

- **Simulation der Störemissionen von Traktionsinvertern im Komponententest nach CISPR 25**

M. Sc. Philipp Hillenbrand

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. J. Roth-Stielow

Tag der mündlichen Prüfung:

09.11.2018

Die vorliegende Arbeit untersucht Modellierungsaspekte leitungs- und feldgebundener Störemissionen von Traktionsinvertern in einer Prüfumgebung nach der Norm CISPR 25. Es wird ein dreistufiger Simulationsansatz entwickelt, der für verschiedene Entwicklungsphasen adaptierbare Modelle unterschiedlicher Komplexität vorsieht. Die Simulationsansätze eignen sich, dank geringer Rechenzeit, für die Integration in Optimierungsalgorithmen.

Für die erste Modellstufe werden phänomenologische Ersatznetzwerke entwickelt, die Gleich- und Gegentaktstörungen getrennt voneinander modellieren. Alle Modellbestandteile werden vollständig aus messbaren Größen des Testaufbaus abgeleitet. Die Modelle sind im Frequenzbereich konzipiert und besitzen eine minimale Komplexität. Die geringe Anzahl an Elementen der Netzwerkmodelle liefert visuell ein tiefes Verständnis über die Entstehung und Ausbreitung der Störemissionen innerhalb der Prüfumgebung. Gleichzeitig ist die erzielte Genauigkeit ausreichend hoch, um eine erste Abschätzung bezüglich dem Bauraum von notwendigen Filterelementen vornehmen zu können.

In der zweiten Modellstufe wird ein 3D-Geometriemodell des gesamten Komponententests erstellt und mit gemessenen Streuparametern von Komponenten des Aufbaus kombiniert. Die Anregung des passiven Systems durch Störquellen erfolgt im Frequenzbereich mit idealen Spannungsquellen zwischen Drain und Source der Halbleiterchips. Die Information über die Störquellen wird gesondert in einer transienten Schaltungssimulation gewonnen. Beide Simulationen zusammen sind in der Lage, sowohl leitungs- als auch feldgebundene Störemissionen vorherzusagen. Der Ansatz eröffnet die Möglichkeit, dass die Simulation der Quellen im Zeitbereich und die des Übertragungswegs im Frequenzbereich voneinander getrennt werden können. Darüber hinaus kann die Simulation der Quellen stark vereinfacht und dadurch die Simulationszeit im Zeitbereich deutlich reduziert werden. Es wird gezeigt, dass die Störquellen näherungsweise unabhängig von den Impedanzen des Gleichtakt-strompfads und von Elementen auf der Gleichspannungsseite des Inverters sind. Je nach Einbauort ist eine Optimierung der notwendigen Filterelemente daher komplett im Frequenzbereich mit kurzen Rechenzeiten möglich.

Die dritte Modellstufe nutzt Doppelpulsmessungen des Leistungsmoduls zur Erhöhung der Modellgenauigkeit. Es wird das Halbleitermodell zur Bestimmung der Störquellen betrachtet. In einem statischen Zustand des Leistungsschalters können die, hinsichtlich der Störemissionen, sensitiven Parameter des Modells nicht korrekt ermittelt werden. Die Untersuchung zeigt daher eine Methode zur Extraktion der relevanten Halbleiterparameter aus Schaltvorgängen in einer bekannten Prüfumgebung. Die dynamisch bestimmten Parameterwerte erhöhen die Vorhersagegenauigkeit der Störemissionsmodelle für den UKW-Bereich deutlich.

- **Simulation of Electromagnetic Emissions Caused by Traction Inverters in a CISPR25 Component Level Test Setup**

M. Sc. Philipp Hillenbrand

This work investigates modeling aspects of conducted and radiated emissions caused by traction inverters in a component level test setup according to the CISPR 25 standard. A three-step simulation approach is presented that provides models of varying complexity, adaptable to different product development stages of an inverter. The models are suitable for the integration into optimization algorithms thanks to short computation times. For the first model stage, physics based equivalent circuits are developed that model common- and differential-mode interferences separately. All model quantities are derived entirely from measurements of the test setup. The models are designed in the frequency domain, with minimal complexity. The limited number of network elements facilitates a deep understanding into the origin and propagation of the interferences within the test environment. At the same time, the achieved model accuracy is sufficient to gauge the required volume for necessary filter elements.

In the second model stage, a geometric 3D model of the entire component test setup is created and combined with measured scattering parameters of its components. The excitation of the resulting passive system is implemented in the frequency domain with ideal voltage sources at the semiconductor switches. The source characteristics are derived separately in a transient circuit simulation. The combination of the two is able to predict both, conducted as well as radiated emissions. This suggests that the time domain simulation of the sources can be considered separately from the frequency domain simulation of the transmission path. In addition, the simulation of the sources is simplified, by neglecting all elements except for the commutation cell and the differential impedances on the load side. This significantly reduces the transient simulation time. Once this part of the simulation is done, it can be combined with different transmission paths. The filter elements can thus be modelled in the frequency domain with very short computation times enabling fast and efficient optimizations. The third model stage uses double-pulse measurements to increase the model accuracy. The focus is on the critical part of the transient circuit simulation: the semiconductor model. Accurate measurement results of the necessary switch model parameters cannot be achieved in a passive state of the switches. The study therefore shows a method for extracting the crucial semiconductor parameters from switching events in a pre-characterized test environment. In the FM range, the extracted parameter values significantly increase the accuracy of the emission models compared to model parameters measured in a passive state of the switches.