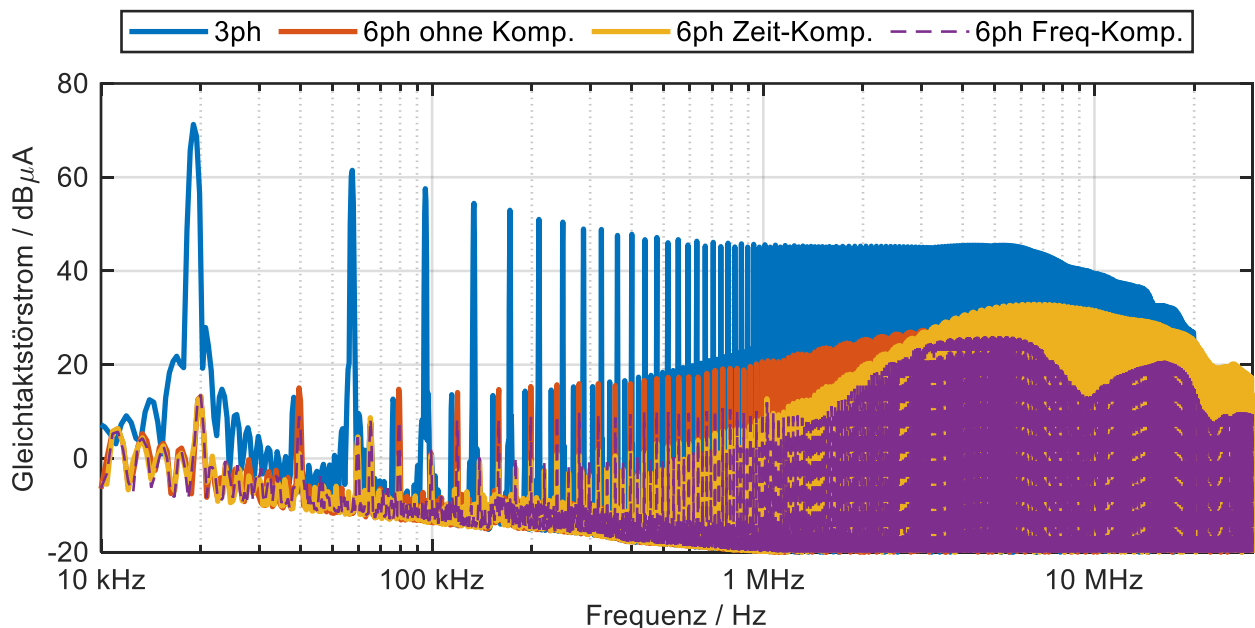


Bild 4: Emissionsspektren der verschiedenen Ansteuerungsverfahren (3- und 6-phasig) und Ergebnisse der beiden Kompensationsverfahren von Asymmetrien auf das Gleichtaktspektrum

Die Ergebnisse beider Methoden sind in Bild 4 zu sehen. Im 3-phasigen Modus arbeitet der Wechselrichter im parallelen Betrieb, wohingegen im 6-phasigen Betrieb die gegenphasige Ansteuerung angewendet wird. Die Frequenz-Kompensation mit Messempfänger zeigt auch im höheren Frequenzbereich > 1 MHz gute Ergebnisse. Es werden teilweise lokale Minima, wie bei 10 MHz, mit über 10 dB Dämpfung erreicht. Für das Gesamtspektrum beläuft sich die Verbesserung auf < 3 dB. Die Zeit-Kompensation hingegen dämpft nur die Harmonischen im unteren Frequenzbereich und arbeitet hier besser als die Frequenz-Kompensation. Im Frequenzbereich über 4 MHz bringt die Zeit-Kompensation keine Reduzierung mehr. Es ist sogar eine Erhöhung von < 3 dB möglich. Ab etwa 30 MHz ist weder zwischen den Kompensationsmethoden noch zwischen 3- und 6 phasiger Ansteuerung eine Reduzierung zu erkennen. In diesem Frequenzbereich lassen sich jedoch passive Filter mit geringerem Aufwand realisieren.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Methode des phasenverschobenen Schaltens im sechsphasen-Wechselrichterbetrieb hat sich als effektiv erwiesen. Das Gleichtaktstörstromspektrum kann über einen weiten Frequenzbereich um mehr als 50 dB reduziert werden, wenn symmetrische Bedingungen herrschen. Um mögliche Asymmetrien in der Ansteuerung der Schalter auszugleichen, muss eine zeitliche Anpassung bzw. Verzögerung der Schaltzeiten einzelner Schalter vorgenommen werden, was zu einer weiteren Verringerung des Störspektrums der Harmonischen führt. Kann dies in einem Prototypaufbau manuell mit einem Oszilloskop durchgeführt werden, zielt dieser Beitrag darauf ab, eine automatische Optimierung zu entwickeln.

Es werden zwei Optimierungstopologien vorgestellt. Beide zeigen gute Ergebnisse bei der weiteren Reduktion des Emissionsspektrums. Während die Zeitbereichsvariante zusätzliche Komponenten im Wechselrichter benötigt, um auf Spannungsflanken triggern zu können, ist dies bei der zweiten Methode nicht notwendig. Stattdessen wird die direkte Messung der resultierenden CM-Störungen im Frequenzbereich mittels eines EMI-Messempfängers zur Anpassung der Schaltzeiten genutzt.

Die Robustheit des Optimierungsprozesses im Zeitbereich ist deutlich höher als die im Frequenzbereich. Dies konnte durch Wiederholung der Optimierungsprozesse mit konstanten externen Parametern festgestellt werden. Dennoch haben beide Optimierungsverfahren ihre Vorteile. Die Kompensation im Frequenzbereich kann auch im höheren Frequenzbereich lokale Minima der Störunterdrückung erreichen. Durch die Synchronisation der Flanken im Zeitbereich ist die optimale Minimierung im niedrigen Frequenzbereich gegeben und nimmt über der Frequenz kontinuierlich ab. Grundsätzlich können mit beiden Methoden nur asynchrone Schaltzeiten kompensiert werden. Eventuelle Asymmetrien im Hardwareaufbau, wie z.B. eine Asymmetrie der Motorinduktivitäten oder eine unterschiedliche Streukapazität der gegenphasig arbeitenden Phasen, können auf diese Weise nicht kompensiert werden. Dies begründet sich durch die Tatsache, dass für die Ausprägung der Gleichtaktstörung neben der Spannungsflanke auch die Impedanz relevant ist.

Eine Möglichkeit, den Einfluss von Lastasymmetrien auf das CM-Spektrum zu minimieren, ist das Überspringen von Schaltvorgängen bei Nulldurchgängen der Phasenströme und sei hier als Ausblick erwähnt. Für die funktionalen Anforderungen des Wechselrichters entsteht dadurch nur eine vernachlässigbare Abweichung der Motorströme. Aus EMV-Gesichtspunkten wird das Spektrum der CM-Störungen deutlich reduziert. Aufgrund der Kommutierungsverhältnisse, welche nahe des Nulldurchgangs das 180° Kriterium verlassen können, wenn die Motorinduktivität nicht symmetrisch ist, ist hier das Potenzial für eine weitere Minimierung gegeben.

Literaturangaben

- [1] J. Bertelmann et al.: Minimierung der Gleichtaktstörung in elektrischen Lenkungssystemen durch gegenphasiges Takten der Leistungshalbleiter, VDE GMM Fachbericht 93 AmE 2019, pp. 71-75
- [2] J. Bertelmann et al.: Einflussparameter und Grenzen der Gleichtaktauslöschung im gegenphasigen Inverterbetrieb, EMV 2020, pp. 239-246
- [3] P. Hillenbrand et al.: Understanding conducted emissions from an automotive inverter using a common-mode model, IEEE EMC Dresden 2015, pp. 685-690
- [4] CISPR 25 – Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurements for the protection of on-board receivers, 2016-10
- [5] J. Bertelmann et al.: Influence of MOSFET Scattering on Common Mode Cancellation in Phase Shifted Inverter Operation, PCIM Nuremberg 2021, pp. 1881-1885