

Differentialmessmethode für hochfrequente Wellenströme bei Hochvolt-Antrieben

Sergii Tsiapenko, M. Sc., Universität Duisburg-Essen, Deutschland
Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch, Universität Duisburg-Essen, Deutschland

Einleitung

Die Autoindustrie erlebt einen Wandel von Otto-Motoren hin zu elektrischen Antrieben. Als Ergebnis werden mehr und mehr neue Antriebsvarianten und -topologien erprobt und letztendlich in Fahrzeugen eingesetzt. Die dabei entstehende Vielfalt der Komponenten, für die eine EMV-Konformität nachgewiesen werden muss, nimmt zu.

Obwohl die vierte Ausgabe der CISPR 25 [1] Anforderungen für die Störaussendung von Hochvolt (HV)- und Niedervolt (LV)-Komponenten und erstmalig auch für die Kopplung zwischen beiden Bordnetzteilen definiert, bleiben Lücken, die in der Praxis durchaus zu Problemen führen können. Dazu gehören elektrische Maschinen mit den in ihnen entstehenden hochfrequenten Antriebswellenströmen, welche auf Mikro-Durchschläge und Kontaktentladungen in den Lagern zurückzuführen sind. Es sind mehrere Publikationen über diese Phänomene erschienen [2-5], die aber nicht zur Definition geeigneter Messmethoden geführt haben.

Die messtechnische Erfassung der Störaussendung auf der mechanischen Welle kann entweder berührungslos mit einer Stromzange oder mittels Kontaktierung über einen Shunt erfolgen. Beide Messmittel müssen für eine reproduzierbare Messung im Bereich der Welle montiert werden [6]. Das beschränkte Raumangebot, Sicherheitsaspekte und die Größenunterschiede zwischen Maschine und Messwertaufnehmer beschränken die Nutzung dieser Messmittel erheblich.

Um diese Probleme bei der Messung zu vermeiden wird in diesem Beitrag eine Differentialmessmethode für hochfrequente Wellenströme vorgestellt. Diese eignet sich für den Einsatz im Aufbau nach CISPR 25.

Konzept

Für die Entwicklung der Messmethode wird eine Asynchronmaschine aus einem bestehenden Antriebssatz als Versuchsobjekt verwendet, dessen Störaussendung mit den unterschiedlichen Methoden vermessen werden soll. Typischerweise werden die elektrischen Maschinen bei der Betrachtung des EMV-Verhaltens eines Antriebsstrangs als rein passive und voll geschirmte Komponenten betrachtet. Diese vereinfachte Sicht auf die Störaussendungs-Charakteristik kann am Versuchsmuster nicht bestätigt werden. Einerseits bedingt die Konstruktion der Maschine eine kapazitive Kopplung zwischen Stator- und Rotorkreis, andererseits entstehen bei der Rotation Kontaktentladungen und Mikrodurchschläge im Bereich der Kugellager, was eine erhöhte Störaussendung im höherfrequenten Teil des Spektrums verursacht.

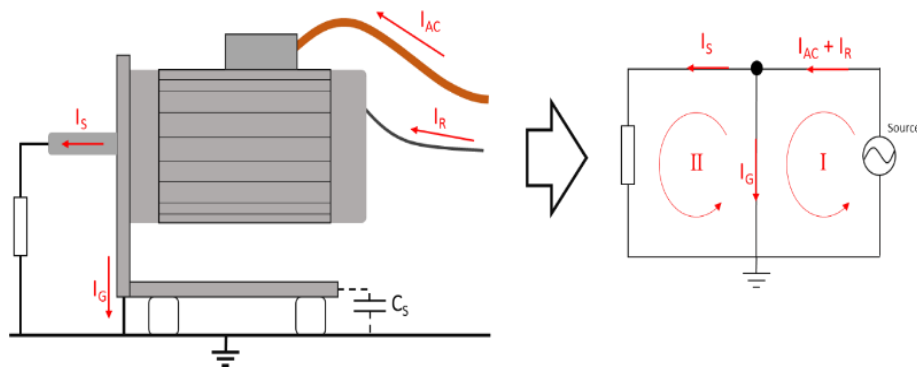


Abbildung 1 Vereinfachtes HF-Stromflussmodell eines Elektromotors

Gemäß Aufbauanleitung nach CISPR 25 ist die Maschine direkt und niederohmig mit der Bezugsmasseplatte zu verbinden. Im Versuchsaufbau ist die Welle der Maschine mit einer Lastmaschine (Gleichstrommaschine im Generatorbetrieb) verbunden. Gemäß Abbildung 1 für den Betrieb werden zwei Stromkreise definiert. Für die Entwicklung der Messmethode wird die elektrische Maschine zunächst als ein Knotenpunkt betrachtet, wofür nach Kirchhof gelten muss, dass die Summe aller Ströme in den Knoten bei jeder Frequenz Null ist. Die folgenden Störströme lassen sich unterscheiden: Wellenstrom I_S , Massestrom I_G , Gleichtaktstrom über die Versorgungsleitung I_{AC} und Gleichtaktstrom über die Resolverleitung (oder LV-Leitung zu anderen sensorischen Elementen in der Maschine) I_R . Zur Vereinfachung werden die Ströme I_{AC} und I_R in eine Gruppe zusammengefasst.

Die Ermittlung des Wellenstroms I_S erfolgt mittels einer Differenzbildung zwischen $I_{AC} + I_R$ und I_G . Dabei ist es notwendig den Phasenwinkel der Ströme einzubeziehen.

Messverfahren

Für die Differenzbildung ist die Verwendung von Stromzangen erforderlich, die möglichst identische Übertragungseigenschaften haben. Es werden daher mittels additiver Fertigungstechnik (3D-Druck) Stromzangen entwickelt, bei denen die Lage und Gestalt der Wicklung und des Kerns durch das Design fest vorgegeben ist (Abbildung 2).



Abbildung 2 Entwickelter HF-Stromwandler

Die Abbildung 3 und 4 zeigen die Abweichung des Wandlungsmaß und der Phase der beiden entwickelnden Stromwandler. Es kann festgestellt werden, dass die konstruierten Stromwandler eine vernachlässigbare Abweichung aufweisen und deswegen hinreichend genaue identische Messergebnisse liefern. Bei der Messung wird zudem darauf geachtet, dass auch die verwendeten Kabel möglichst identische Eigenschaften haben.

Die Differenzbildung der Messsignale erfolgt über eine passive Schaltung mit Übertragern, die eine Rückkopplung verhindert und eine Impedanz-Anpassung auf 50Ω gewährleistet.

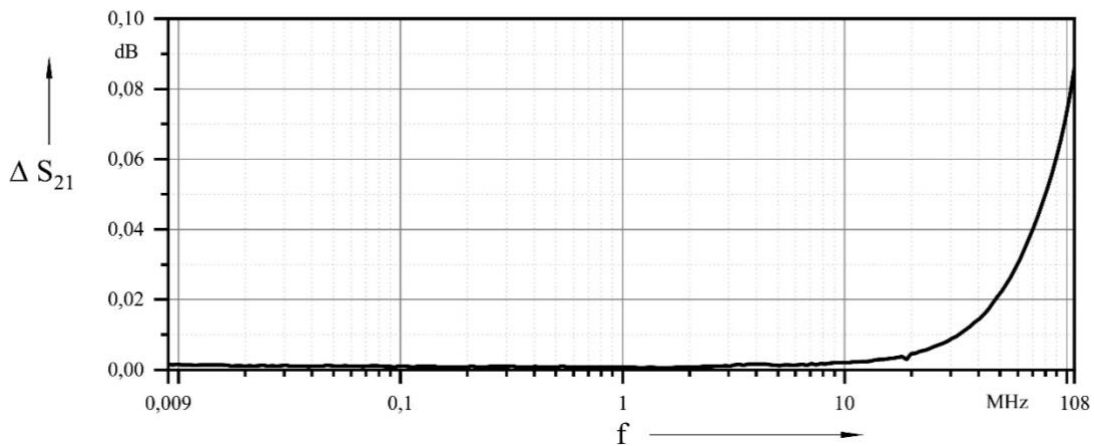


Abbildung 3 Abweichung des Wandlungsmaßes zwischen zwei entwickelten HF-Stromwandler

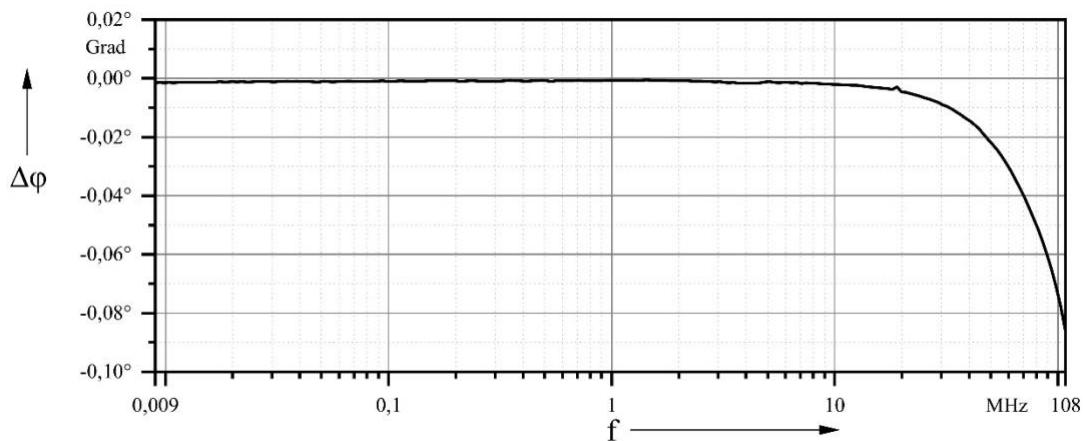


Abbildung 4 Abweichung der Phase zwischen zwei entwickelten HF-Stromwandler

Verifikation

Eine erfolgreiche Verifikation der entworfenen Messmethode lässt sich durch einen direkten Vergleich mit einer Strommessung per Stromzange auf der rotierenden Welle bestätigen wie Abbildung 5 zeigt. Die Messungen werden in einem CISPR 25 Aufbau in einer Absorber Lined Shielded Enclosure (ALSE) durchgeführt.

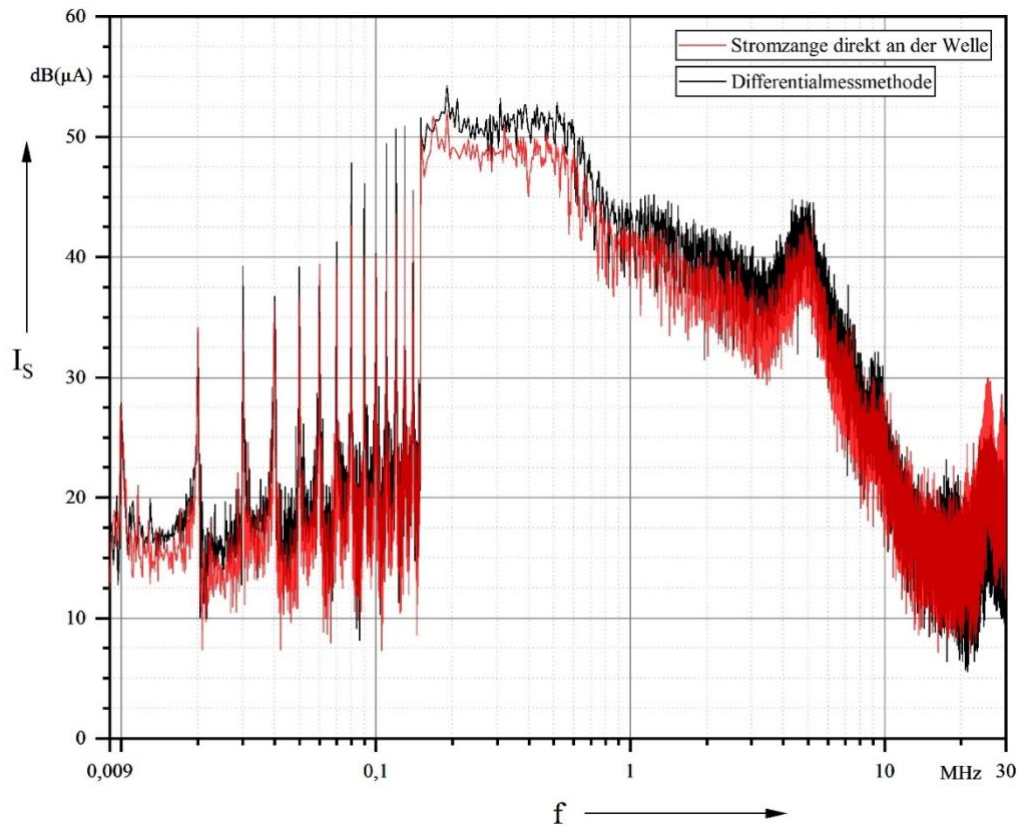


Abbildung 5 Verifikationsmessung der entwickelten Methode

Fazit

In diesem Beitrag wird eine Methode zur Messung von Störaussendungen auf der rotierenden Welle eines elektrischen Antriebs vorgestellt. Im Gegensatz zu anderen Methoden ist hierbei keine Montage von Messwertaufnehmern im Bereich der Welle notwendig, so dass Arbeitsschutz-Risiken praktisch nicht existieren und Aufwand wird reduziert.

Literaturangaben

- [1] CISPR 25:2016+COR1:2017 Annex I, "Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers" IEC 2017. ISBN 978-2-8322-3726-7
- [2] S. Chen, T. A. Lipo, and D. Fitzgerald, "Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 11, no. 1, pp. 25–32, 1996. DOI: 10.1109/60.486572
- [3] P. Mäki-Ontto, J. Luomi, "Induction Motor Model for the Analysis of Capacitive and Induced Shaft Voltages", IEEE 2005. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195941
- [4] M. Cacciato, A. Consoli, L. Finocchiaro, A. Testa, "High Frequency Modeling of Bearing Currents and Shaft Voltage on Electrical Motors", IEEE 2005. DOI: 10.1109/ICEMS.2005.202926

- [5] S. Jeschke, S. Tsiapenko, H. Hirsch, "Investigations on the shaft currents of an electric vehicle traction system in dynamic operation", IEEE 2015. DOI: 10.1109/ISEMC.2015.7256248
- [6] Tsiapenko S., Weber J., Hirsch H. (2019) "EMV bei elektrischen Maschinen im Antriebsstrang". In: Proff H. (eds) Mobilität in Zeiten der Veränderung. Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-26107-8_22