

Optimierung eines PID-gesteuerten DC-DC-Konverters mit maschinellem Lernen

Patryk Krzyzanski

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wicht
Zweitprüfer: Dr.-Ing. Markus Olbrich

Leibniz Universität Hannover
Abteilung: Institut für Mikroelektronische Systeme

October 14, 2023

Abstract

In dieser Arbeit wird die Verwendung neuronaler Netze zur Optimierung und Steuerung eines PID-regulierten DC-Konverters untersucht. Das Ziel besteht darin, ein System zu entwickeln, das in der Lage ist, die altersbedingte Degradation von Schaltungskomponenten wie Kapazität und Induktivität zu überwachen und anzupassen, um die Leistung des Konverters aufrechtzuerhalten. Ein besonderer Fokus liegt auf dem Trainingsprozess und der Architektur des neuronalen Netzes. Der Trainingsprozess wird mithilfe von Methoden wie Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) und Bayesscher Optimierung umgesetzt. Das Training und die Schaltungssimulation werden unter Einsatz von Transientenanalyse mit SystemC durchgeführt, um eine präzise Bewertung und Auswertung der Simulationsergebnisse zu ermöglichen. Es werden Techniken zur Optimierung der Hyperparameter des neuronalen Netzes vorgestellt. Herausforderungen und Lösungsansätze im Kontext der neuronalen Netzarchitektur und des Trainings werden diskutiert. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse und ihre Implikationen für zukünftige Forschungen präsentiert.

Chapter 1

Einleitung

Chapter 2

Einleitung

Die effiziente und präzise Lenkung von Energie von einer Quelle zu einem Verbraucher stellt eine zentrale Herausforderung in der modernen Elektrotechnik dar. Gleichspannungswandler (DC-DC Konverter) spielen hier eine entscheidende Rolle [6, p. 70]. Es existieren verschiedene Methoden zur DC-DC-Spannungsumwandlung, jede mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen, abhängig von unterschiedlichen Betriebsbedingungen und Spezifikationen [6, p. 70].

Es wird zunehmend klar, dass bestimmte Schlüsselkomponenten, insbesondere Kapazitäten, eine Tendenz zur Degradation aufweisen. Diese Degradation ist häufig auf vielfältige Umwelteinflüsse zurückzuführen. Sie kann signifikante Auswirkungen auf die Funktionalität und Integrität der betroffenen Schaltungen haben. Daher ist es plausibel anzunehmen, dass die Lebensdauer und Effizienz von elektronischen Systemen erheblich beeinträchtigt werden könnten, wenn diese Degradationsmechanismen nicht sorgfältig betrachtet und adressiert werden.

Wissenschaftliche Untersuchungen stützen diese Beobachtungen. Jeong et al. haben in ihrem Artikel "Degradation-Sensitive Control Algorithm Based on Phase Optimization for Interleaved DC-DC Converters" spezifische Degradationsprozesse in DC-DC-Wandlern aufgezeigt. Dabei wurde insbesondere der äquivalente Serienwiderstand (ESR) von Kondensatoren als ein Hauptindikator für Degradation identifiziert [3, p. 1].

In einem ähnlichen Kontext haben Kulkarni et al. die systemischen Auswirkungen von Degradationen auf kritische Avioniksysteme hervorgehoben. Ihre Studien zeigen, dass solche Degradationen ernsthafte Konsequenzen für Navigationssysteme wie das Global Positioning System (GPS) und Inertial-Navigationssysteme haben können [4, p. 3].

Diese Erkenntnisse betonen die Notwendigkeit, die Mechanismen der Degradation elektronischer Komponenten auf Makro- und Mikroebene genau zu

verstehen. Nur so können innovative Lösungen entwickelt werden, die solche Phänomene minimieren oder sogar verhindern können.

Ein vielversprechender Ansatz könnte in der Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen (KNN) liegen. Wie Steven L. Brunton und J. Nathan Kutz in ihrem Werk "Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control" darlegen, bieten KNN ausgezeichnete Möglichkeiten zur Steuerung komplexer, nichtlinearer Systeme, einschließlich elektronischer Schaltungen [2, p. 270]. Almawlawe et al. konnten in ihrer Studie zeigen, dass neuronale Netzwerk-Controller im Vergleich zu traditionellen Proportional-Integral-Derivative (PID)- und digitalen Gleitmodus-Reglern eine überlegene Leistung bei der Ausgangsspannungsverfolgung eines Buck DC/DC-Konverters bieten [1, p. 8]. Miguel Morales betont in "Grokking Deep Reinforcement Learning", dass KNN einer der leistungsfähigsten Funktionsapproximatoren sind und oft andere Methoden übertreffen [5, p. 22].

In dieser Arbeit wird untersucht, wie KNN dazu genutzt werden können, um die Degradation von Schaltungskomponenten zu überwachen und die PID-Koeffizienten eines DC-Konverters entsprechend anzupassen. Themen wie die Architektur des Netzes, Trainingsmethoden und -umgebungen, sowie Herausforderungen beim Training und deren Lösungsansätze werden behandelt.

Chapter 3

Grundlagen

Grundlagenkapitel:

Im Grundlagenkapitel erklären Sie die einzelnen Techniken, Methoden oder Konzepte, die in Ihrem Experiment verwendet werden, detailliert. Dies hilft den Lesern, ein grundlegendes Verständnis für die verwendeten Techniken zu entwickeln und die Kontextualisierung des Experiments zu verstehen. Durch das Herunterbrechen und Erklären der einzelnen Techniken bereiten Sie die Leser darauf vor, die Komplexität Ihres Experiments zu verstehen.

Basierend auf den Informationen in dem Text können die folgenden Themen für die Literaturrecherche im Kapitel "Grundlagen" der Arbeit erwähnt werden:

1. Gleichspannungswandler (DC-DC-Konverter)
2. Alterungsbedingte Degradation von Schaltungskomponenten
3. Neuronale Netze
4. Aktivierungs Funktionen
5. Gradient Descent
6. Phenomen Des Deep Learning
7. Deep Q Learning
8. DDPG
4. Trainingsprozess und Architektur neuronaler Netze
3. Verwendung neuronaler Netze zur Schaltungsoptimierung
5. Anwendung von Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) und Bayesscher Optimierung in der Schaltungsoptimierung
6. Transientenanalyse mit SystemC zur Bewertung von Simulationsergebnissen
7. Hyperparameteroptimierung für neuronale Netze
8. Vergleich von neuronalen Netzwerk-Controllern mit traditionellen PID- und digitalen Gleitmodus-Reglern
9. Anwendung von neuronalen Netzen zur Überwachung und Anpassung von Schaltungsdegradation
10. Verifizierung der Schaltungsoptimierung durch Triangulation
11. Herausforderungen und Lösungsansätze bei der neuronalen Netzarchitektur und dem Training
12. Ergebnisse und Implikationen für zukünftige Forschungen

Dies sind nur Vorschläge und die genaue Struktur und Auswahl der Themen hängt von den spezifischen Zielen der Arbeit ab.

3.0.1 Grundlagen des Buck-Konverters in DC-DC-Wandlern

Die Wandlung von Gleichspannung (DC) in eine andere Gleichspannung ist ein kritischer Aspekt in der Elektronik und Energieversorgung. Ein weit verbreitetes Schaltungsdesign, das diese Funktion ausführt, ist der Buck-Konverter. In der Literatur wird dieser als eine Standardmethode für DC-DC-Wandlung beschrieben [Luo2004].

Hauptkomponenten und Funktionen

- **MOSFET-Transistor:** Der MOSFET-Transistor dient als elektronischer Schalter, der den Stromfluss durch die Schaltung steuert. Wie erwähnt, kann der Einsatz von MOSFET-Transistoren die Effizienz signifikant erhöhen, da sie niedrigere Verluste im Vergleich zu anderen Schaltern haben.
- **Induktivität (Spule):** Diese speichert temporär Energie in Form eines Magnetfelds, wenn Strom hindurchfließt.
- **Diode:** Die Diode erlaubt den Stromfluss nur in einer Richtung, insbesondere wenn der MOSFET ausgeschaltet ist.
- **Kondensator:** Der Kondensator glättet die Ausgangsspannung und speichert Energie für die Last.

Regelung und Anwendungen

In der Praxis werden Buck-Konverter oft von einer nicht-idealen Spannungsquelle gespeist und müssen daher unter variablen Eingangsspannungen und Lastströmen arbeiten [choi2013pulsewidth]. Daher ist eine geschlossene Regelungsschleife erforderlich, um eine konstante Ausgangsspannung sicherzustellen.

Buck-Konverter finden eine breite Anwendung in verschiedenen elektronischen Geräten und Systemen. Ihr hoher Wirkungsgrad, der in der Regel zwischen 75% und 98% liegt, macht sie besonders attraktiv.

Appendix A

Anhang

Bibliography

- [1] Muhanad D. Hashim Alkawlawe, Muhammad Al-badri, and Issam Hayder Alsakini. “Performance Improvement of a DC/DC Converter Using Neural Network Controller in comparison with Different Controllers”. In: *Unknown Journal* Unknown Volume.Unknown Number (2023), Unknown Pages.
- [2] Steven L. Brunton and J. Nathan Kutz. *Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*. University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom: Cambridge University Press, 2019. ISBN: 978-1-108-42209-3. DOI: 10.1017/9781108380690. URL: <https://www.cambridge.org/9781108422093>.
- [3] Jaeyoon Jeong, Sangshin Kwak, and Seungdeog Choi. “Degradation-Sensitive Control Algorithm Based on Phase Optimization for Interleaved DC–DC Converters”. In: *Machines* 11 (2023). Received: 1 May 2023, Revised: 29 May 2023, Accepted: 30 May 2023, Published: 5 June 2023, p. 624. DOI: 10.3390/machines11060624. URL: <https://www.mdpi.com/journal/machines>.
- [4] Chetan Kulkarni et al. “Model-based Avionics Systems Fault Simulation and Detection”. In: *[Journal Name - Not Provided]* (2023).
- [5] Miguel Morales. *Grokking Deep Reinforcement Learning*. With a forew. by Jr. Charles Isbell. 20 Baldwin Road, PO Box 761, Shelter Island, NY 11964: Manning Publications Co., Dec. 2020. URL: <https://www.manning.com>.
- [6] Mike Wens and Michiel Steyaert. *Design and Implementation of Fully-Integrated Inductive DC-DC Converters in Standard CMOS*. Series Editors: Mohammed Ismail; Mohamad Sawan. ESAT-MICAS, Dept. Elektrotechniek, K.U. Leuven. Leuven, Belgium: [Publisher Name - Not Provided], 2022.