

Modulares Power-HIL-Konzept: Flexibles Testen und Validieren bei voller Leistung

Dr.-Ing. Manuel Fischer

dSPACE GmbH
RTDS-EED
Konrad-Zuse-Straße 98
71034 Böblingen
mafischer@dspace.de

Abstract: Das Validieren von Komponenten mit Power-HIL-Prüfständen hält mehr und mehr Einzug in bestehende Entwicklungsprozesse – nicht nur im Automobilsektor. Insbesondere die enorme Flexibilität, die es ermöglicht, das elektrische Umgebungsverhalten des Prüflings per Software zu verändern, befördert Power-HIL-Prüfstände in den Status einer nennenswerten Alternative zu Prüfständen mit rotierenden Motoren. Der Beitrag stellt die wesentlichen Hauptkomponenten eines hochdynamischen Power-HIL-Prüfstands vor und leitet Anforderungen ab, welchen das leistungselektronische Stellglied genügen muss. Die Realisierung des Konzepts in Hardware wird aufgezeigt und abschließend mit Messungen belegt.

1 Einleitung

Die Elektromobilität ist einer der Megatrends in der Automobilbranche. Der Antriebsstrang eines elektrisch angetriebenen Autos besteht in der Regel aus einer Hochvoltbatterie, einem Traktionswechselrichter (WR) und einer elektrischen Maschine. Während des gesamten Entwicklungsprozesses spielen Testen und Validieren eine entscheidende Rolle, um neben Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit auch die Effizienz des Gesamtsystems nachzuweisen. Diese Hardware-Tests müssen in Übereinstimmung mit gängigen Normen, zum Beispiel der ISO 21498, durchgeführt werden.

Zu diesem Zweck wird üblicherweise ein Maschinenprüfstand verwendet (Abb. 1). Die untersuchte Maschine ist mit einer Lastmaschine gekuppelt, um unterschiedliche mechanische Betriebspunkte einzustellen. Der Prüflingswechselrichter (Device Under Test, DUT) wandelt die Gleichspannung der speisenden Batterie in die gewünschten Wechselspannungsformen um, um die untersuchte Maschine anzutreiben. Da diese Maschinenprüfstände unflexibel gegenüber variablen Maschinen- oder Batterieparametern sind, kann das DUT alternativ auch mit Hilfe eines Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Emulators getestet werden.

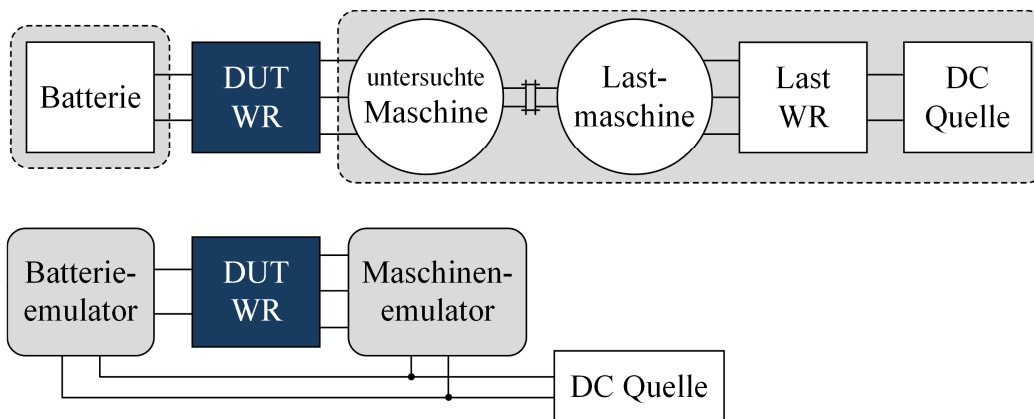


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines herkömmlichen Maschinenprüfstands (oben) im Vergleich zu einem PHIL-Prüfstand (unten)

Dazu werden die Eingangs- und Ausgangsklemmen des DUT mit einem leistungselektronischen Stellglied (LESG) verbunden, welches dieselbe elektrische Charakteristik aufweist wie die betrachtete Batterie und die Maschine, siehe Abb. 1.

Der PHIL-Prüfstand besteht aus drei Hauptkomponenten:

- einem Batterie- und einem Maschinenmodell, die das elektrische Verhalten der Batterie und der Maschine in Abhängigkeit vom Schaltverhalten des DUT in Echtzeit berechnen,
- einer Regeleinheit, welche das LESG so ansteuert, dass die gleichen Lastströme wie im realen Prüfstand fließen,
- dem LESG selbst, das die gewünschten Lastströme einstellt.

In diesem Beitrag wird ein modularer Ansatz verfolgt, bei dem das LESG und die Stromregeleinheit jeweils auf einem Lastmodul vereint sind [MEY17, FIS22]. Jedes Lastmodul kann somit bidirektional als hochdynamische Stromquelle und -senke verwendet werden und genau eine Funktion elektrisch nachbilden, zum Beispiel einen Phasenanschluss einer Maschine oder einen einzelnen Batteriepol. Durch den modularen Ansatz ist man in der Anzahl emulierter Funktionen frei und nicht beispielsweise auf eine bestimmte Phasenanzahl der Maschine beschränkt. Der maximale Ausgangsstrom und damit die elektrische Maximalleistung einer Funktion kann über die Anzahl parallel geschalteter Lastmodule skaliert und je nach Testfall durch Veränderung der Modulanzahl variiert werden. Das elektrische Verhalten wird durch das Echtzeitmodell vorgegeben.

2 Modulares Power-HIL-Konzept

Abb. 2 zeigt die schematische Darstellung des gesamten PHIL-Systems. Das DUT ist an jedem Leistungsanschluss elektrisch an oben beschriebene Lastmodule angeschlossen, welche aus einem gemeinsamen Zwischenkreis V_{ZK} gespeist werden.

Die Lastmodule an den DC-Klemmen des DUT bilden das Verhalten der Batterie nach. Nach der Messung der Eingangsströme $i_{\text{Bat}+}$ und $i_{\text{Bat}-}$ berechnet das Batteriemodell den aktuellen Zustand und insbesondere die Ausgangsspannung $v_{\text{Bat,soll}}$ der emulierten Batterie in Echtzeit. Dieser Sollwert der Ausgangsspannung wird einem überlagerten Spannungsregler übergeben, der wiederum die Ströme $i_{\text{Bat,soll}}$ ermittelt, welche von den Lastmodulen gestellt werden müssen, damit die Spannung v_{Bat} über dem Kondensator C_{Bat} der gewünschten Batterieausgangsspannung $v_{\text{Bat,soll}}$ folgt.

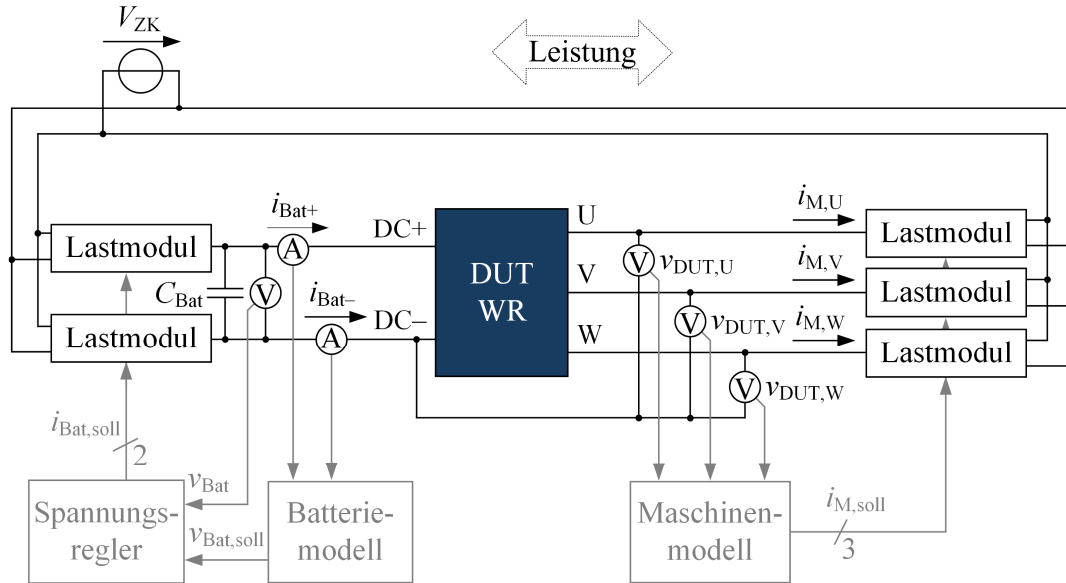


Abbildung 2: Übersichtsdiagramm des gesamten Power-HIL-Systems

Die Lastmodule an den AC-Klemmen des DUT emulieren das Verhalten der untersuchten Maschine. Nach der Messung der drei Ausgangsspannungen $v_{\text{DUT},x}$ (mit $x = U, V, W$) berechnet das Maschinenmodell den aktuellen Zustand und insbesondere die Eingangsströme $i_{\text{M,soll},x}$ der untersuchten Maschine und gibt diese als Sollwerte an die zugehörigen Lastmodule weiter. Darüber hinaus können zusätzliche Zustandsinformationen wie Kommunikation oder Lagesensoremulation auch über Schnittstellen ausgegeben werden.

Im motorischen Betrieb der virtuellen Maschine speisen die Lastmodule der Batterieemulation die eingangsseitige Leistung des DUT, die Lastmodule der Motoremulation speisen die Ausgangsleistung des Wechselrichters in den gemeinsamen Zwischenkreis zurück (und umgekehrt im generatorischen Betrieb). Folglich ergibt sich ein zirkulierender Leistungsfluss über den gemeinsamen Zwischenkreis, so dass die Gleichspannungsquelle V_{ZK} nur die Verlustleistung des Systems nachführen muss. Die hochdynamische Stromregelung der Lastmodule verhindert das Auftreten von ungewünschten Kreisströmen.

3 Hochvoltlastmodule

Die PHIL-Anwendung stellt mehrere Anforderungen an die Lastmodule: Spannungsfestigkeit für Batteriespannungen über 1000 V, hohe Ausgangsströme mit Bandbreiten von einigen kHz, Bidirektionalität hinsichtlich des Leistungsflusses, das Einbringen von möglichst wenig zusätzlichem Oberschwingungsgehalt und die Modularität, mehrere Module parallel betreiben und die Systemleistung je nach Anwendungsfall skalieren zu können. Zudem sollen die elektrischen Maximalwerte ohne Derating (Leistungshyperbel) einstellbar sein.

Bereits untersuchte Topologien sind Wechselrichter mit parallel geschalteten und versetzt angesteuerten Halbbrückenzeigen [NEM16], Wechselrichter mit Ausgangsfilter [FIS19], Linearverstärker [AMI19] oder speziell entwickelte Wechselrichterkonzepte wie Vierpunktwechselrichter mit veränderlichen Ausgangspotenzialen [FIS23].

Eine Topologie, die oben genannte Anforderungen vollständig erfüllt, ist der mehrzweigige NPC-Wechselrichter, siehe Abb. 3. Die zusätzlichen einstellbaren Ausgangsspannungen im Vergleich zu einem konventionellen Zweipunktwechselrichter verringern die harmonische Verzerrung der Ströme. Außerdem sperren in jedem Schaltzustand mindestens zwei Schalter die Zwischenkreisspannung V_{ZK} , wodurch jeder Schalter nur die Spannungsfestigkeit der halben Zwischenkreisspannung aufweisen muss. Die Schalter sind als schnell schaltende Siliziumkarbid-MOSFETs ausgeführt. Pro Modul sind drei NPC-Halbbrückenzeige parallel geschaltet. Dadurch kann der Ausgangsstrom dreimal so hoch sein wie der maximale Strom eines einzelnen Zweigs. Die drei Zweige sind jeweils paarweise über drei magnetisch gekoppelte Koppeldrosseln verknüpft, welche einer asymmetrischen Stromverteilung auf die drei Zweige entgegenwirken. Die Ausgangsspannung v_{Mod} kann am gemeinsamen Sammelpunkt je nach Schaltzustand der drei Zweige sieben diskrete Spannungszustände annehmen. Nach dem Sammelpunkt ist eine Längsdrossel L_C geschaltet, die als Regelstrecke zwischen dem DUT und den Lastmodulen wirkt.

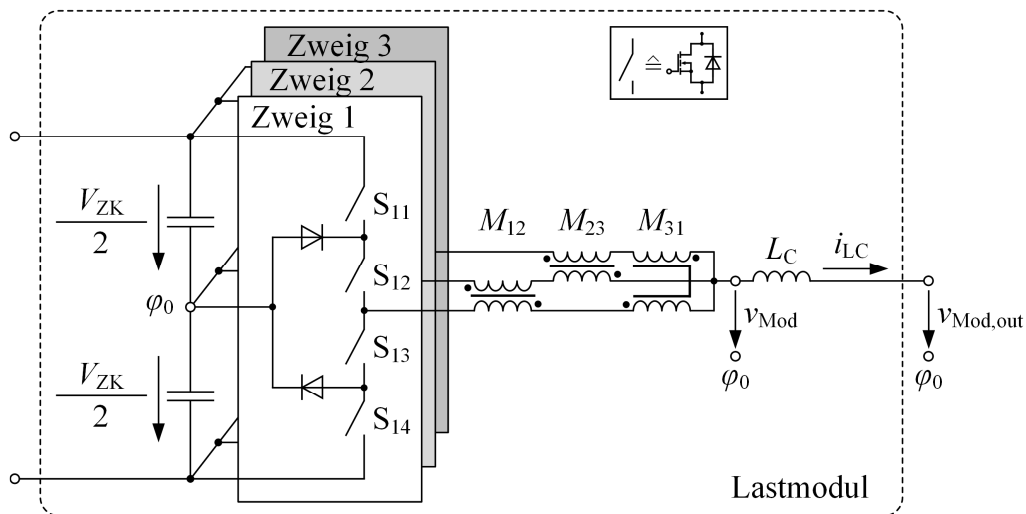


Abbildung 3: Schaltbild des LESG eines Lastmoduls

4 Echtzeitmodelle

Die Genauigkeit der Maschinen- und Batteriemodelle bestimmt die Qualität der Emulationsergebnisse. Eine notwendige Bedingung ist, dass alle Modelle in Echtzeit lauffähig sein müssen. In dieser Arbeit wird eine dreiphasige, permanentmagnet-erregte Synchronmaschine (PMSM) nach [BOE12, PLO13] simuliert. Diese Auswahl schränkt jedoch nicht die Nutzung anderer echtzeitfähiger Maschinenmodelle ein. Die Nachbildung anderer Maschinentypen ist genauso möglich wie die Emulation von Maschinen mit einer beliebigen Anzahl von Phasen oder weiteren Nichtlinearitäten.

Der elektrische Teil des Modells ist in Abb. 4 dargestellt. In Abhängigkeit der Ausgangsspannungen $v_{DUT,x}$ des DUT werden die Motorströme i_d und i_q im feldorientierten dq-System berechnet. Einflussparameter sind der Wicklungswiderstand R_S sowie die variablen Induktivitäten L_d und L_q und der Fluss des Permanentmagneten Ψ_{PM} , die jeweils nichtlinear abhängig von den Motorströmen i_d und i_q sind. Die Abhängigkeiten werden in 3D-Look-up-Tabellen hinterlegt.

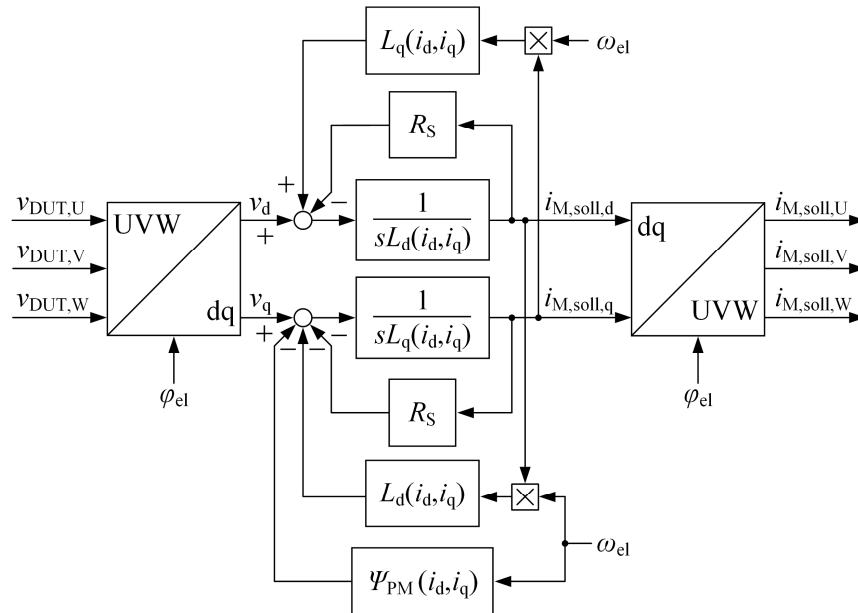


Abbildung 4: Blockdiagramm des nichtlinearen Maschinenmodells

Die Batterie wird mit dem in Abb. 5 dargestellten dynamischen Modell simuliert. V_{Zelle} stellt die innere Zellspannung dar, die direkt vom Ladezustand (State of Charge, SOC) abhängt. Außerdem berücksichtigt das Modell den

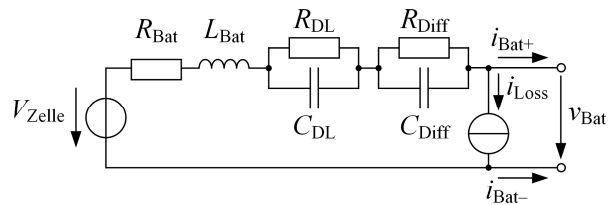


Abbildung 5: Schaltbild des dynamischen Batteriemodells

Widerstand R_{Bat} und die Induktivität L_{Bat} der Batterie, das dynamische Verhalten ihrer Diffusions- (R_{Diff} , C_{Diff}) und ihrer Doppelschicht (R_{DL} , C_{DL}) sowie zusätzliche Verluste (i_{Loss}). Genauere Erklärungen sind in [FIS22] zu finden.

5 Hardware-Aufbau und Messergebnisse

Das implementierte PHIL-System kann bei Spannungen über $V_{\text{ZK}} = 1000 \text{ V}$ betrieben werden. Abb. 6 zeigt den Hardware-Aufbau eines Lastmoduls. Jedes Lastmodul ist für Ströme bis zu $75 \text{ A}_{\text{RMS}}$ ausgelegt und erreicht Anstiegsgeschwindigkeiten bis zu $5 \text{ A}/\mu\text{s}$. Werden höhere Ströme oder höhere Anstiegsgeschwindigkeiten des Stroms benötigt, kann eine beliebige Anzahl von Modulen parallel betrieben werden. Auf dem FPGA ist die Stromregelung implementiert.

Die Echtzeitmodelle sind auf einem leistungsfähigen FPGA-Board mit einer Abtastzeit von 8 ns und schnellen I/O-Schnittstellen implementiert. Von diesem Echtzeit-FPGA werden lediglich die Referenzströme an die dezentralen FPGAs auf den Hochvoltmodulen übertragen. Ein Echtzeitprozessor dient als Schnittstelle zwischen dem Echtzeit-FPGA und dem Leitrechner. Dadurch können Modellparameter auch während der Laufzeit geändert werden.

Für die Messergebnisse in diesem Beitrag wird der Aufbau aus Abb. 2 mit einem einzelnen Modul pro Batteriepol und pro Maschinenphase aufgebaut. Das DUT ist ein dreiphasiger Maschinenwechselrichter. Da der Schwerpunkt auf den Maschinenströmen liegt, wird die Batteriespannung auf einen konstanten Wert geregelt. Die Parameter des DUT und des PHIL-Systems sind in Tabelle I zusammengefasst.

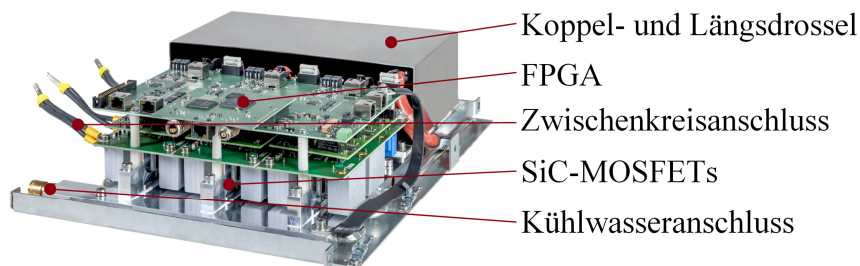


Abbildung 6: Hardware-Aufbau des Lastmoduls

Die virtuelle PMSM wird auf eine konstante Drehzahl von $n = 1.000 \text{ U/min}$ eingestellt. Der Prüflingswechselrichter arbeitet stromgeregelt. Seine Sollströme werden mit $i_{\text{DUT,soll,d}} = 0 \text{ A}$ und $i_{\text{DUT,ref,q}} = 50 \text{ A}$ vorgegeben. Dadurch ergibt sich ein nahezu konstantes virtuelles Drehmoment von $M = 195 \text{ Nm}$.

Die Messergebnisse des Ausgangsstroms $i_{M,U}$ der Phase U des DUT und seines Sollwerts $i_{M,soll,U}$ aus dem Maschinenmodell sind in Abb. 7 dargestellt. Die Regelung des DUT führt zu einem sinusförmigen Stromverlauf mit einer Amplitude von 50 A wie gewünscht. Der reale Laststrom folgt seinen Sollwerten aus dem Maschinenmodell ohne sichtbare Abweichung. Abb. 8 zeigt eine detaillierte Betrachtung der Ströme. Aufgrund seiner hohen Bandbreite ist das PHIL-System in der Lage, den Sollstrom genau nachzubilden.

Sogar die dreieckförmigen Stromrippel, die durch die taktende Arbeitsweise des DUT hervorgerufen werden, sind emuliert. Eine geringe zusätzliche Stromwelligkeit ist zu beobachten und resultiert aus dem Schaltverhalten der Lastmodule.

Tabelle I: Parameter des Hardware-Aufbaus

Parameter des Power-HIL	
Zwischenkreisspannung V_{ZK}	800 V
Taktfrequenz der Lastmodule	≤ 800 kHz
Parameter des DUT	
Batteriespannung v_{Bat} (konstant)	500 V
Taktfrequenz	5,2 kHz
Parameter des Maschinenmodells	
Maschinentyp	PMSM
Polpaarzahl z_p	3
Wicklungswiderstand R_S	0,01 Ω
Längsinduktivität L_d	2,7 mH
Querinduktivität L_q	2,7 mH
Fluss des Permanentmagneten Ψ_{PM}	0,87 Vs

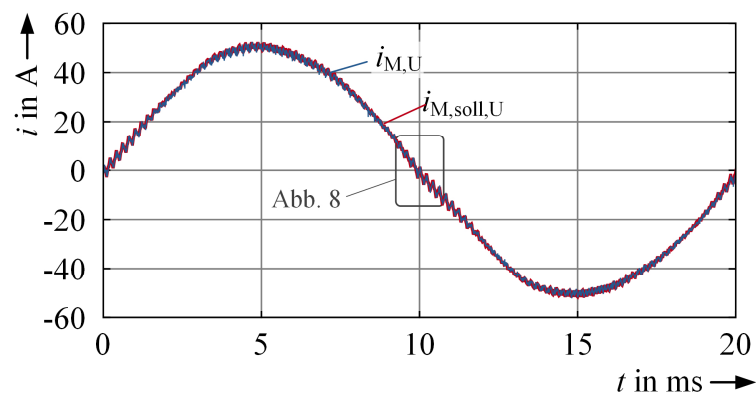


Abbildung 7: Messung des Phasenstroms

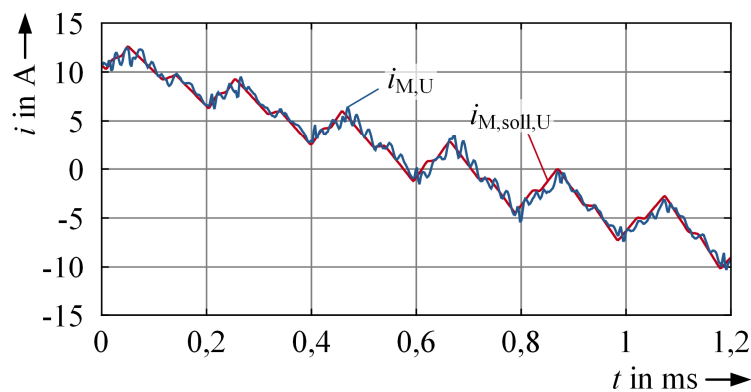


Abbildung 8: Detaillierte Betrachtung des Phasenstroms

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird das Konzept eines leistungsfähigen PHIL-Systems vorgestellt, das für Hochfrequenzanwendungen geeignet ist. Es wird der Aufbau eines Lastmoduls vorgestellt, das sich wie eine modulare Stromquelle mit hoher Bandbreite verhält. Jedes Lastmodul ist stromgeregt, so dass mehrere Lastmodule parallel betrieben werden können, um die Gesamtleistung des Systems zu erhöhen. Die benötigten Sollwerte werden durch echtzeitfähige Maschinen- und Batteriemodelle berechnet. Das gesamte PHIL-System wird in Hardware aufgebaut. Seine Leistungsfähigkeit wird durch Messergebnisse nachgewiesen, die insbesondere die hohe Echtzeitfähigkeit und Emulationsgenauigkeit hervorheben.

7 Literaturverzeichnis

- [AMI19] K. S. Amitkumar, et al. Linear Amplifier-Based Power-Hardware-in-the-Loop Emulation of a Variable Flux Machine, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, Nr. 5, S. 4624–4632, 2019.
- [BOE12] Matthias Boesing, et al. Modeling spatial harmonics and switching frequencies in PM synchronous machines and their electromagnetic forces, XXth International Conference on Electrical Machines, 2012.
- [FIS19] Manuel Fischer, et al. Investigation on a Three-Phase Inverter with LC Output Filter for Machine Emulation, EPE Europe 2019.
- [FIS22] Manuel Fischer, et al. High-Bandwidth Power Hardware-in-the-Loop for Motor and Battery Emulation at High Voltage Levels, EPE Europe 2022.
- [FIS23] Manuel Fischer. Emulation elektrischer Maschinen mit exakter Nachbildung rippelbehafteter Phasenströme, Dissertation, ISBN: 978-3-8440-9113-7, 2023.
- [MEY17] Gerrit Meyer. Enhanced Power Electronics System for High-Performance Testing of Motor Control Units in a Power HIL Environment, PCIM Asia 2017.
- [NEM16] Christian Nemec. Leistungselektronische Nachbildung von Drehstrommaschinen mit variablem induktiven Verhalten, Dissertation, ISBN: 978-3-8440-4288-7, 2016.
- [PLO13] Markus Plöger und Matthias Deter. Highly precise real-time simulation of E-motors, ATZ Elektronik, 2013.