

Analyse leitungsgeführter Emissionen im HV-Bordnetz von elektrischen Fahrzeugen

Dipl.-Ing. Dipl.-Inf. Simon Niedzwiedz, TU Dortmund
 Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, TU Dortmund
 Dr.-Ing. Martin Obholz, Volkswagen AG
 Dr.-Ing. Johann Heyen, Volkswagen AG

1 Einleitung

Mit der fortschreitenden Elektrifizierung des Antriebsstrangs und der steigenden Zahl an Hochvolt-Nebenaggregaten wird es immer wichtiger, genaue Kenntnisse über die Nutz- und Störgrößenverhältnisse im HV-Bordnetz zu erhalten und deren Einflussfaktoren zu analysieren [1] [2] [3]. Hierbei stellen die im Pulsbetrieb operierenden Komponenten, wegen der schnellen Schaltflanken bei teils sehr hohen Leistungen, das größte Störpotential dar. Daher ist es geboten, die hier erzeugten Störemissionen der Komponente möglichst schon im Design durch geeignete Schaltungen und taktbezogene Modulationsverfahren zu minimieren [4] [5] [6]. Allerdings genügt es wegen der Komplexität des Gesamtsystems Fahrzeugbordnetz nicht mehr, die verschiedenen Komponenten nur isoliert voneinander zu betrachten und im Laboraufbau zu analysieren. Für die Festlegung von sinnvollen Komponentenanforderungen ist es wichtig, die verschiedenen Komponenten und Subsysteme auch im Systemverbund zu analysieren. Damit ist es möglich, die relevanten Störgrößen oder potentielle Wechselwirkungen zu identifizieren und entsprechende Komponentenanforderungen zu definieren. Vergleichsweise einfache Laboraufbauten mit einer Minimalperipherie, wie sie in EMV-Messungen zum Einsatz kommen, sind für die Überwachung der Konformität sehr gut geeignet. Für die Festlegung von Spezifikationen, das grundsätzliche Verständnis von Wechselwirkungen und der Wirksamkeit verschiedener Komponentenmaßnahmen sind Untersuchung der gesamten HV-Bordnetzarchitektur - unter Einbeziehung möglichst realistischer Belastungszustände - sinnvoll. Damit ist es möglich, relevante Wechselwirkungen im Gesamtsystem zu erfassen und die Wirksamkeit von Komponentenmaßnahmen zu bewerten. Da sowohl ein Systemverbund als auch die möglichen Belastungszustände sehr vielfältig sein können, bietet es sich an, solche grundsätzlichen Analysen von Störungen und Entstörungsmaßnahmen simulationsunterstützt durchzuführen.

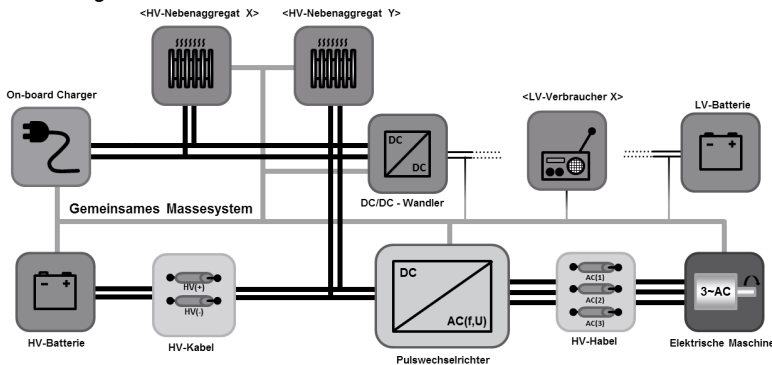


Abbildung 1: Schematische Darstellung des HV-Bordnetzes von xEV

1.1 HV-Bordnetz und elektrischer Antriebsstrang

Das HV-Bordnetz moderner Hybrid- und Elektrofahrzeuge (xEV) lässt sich schematisch wie in Abbildung 1 zu sehen darstellen. Die zentralen Systembestandteile bilden dabei die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs von der Traktionsbatterie (HV-Batterie) über den Traktionspulswechselrichter (PWR) zur elektrischen Antriebsmaschine. Je nach realisiertem Antriebskonzept kann dieser Traktionsteil auch mehrfach im HV-Bordnetz vorhanden sein. Zusätzlich befindet sich im HV-Bordnetz eine stetig wachsende Zahl an HV-Nebenaggregaten, zum Beispiel Klimaanlage und elektrische Heizung, sowie ein DC/DC-Wandler zur Kopplung mit dem LV Bordnetz. Die leistungselektronischen Nebenaggregate werden in der Regel auch durch eine PWM gesteuert. Somit ergibt sich für das HV-Bordnetz in der Gesamtsystembetrachtung eine Vielzahl potentieller Störquellen und -senken mit gepulstem Störverhalten.

Verbunden sind alle Komponenten über entsprechend geschirmte HV-Kabel. Trotzdem lässt sich das HV-Bordnetz damit nicht als vollentkoppeltes System betrachten, da sämtliche HV-Aggregate zumindest über ihre Gehäuse mit der Fahrzeugkarosserie – und damit der allgemeinen (LV-)Bordnetzmasse verbunden sind, womit ein IT-Netz vorliegt. Dies führt dann wieder zu der Problematik, dass leitungsgeführte Störemissionen, insbesondere im Common Mode (CM), sich ihre Störquellen im gesamten Fahrzeug frei suchen können, auch über die verschiedenen Bordnetzebenen hinweg.

Daher ist es dringend geboten, die CM-Emissionen der Komponenten einerseits so gering wie möglich zu halten und andererseits gezielt Störquellen, zum Beispiel in Form von Filtern innerhalb der Komponenten, vorzusehen, um die Ausbreitungspfade für CM-Störströme bereits in der Komponente zu kontrollieren.

2 Störgrößen im HV-Bordnetz

Um diese Herausforderung und die Einflüsse einer Komponente im System besser nachvollziehen zu können, werden zunächst die relevanten Störgrößen mit ihren Ursachen und charakteristischen Parametern erläutert. Da die elektrische Antriebseinheit, insbesondere der Pulswechselrichter, die dominante Störquelle repräsentiert, werden nachfolgend diese Störungen fokussiert.

2.1 Störgrößen im HVAC-Bordnetz

Als Folge der dreiphasigen Spannungserzeugung mittels Pulsweiten-Modulation (PWM) bildet sich vom virtuellen Neutralpunkt (Sternpunkt) der AC-Seite, in Bezug zur allgemeinen Fahrzeugmasse (CGND), eine stufenförmige Spannung aus. Bei einem 2-Stufen PWR, wie er üblicherweise in xEV verwendet wird, hat die Spannung $V_{AC,CM}$ vier quasidiskrete Stufen $\pm V_{DC}/2$ und $\pm V_{DC}/6$ und lässt sich nach (1) [7] berechnen.

$$V_{AC,CM} = 1/3 \cdot (V_{U0} + V_{V0} + V_{W0}) \quad (1)$$

$$V_{AC,CM} = f(f_{PWM}, V_{DC}, f_{ref}, V_{ref}, \phi) \quad (2)$$

Mit V_{x0} sind dabei die drei pulsmodulierten HVAC-Traktionsspannungen in Bezug zur Fahrzeugmasse bezeichnet. Das genaue Muster der in Abbildung 2 gezeigten Spannung hängt dabei direkt von der Zwischenkreisspannung V_{DC} , der PWM-Schaltfrequenz f_{PWM} , dem PWM-Verfahren und dem fahrdynamischen Betriebszustand (Geschwindigkeit, momentane Traktionsleistung) ab. Die Anstiegs- und Abfallzeiten der

Pulse sind jedoch hauptsächlich durch die Charakteristik der Leistungselektronik bestimmt.

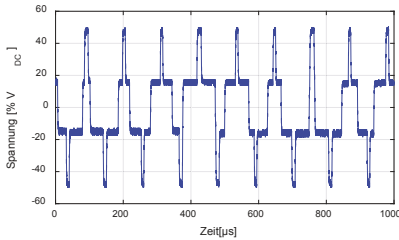


Abbildung 2: HVAC-Spannung $V_{AC,CM}$ (Sternpunktspannung)

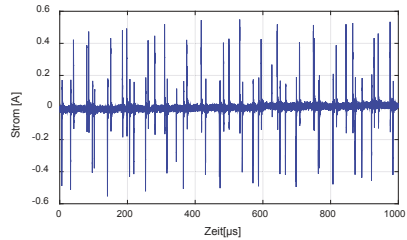


Abbildung 3: HVAC CM-Strom $I_{AC,CM,PWR}$

Hierzu gehörig ist der CM-Störstrom $I_{AC,CM}$ auf der HVAC-Seite (Abbildung 3), der sich vor allem durch parasitäre kapazitive Kopplungspfade in Folge der Umschaltvorgänge in $V_{AC,CM}$ ergibt; daher auch die Bezeichnung als CM-Spannung. Dabei teilt sich der aus dem PWR hinauslaufende Gesamtstrom $I_{AC,CM,PWR}$ in verschiedene Teilströme auf, die dann unter anderem über die HV-Kabelschirme ($I_{AC,SHD}$) und die Fahrzeugkarosserie ($I_{EM,GND,DC}$) zurück zur HVDC-Seite fließen, aber eben auch direkt zu anderen Gesamtsystemkomponenten.

2.2 Störgrößen im HVDC-Bordnetz

Für die Analyse der DC-Seite des HV-Bordnetzes ist zunächst der Ripple bzw. der Oberwellencharakter der DM-Spannung $V_{DC,DM}$ (Abbildung 4) zwischen den beiden Traktionsnetzpotentialen interessant. Diese Spannung besteht im Grunde aus zwei EMV-relevanten Hauptkomponenten. Der Ripple besitzt eine LF-Basiskomponente (kHz-Bereich) mit einem Sägezahn-ähnlichen Verlauf mit einer Grundfrequenz $f_{0,DM}$ gleich der doppelten PWM-Schaltfrequenz f_{PWM} . Zusätzlich überlagert sich, aufgrund parasitärer Elemente, bei jedem Schaltvorgang des Pulswechselrichters eine transiente Komponente mit charakteristischen Zeiten im Nanosekundenbereich (Abbildung 5).

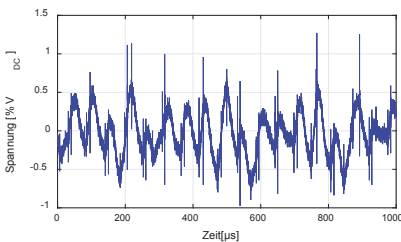


Abbildung 4: Ripple der HVDC DM-Spannung V_{DM}

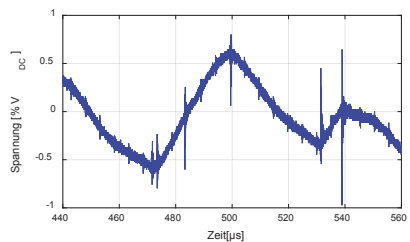


Abbildung 5: HVDC Spannung $V_{DC,DM}$ (Ausschnitt)

Die genaue Form und Amplitude des Sägezahn-Anteils hängen dabei direkt vom momentanen Fahrzeugzustand und dem aktuellen Betriebsfall ab (Abbildung 8).

$$V_{DC,DM} = f(f_{PWM}, f_{ref}, V_{ref}, \phi, Z_{C_{DC}}, Z_{EM}) \quad (3)$$

$$V_{DC,CM\pm} = \alpha_{\pm} \cdot V_{DC,DM} + \frac{1}{\gamma} \cdot (-V_{AC,CM}) \quad (4)$$

$$\gamma = \gamma_p + \gamma_F \quad (5)$$

Allerdings hat auch die technische Auslegung der Zwischenkreisimpedanz einen bestimmenden Einfluss auf die Ausprägung des Ripples (3). Der DM-Spannungs-ripple beschränkt sich in seinen Auswirkungen jedoch hauptsächlich auf das HV-Bordnetz. Ein Überkoppeln in das LV-Bordnetz oder die Belastung von anderen HV-Aggregaten als Störeinkopplung kann gegebenenfalls mit vertretbarem Filteraufwand recht gut behandelt werden.

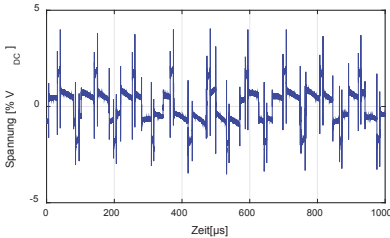


Abbildung 6: Ripple der HVDC Spannung $V_{dc,CM,TP}$

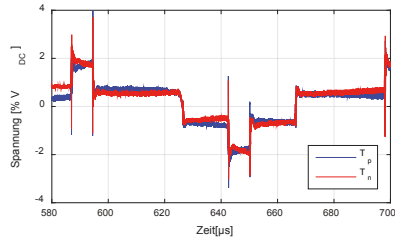


Abbildung 7: HVDC Spannung $V_{dc,CM}$ (Ausschnitt)

Gravierender für die Gesamtfahrzeug-EMV sind die CM-Störungen. Abbildung 6 zeigt den Ripple der Spannung auf der positiven Traktionsleitung in Bezug zur Fahrzeugmasse, welcher sich in Analogie als CM-Störspannung $V_{DC,CM,TP}$ bezeichnen lässt. Diese Spannung besteht, neben einem HF-Anteil im MHz-Bereich infolge der Schaltereignisse des PWR, aus einem sehr charakteristischen LF-Anteil in Form einer 4-stufigen Spannung. Die CM-Spannungen der beiden Traktionspotentiale (Abbildung 7) unterscheiden sich dabei nur im Gradienten ihrer Stufenflächen, welche die Spannung $V_{DC,DM}$ bilden (4). Die Treppenspannung der CM-Spannung ist dabei die Invertierung der HVAC CM-Spannung $V_{AC,CM}$, welche zusätzlich um den Faktor $1/\gamma$ gedämpft wird. Dieses Dämpfungsverhältnis wird durch die Koppelfaktoren γ_p , Koppelfaktor für die parasitären Systemimpedanzen, und γ_F , Koppelfaktor für alle relevanten Frontend- und Backend-Filter, bestimmt (5). Im Gegensatz zu den DM-Störgrößen hängen die CM-Störgrößen nur hinsichtlich des Musters der Schaltereignisse vom fahrdynamischen Betriebszustand ab, jedoch nicht in ihrer Höhe (Abbildung 9), sofern man die physikalischen Effekte im Grenzleistungsbetrieb bei der Bewertung berücksichtigt.

3 Simulationsgestützte Analyse leitungsgeführter Störemissionen

Auswirkungen von Komponenteneigenschaften auf das System können sehr effizient durch Simulationen untersucht werden. Hier sind z.B. implementierte Filterstufen oder taktbezogene Modulationsverfahren zu nennen.

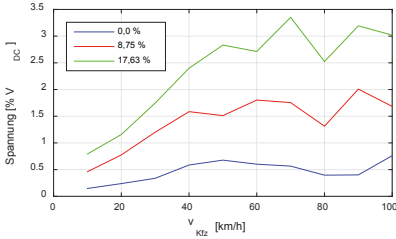


Abbildung 8: Betriebsfallabhängigkeit von $V_{DC,DM}$

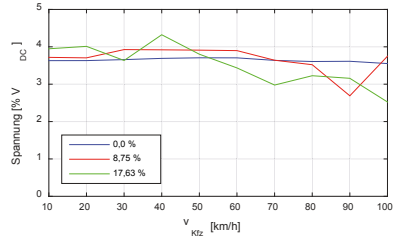


Abbildung 9: Betriebsfallabhängigkeit von $V_{DC,CM}$

3.1 Simulationsmodelle des HV-Antriebsstrangs

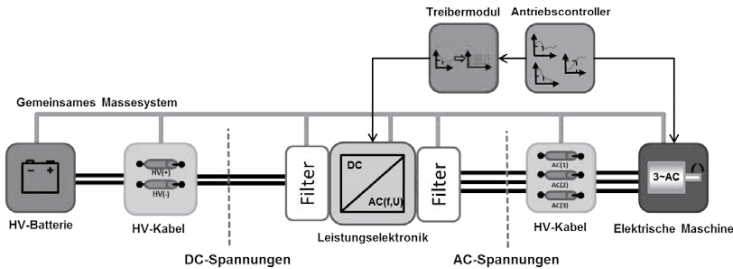


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Referenzmodells des HV-Bordnetzes inklusive der optionalen Filterpositionen und Messebenen

Da der elektrische Antriebsstrang im HV-Bordnetz die dominante Störquelle darstellt, fokussieren sich die nachfolgenden Analysen auf diesen Systemteil. Weitere Systembestandteile, wie HV-Nebenaggregate oder der DC/DC-Wandler mit angeschlossenem LV-Bordnetz-Stub, können durch den modularen Aufbau schnell in das Gesamtsystemmodell integriert werden. Den Aufbau des Systemmodells zeigt Abbildung 10. Ausgehend von einer Referenzkonfiguration können dann die einzelnen Komponentenänderungen simuliert und deren Auswirkungen analysiert werden.

Die zentrale Komponente stellt in diesem Systemmodell der PWR dar, wobei es hier aus Komplexitätsgründen ausreicht lediglich das Leistungselektronikmodul (LE-Modul, Abbildung 11) physikalisch zu simulieren. Das Kontrollmodul sowie das Treiberboard können als Algorithmus bzw. Verhaltensmodell abgebildet werden [8]. Im Modell des LE-Moduls ist neben den Transistor-Dioden-Modulen auch der Zwischenkreiskondensator integriert.

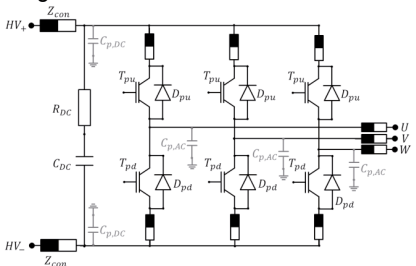


Abbildung 11: Modell des Leistungselektronikmoduls inklusiver der parasitären Elemente

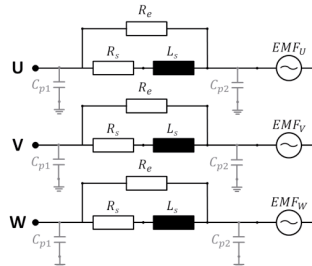


Abbildung 12: Modell der elektrischen Maschine mit parasitären Elementen zum Gehäuse

Um eine aussagekräftige Analyse der EMV-Störemissionen durchführen zu können, müssen aber vor allem die Leiter- und Anschlussimpedanzen, sowie die parasitären Koppelpfade zum Gehäuse [9] [3] integriert werden.

Als geeignetes Modell für die Simulation von LF- und HF-Vorgängen der elektrischen Maschine mit Kopplung zum Gehäuse wurde, in Anlehnung an [10] [11], das in Abbildung 12 dargestellte Modell verwendet. Über die Gegenspannungsquellen kann der gewünschte fahrdynamische Betriebspunkt eingestellt werden. Als Modell für die geschirmten HV-Kabel werden T- bzw. π -Ersatzschaltbilder verwendet.

Zusätzlich sind in dem LE-Modell (Abbildung 10) die Einbaupositionen für optionale Frontend- und Backend-Filter [6] [12] [13], sowie die Messebenen für die zu analysierenden Stör- und Systemgrößen zu sehen.

3.2 Simulation fahrdynamischer Abhängigkeiten der Störemissionen

Zunächst wurde für das Simulationsmodell überprüft, dass die relevanten Systemgrößen im HV-Bordnetz die korrekte Charakteristik und Betriebsfallabhängigkeit besitzen, die in Abschnitt 2 beschrieben wurden. Dazu wurde das Referenzmodell in mehreren Betriebspunkten mit verschiedenen Drehzahlen und Lastmomenten simuliert. Zusätzlich war dabei als Frontend-Filter ein einfaches CM-Filter ($\gamma_F = 10.0$) installiert. Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen hierzu die Lastabhängigkeit von $V_{DC,DM}$ bzw. deren Unabhängigkeit für $V_{DC,CM}$ exemplarisch für zwei Drehzahlen (n_1, n_2) und vier Lastmomente ($M_1 - M_4$). Die Kombinationen (n_1, M_3) und (n_2, M_2) sowie (n_1, M_4) und (n_2, M_3) bilden dabei jeweils paarweise den gleichen mechanischen Leistungszustand ab.

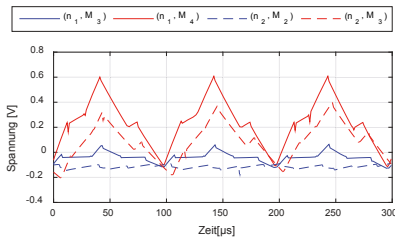


Abbildung 13: Lastabhängigkeit der simulierten Spannung $V_{DC,DM}$

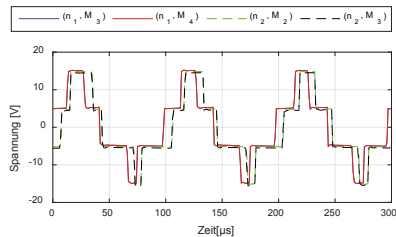


Abbildung 14: Lastunabhängigkeit der simulierten Spannung $V_{DC,CM}$

An diesen Ergebnissen ist schon zu erkennen, dass die aus der Theorie und den Messdaten bekannten Verläufe und Abhängigkeiten durch das Simulationsmodell entsprechend abgebildet werden.

3.3 Integration von Filtermaßnahmen in das Referenzmodell

In einem zweiten Schritt wurden verschiedene Frontend-Filter zur Einstellung des CM-Ripples auf der HVDC-Bordnetzseite miteinander verglichen. Simulationsgestützt analysiert wurde dabei zunächst nur die Auswirkung auf die Störspannungen $V_{DC,CM}$ allein, so wie es üblicherweise auch bei der Störemissionsanalyse der Einzelkomponente im Labor geschehen würde. Exemplarisch zeigt hierzu Abbildung 15 die Filterwirkung für die Koppelfaktoren $\gamma_{F,I} = 10.0$, $\gamma_{F,II} = 44.0$ und $\gamma_{F,III} = 97.0$. Ein Filter mit $\gamma_{F,I} = 10.0$ bewirkt dabei eine eher mittelmäßige, vielleicht noch akzeptable

Dämpfung. Das Filter mit $\gamma_{F,III} = 97.0$ hingegen führt zur nahezu vollständigen Glättung des CM-Ripples.

Allerdings erhöht sich zugleich mit der steigenden Filterwirkung der Anteil des CM-Störstroms, der von der AC-Seite in das Fahrzeugesamtsystem fließt (Abbildung 16).

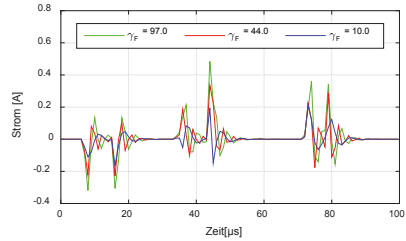
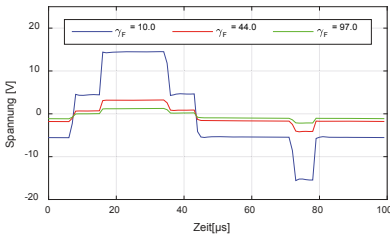


Abbildung 15: Filterwirkung auf die Spannung $V_{Dc,CM}$ **Abbildung 16: CM-Strom $I_{AC,CM, PWR}$ am PWR**

Im Normalfall fließt ein Großteil dieses CM-Stroms über den Pfad der Kabelschirme zurück zum Frontend-Filter des PWR, da dieser Pfad entsprechend niederimpedant für den betreffenden Frequenzbereich ausgelegt werden sollte. Ein viel größeres Problem aus Gesamtsystem Sicht besteht aber aus der Tatsache, dass eben nicht der gesamte CM-Störstrom über den Kabelschirm abfließt, sondern dieser sich aufteilt in verschiedene Störströme (Abbildung 17), die sich dann zum Beispiel über die Verbindung zwischen Motorgehäuse und Karosserie ausbreiten. Auch die Strompegel auf all diesen Pfaden erhöhen sich gleichsam in Relation (Abbildung 18).

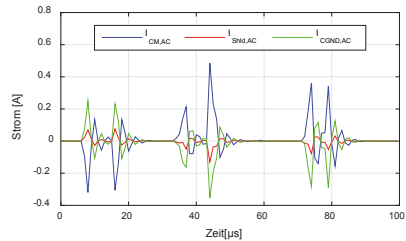
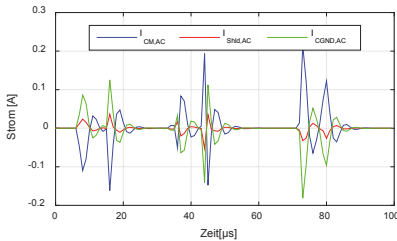


Abbildung 17: Aufteilung der CM-Ström für $\gamma_F = 10.0$ **Abbildung 18: Aufteilung der CM-Ström für $\gamma_F = 97.0$**

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Beitrag wurden zunächst einige wichtige leitungsgeführten Störgrößen im HV-Bordnetz von Hybrid- und Elektrofahrzeugen vorgestellt, welche vom Antriebsstrang verursacht werden können. Dazu werden deren Zusammensetzung und Einflussgrößen, sowie ihre fahrdynamische Zustandsabhängigkeit aufgezeigt. Um die Wirkung der Störaussendung der Komponente auf das System HV-Bordnetz gezielt untersuchen zu können, ist ein geeignetes Simulationsmodell des HV-Antriebsstrangs definiert und die zentralen Komponenten der Leistungselektronik und der elektrischen Maschine kurz vorgestellt worden. Mit diesem Modell lassen sich gezielt Analysen zum EMV-Verhalten in den verschiedenen Betriebszuständen des Fahrzeugs durchführen und auch die Auswirkungen von verschiedenen technischen Änderungen an Einzelkomponenten auf das HV-System untersuchen und bewerten. Abschließend ist die Anwendbarkeit und

Funktionsfähigkeit nachgewiesen worden, indem exemplarisch die Auswirkungen von implementierten Filtermaßnahmen im Pulswechselrichter simuliert wurden. Durch die Simulation im Systemverbundkontext ist es dabei möglich, die Effekte nicht nur für die Einzelkomponente PWR zu analysieren, wie zum Beispiel im Laboraufbau oder bei Komponententests, sondern auch die Ausbreitung von Störungen zu analysieren und zu bewerten.

Literaturverzeichnis

- [1] P. A. Dahono, Y. Sato und T. Kataoka, „Analysis and minimization of ripple components of input current and voltage of PWM inverters,“ *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Bd. 32, Nr. 4, pp. 945-950, 1996.
- [2] P. Xuejun, K. Yong und C. Jian, „Analysis and calculation of DC-link current and voltage ripple for three-phase inverter with unbalanced loads,“ 2014, pp. 1565-1572.
- [3] R. Zhang, X. Wu und T. Wang, „Analysis of common mode EMI for three-phase voltage source converters,“ Bd. 4, 2003, pp. 1510-1515.
- [4] D. G. Holmes und T. A. Lipo, Pulse width modulation for power converters, Bd. 2, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003, p. 724.
- [5] H. Jin und S. Haixia, „Reducing the Common-Mode Voltage through Carrier Peak Position Modulation in an SPWM Three-Phase Inverter,“ *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Bd. 29, Nr. 9, pp. 4490-4495, 2014.
- [6] M. H. Hedayati, A. B. Acharya und V. John, „Common-Mode Filter Design for PWM Rectifier-Based Motor Drives,“ *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Bd. 28, Nr. 11, pp. 5364-5371, 2013.
- [7] J. Specovios, Grundkurs Leistungselektronik, 6th rev. Hrsg., Springer Vieweg, 2013.
- [8] S. Niedzwiedz und S. Frei, „Transient emission analysis of EV- and HEV-powertrains using simulation,“ 2013, pp. 247-252.
- [9] S. Chen, T. A. Lipo und D. Fitzgerald, „Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters,“ *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Bd. 11, Nr. 1, pp. 25-32, 1996.
- [10] M. Schinkel, S. Weber, S. Guttowski, W. John und H. Reichl, „Efficient HF modeling and model parameterization of induction machines for time and frequency domain simulations,“ 2006, p. 6 pp.
- [11] A. Boglietti, A. Cavagnino und M. Lazzari, „Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors,“ *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Bd. 43, Nr. 1, pp. 23-29, 2007.
- [12] M. C. Di Piazza, M. Luna und G. Vitale, „EMI Reduction in DC-Fed Electric Drives by Active Common-Mode Compensator,“ *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, Bd. 56, Nr. 5, pp. 1067-1076, 2014.
- [13] Z. Chentian und T. H. Hubing, „An Active Cancellation Circuit for Reducing Electrical Noise from Three-Phase AC Motor Drivers,“ *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, Bd. 56, Nr. 1, pp. 60-66, 2014.
- [14] A. Boglietti und E. Carpaneto, „Induction motor high frequency model,“ Bd. 3, 1999, pp. 1551-1558.