

Modellierung der Motor-Impedanz einer elektrisch erregten Synchronmaschine anhand von Messungen im aktiven und passiven Betrieb

M.Sc. Michaela Gruber, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Deutschland

Dr.-Ing. Michael Beltle, Universität Stuttgart, IEH, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, IEH, Deutschland

1 Einleitung

Der elektrische Antriebsstrang in Elektrofahrzeugen besteht aus drei Hauptkomponenten: Hochvolt-Batterie, Leistungselektronik (LE) und Elektromotor (inkl. Getriebe und Antriebswelle). Dabei verursacht die Leistungselektronik durch ihr Schaltverhalten elektromagnetische Emissionen, welche sich leitungsgebunden innerhalb des Hochvolt-Systems ausbreiten oder feldgebunden in benachbarte Systeme koppeln und somit die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) beeinträchtigen können. Die Höhe der Emissionen wird dabei wesentlich durch die Impedanz des Ausbreitungspfad, auch Koppelpfad genannt, mitbestimmt.

Im EMV-Komponententest nach CISPR 25 [1] werden Batterie und Zuleitungen durch eine Bordnetz nachbildung (BNN) ersetzt. Dadurch ist die Impedanz am Wechselrichtereingang fest definiert. Die Impedanz am Wechselrichterausgang ist vom Motor bzw. der verwendeten Ersatzlast abhängig. D.h. die angeschlossene Last hat einen entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis und kann je nach Anwendung von der Realität abweichen.

Um möglichst realistische Messergebnisse zu erzielen, bieten einige EMV-Labore elektrische oder hydraulische Lastsysteme an. Dabei kann der Motor des Antriebsstrangs an der Antriebswelle durch ein Gegenmoment belastet werden. Mit dem unter Last angeschlossenen Motor kann der Wechselrichter in verschiedenen realen Betriebszuständen geprüft werden.

Alternativ kann eine elektrische Maschinenemulation (s. Abb. 1) als Ersatzlast verwendet werden [2]. Diese bildet das niederfrequente Verhalten der Maschine ab, sodass die Nutzströme wie bei einer real belasteten Maschine fließen. Entscheidend für die EMV-Messung ist jedoch auch die Nachbildung der hochfrequenten (HF) Koppelpfade, also der HF-Impedanz der Maschine mithilfe des Koppel-Netzwerks. Die Modellparameter können hierbei entweder messtechnisch oder simulativ mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) bestimmt werden.

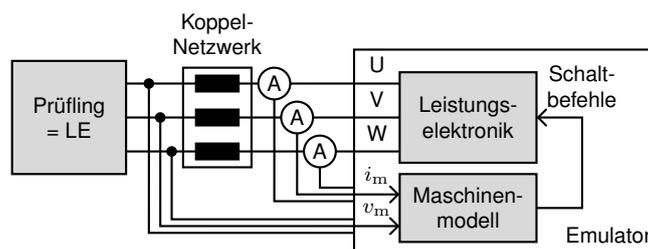


Abbildung 1: Allgemeines Blockdiagramm der elektrischen Maschinenemulation

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieses Papers ist die Modellierung der HF-Impedanz einer elektrisch erregten Synchronmaschine (EESM) anhand von Impedanzmessungen im aktiven und passiven Betrieb. Bisher wurde das HF-Verhalten von Asynchronmaschinen [3] und permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) [4], [5] in Veröffentlichungen analysiert und modelliert. Speziell zu elektrisch erregten Synchronmaschinen fehlen Modellierungsansätze. Daher soll zunächst ein qualitatives Modell er-

stellt werden, das den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Motorimpedanz im aktiven und passiven Betrieb beschreibt. Das Paper geht insbesondere auf den Einfluss der Erregerwicklung ein und zeigt auf, inwiefern bestehende Modelle auf die EESM anwendbar sind.

Impedanzmessungen im passiven und aktiven Betrieb (s. Abschnitt 3) liefern Aussagen zu den Einflussfaktoren auf die Motorimpedanz und werden für den Gleichtakt- (CM) und Gegentaktfall (DM) durchgeführt. Die Messungen erfolgen an einer Traktionsmaschine (250 kW, 3-polig, isolierter Sternpunkt) und dienen als Grundlage für die anschließende Modellierung in Abschnitt 4.

3 Messung der Motorimpedanz im aktiven und passiven Betrieb

Die Motorimpedanz wird an den Statorklemmen für den Gleich- und Gegentaktfall gemessen. Die Messungen im passiven Betrieb, im Stillstand ohne angeschlossene Leistungselektronik, werden konventionell mit einem Impedanzanalysator (Keysight E4990A, 1 kHz - 100 MHz) durchgeführt. Im Gleichtaktfall wird zwischen den (kurzgeschlossenen) Statorklemmen und dem Motorgehäuse gemessen, im Gegentaktfall zwischen einer Phase und den übrigen beiden Phasen.

3.1 Messmethode für den aktiven Betrieb

Die Impedanzmessungen bei drehender Maschine erfolgen mit galvanischer Trennung. Die Messmethode beruht auf einer Transmissionsmessung mithilfe eines vektoriiellen Netzwerkanalysators (VNA) und zweier Stromzangen (current injection method, CIM). Unter Berücksichtigung des bekannten Übertragungsverhaltens der beiden Stromzangen $\underline{S}_{21,cp}(f)$ kann der gemessene Transmissionsfaktor $\underline{S}_{21,ges}(f)$ in die Systemimpedanz \underline{Z}_{System} umgerechnet werden. Die Methode ist ausführlich in [6] erläutert.

$$\underline{Z}_{System}(f) = 2Z_0 \left(\frac{\underline{S}_{21,cp}(f)}{\underline{S}_{21,ges}(f)} - 1 \right) \quad (1)$$

Die Messungen erfolgen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 100 MHz, bei einer Messbandbreite von 10 Hz und einer Einspeiseleistung von 10 dBm für einen möglichst großen Signalrauschabstand (SNR). Es werden ein VNA (R&S ZNB8), zwei Stromzangen (FCC F65 und F65A), zwei Pulse Limiter (VLM-33W-2W-S+) sowie zwei 1-m-lange Koaxialkabel verwendet.

Die Messungen im aktiven Betrieb finden im Generatorbetrieb ohne Wechselrichter statt. Hierfür wird die Antriebseinheit, bestehend aus Motor, Getriebe und Antriebswelle, mit einer externen Lastmaschine verbunden. Die Antriebswelle ist hierbei galvanisch von der Lastmaschine getrennt. Anstelle des Wechselrichters wird eine definierte Ersatzlast aus Leistungswiderständen ($3 \times 4,7 \Omega$, 2,5 kW) in Sternpunktschaltung an den Statorklemmen angeschlossen. Die Erregerwicklung wird über ein externes DC-Netzteil bestromt.

Bei den Messungen im Gleichtaktfall wird der Sternpunkt der Last mit dem Bezugspotenzial des Motorgehäuses verbunden, um den CM-Stromkreis zu schließen. Im Gegentaktfall wird der Sternpunkt isoliert, sodass der CM-Stromkreis unterbrochen ist. Abb. 2 und 3 zeigen den prinzipiellen Messaufbau.

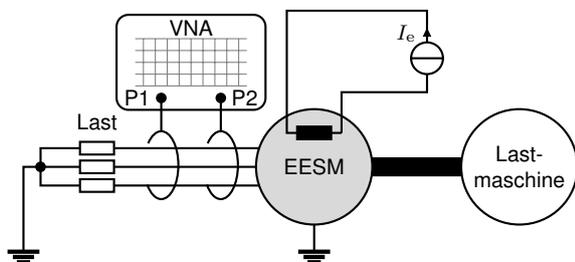


Abbildung 2: Messaufbau für die CM-Impedanz

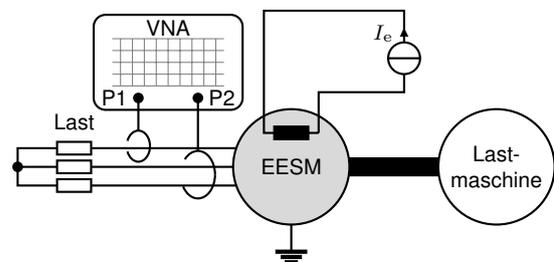


Abbildung 3: Messaufbau für die DM-Impedanz

Vorteil dieses Messaufbaus ist die vom Betriebspunkt näherungsweise unabhängige Impedanz der Ersatzlast. Die gemessene Systemimpedanz bildet hierbei eine Reihenschaltung der Motorimpe-

danz $\underline{Z}_{\text{Motor}}$ und der Impedanz der Ersatzlast $\underline{Z}_{\text{Last}}$. Wird die Ersatzlast für den CM- und DM-Fall vorab separat vermessen, kann die Motorimpedanz als letzte Unbekannte aus der gemessenen Systemimpedanz bestimmt werden.

$$\underline{Z}_{\text{Motor}}(f) = \underline{Z}_{\text{System}}(f) - \underline{Z}_{\text{Last}}(f) \quad (2)$$

3.2 Einfluss der Erregerwicklung

Besonders interessant ist im Vergleich zu einer PMSM der Einfluss der Erregerwicklung. Bei der EESM wird das Rotormagnetfeld nicht durch Permanentmagneten sondern durch eine Erregerwicklung im Rotor erzeugt. Diese wird mit einem DC-Strom angeregt. Durch Variation der Stromstärke kann die Magnetfeldstärke eingestellt werden und es ergeben sich Vorteile beim Betrieb im Feldschwächebereich [7].

Im Gleich- und Gegentaktfall soll der Einfluss der Erregerwicklung sowie unterschiedlicher Leistungen auf die Motorimpedanz untersucht werden. Der Abschluss der Erregerwicklung wird daher variiert: Kurzschluss, Leerlauf und Anregung mit verschiedenen DC-Strömen mithilfe eines Netzteils. Zusätzlich wird die Rotorimpedanz ebenfalls im Gleich- und Gegentaktfall gemessen.

3.3 Messergebnisse im passiven Betrieb

Der Einfluss der Erregerwicklung auf die Motorimpedanz wird zunächst im passiven Betrieb (Stillstand, offene Motorklemmen) untersucht. Es werden die beiden Randbedingungen Erregerwicklung hochohmig abgeschlossen (open) und niederohmig abgeschlossen (short) betrachtet. Zur Vergleichbarkeit mit den aktiven Messungen wird ebenfalls der Abschluss mit dem externen Netzteil bei unterschiedlichen Erregerströmen I_e betrachtet. Abb. 4 zeigt die Messergebnisse für den CM- und DM-Fall.

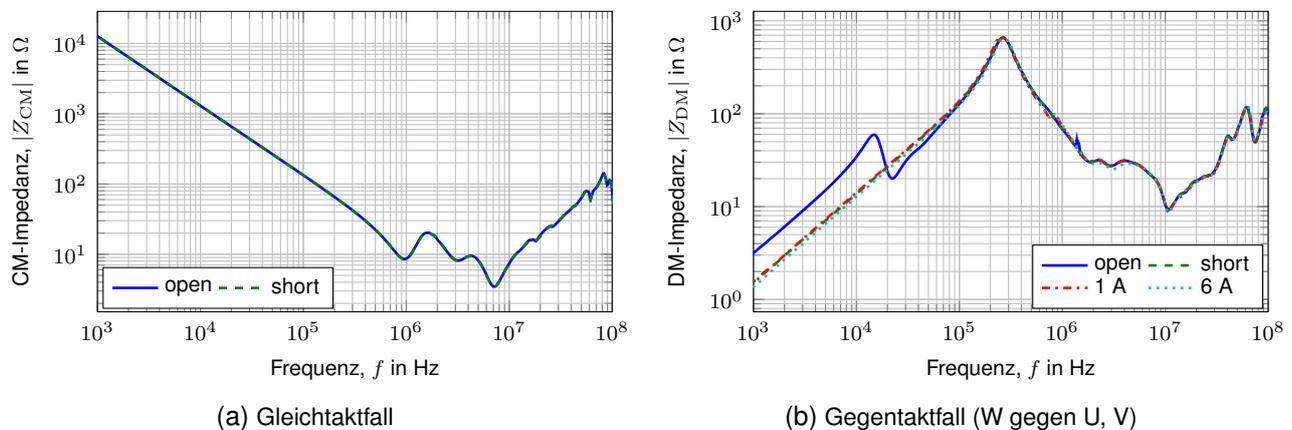


Abbildung 4: Einfluss der Erregerwicklung auf die Motorimpedanz im passiven Zustand

Der Abschluss der Erregerwicklung zeigt keinen Einfluss auf die Gleichtaktimpedanz des Motors. Diese zeigt bis ca. 6 MHz einen kapazitiven Verlauf. Die Gegentaktimpedanz wird im unteren Frequenzbereich bis ca. 50 kHz durch den Abschluss der Erregerwicklung beeinflusst. Der Verlauf ist jeweils induktiv, bei hochohmigem Abschluss (open) jedoch mit deutlich höherer Induktivität und zeigt bei 10 kHz bis 30 kHz eine Doppelresonanz. Bei angeschlossenem Netzteil zeigt sich ebenfalls der Verlauf bei niederohmigem Abschluss. Der Einfluss des Erregerstroms ist im passiven Betrieb bis 6 A marginal und führt zu einer minimal niedrigeren Induktivität im Bereich bis zur ersten Hauptresonanz bei ca. 250 kHz.

Abb. 5 zeigt die Gegentaktimpedanz jeder Phase bei kurzgeschlossener Erregerwicklung. Im unteren Frequenzbereich bis zur ersten Hauptfrequenz bei ca. 200 kHz bis 300 kHz zeigt sich eine

deutliche Abweichung zwischen den Phasen. Die verschiedenen Induktivitätswerte ergeben sich durch den Aufbau der Maschine und sind abhängig von der Rotorposition.

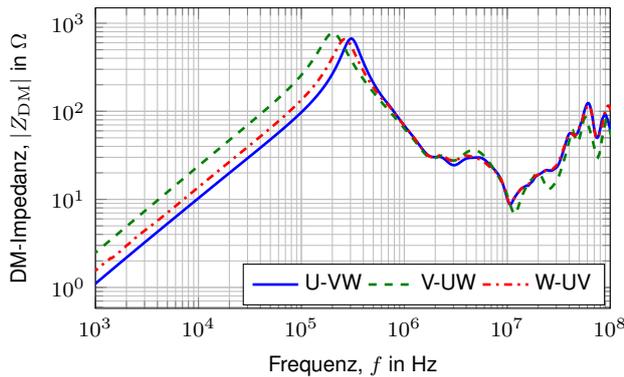


Abbildung 5: DM-Impedanz bei kurzgeschlossener Erregerwicklung (passiv)

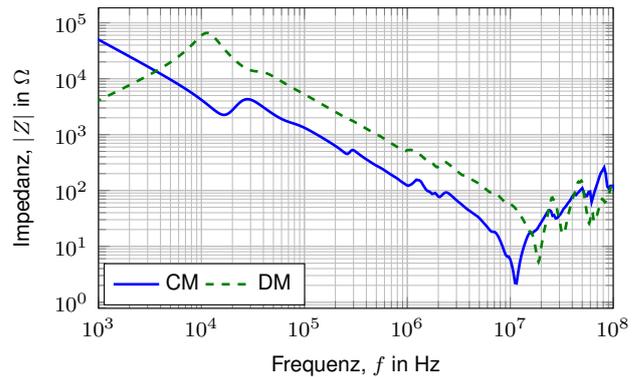
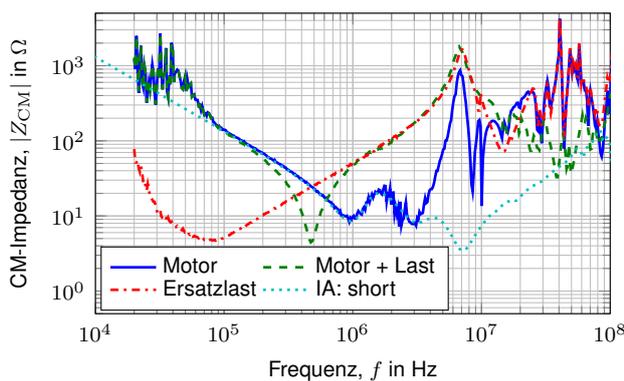


Abbildung 6: Impedanz der Erregerwicklung im passiven Zustand

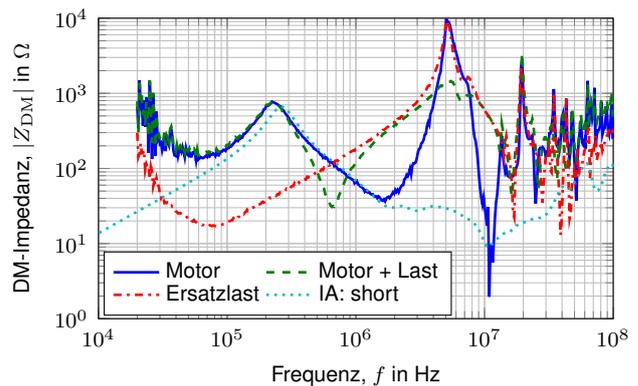
Die Impedanz der Erregerwicklung ist für den Gleichtakt- und Gegentaktfall (bei offenen Motorklemmen) in Abb. 6 dargestellt. Im Gleichtaktfall wird zwischen den kurzgeschlossenen Rotorklemmen und dem Motorgehäuse gemessen, beim Gegentaktfall zwischen den beiden Anschlüssen der Erregerwicklung. Auch hier zeigt sich der im unteren Frequenzbereich typische kapazitive bzw. induktive Verlauf. Auffällig ist der Frequenzbereich zwischen 10 kHz und 10 MHz. Bei beiden Anregungsfällen treten näherungsweise die gleichen Resonanzfrequenzen auf. Diese werden durch die parasitären kapazitiven Kopplungen zwischen den Maschinenbauteilen hervorgerufen (s. Abb. 10a).

3.4 Messergebnisse im aktiven Betrieb

Im aktiven Betrieb muss anstelle des Wechselrichters eine Ersatzlast verwendet werden, um die Motorphasen nicht kurzzuschließen. Abb. 7 zeigt den Einfluss der Ersatzlast auf die Berechnung der Motorimpedanz. Mithilfe der Stromzangenmethode wird die Motorimpedanz im Stillstand (Motor) ermittelt sowie separat die Ersatzlast gemessen. Als Referenz dient die Messung mit Impedanzanalyzer im passiven Zustand bei kurzgeschlossener Erregerwicklung (IA: short).



(a) Gleichtaktfall (aktiv: 2 A, 0 rpm)



(b) Gegentaktfall (W-UV, aktiv: short, 0 rpm)

Abbildung 7: Einfluss der Ersatzlast auf die Berechnung der Motorimpedanz

Die Systemimpedanz (Motor + Last) zeigt einen deutlichen Einfluss der Ersatzlast. Die Ersatzlast selbst sowie die 1-m-langen Zuleitungen und deren Position beeinflussen das Messergebnis. Eine Korrektur der gemessenen Systemimpedanz zur Bestimmung der Motorimpedanz gelingt daher nur teilweise. Für zukünftige Messungen sollen daher deutlich niederimpedantere Zulei-

tungen mit einer mechanisch unveränderlichen Anordnung verwendet werden, um den Einfluss von Streugrößen zu minimieren. Das Messergebnis wird im unteren Frequenzbereich durch das schlechte Übertragungsverhalten der Stromzangen beeinträchtigt (hohes Rauschen) und im oberen Frequenzbereich durch den Einfluss der Ersatzlast verfälscht. Dadurch ist für den Gleichtaktfall der Frequenzbereich von ca. 100 kHz bis 3 MHz, für den Gegentaktfall bis ca. 2 MHz quantitativ aussagekräftig. Für einen qualitativen Vergleich der Motorimpedanz bei verschiedenen Betriebszuständen genügen jedoch die unbereinigten Messdaten.

Abb. 8 zeigt den Einfluss des Erregerstroms auf die Motorimpedanz bei einer Drehzahl von 50 rpm an der Antriebswelle. Ein eingestellter Erregerstrom von 1, 9 bzw. 14 A führt bei 50 rpm zu einer generierten Motorleistung von ca. 2, 50 und 80 W. Die CM-Impedanz zeigt keine Veränderung. Abweichungen oberhalb von 20 MHz sind auf eine minimal andere Verlegung der Zuleitungen zur Ersatzlast zurückzuführen. Im Gegentaktfall zeigt sich bereits bei kleinen Leistungen eine geringe Erhöhung der Systemimpedanz im Bereich von 100 kHz bis 300 kHz. Weitere Untersuchungen werden zeigen, ob es sich hierbei um einen Temperatur- oder Leistungseinfluss handelt.

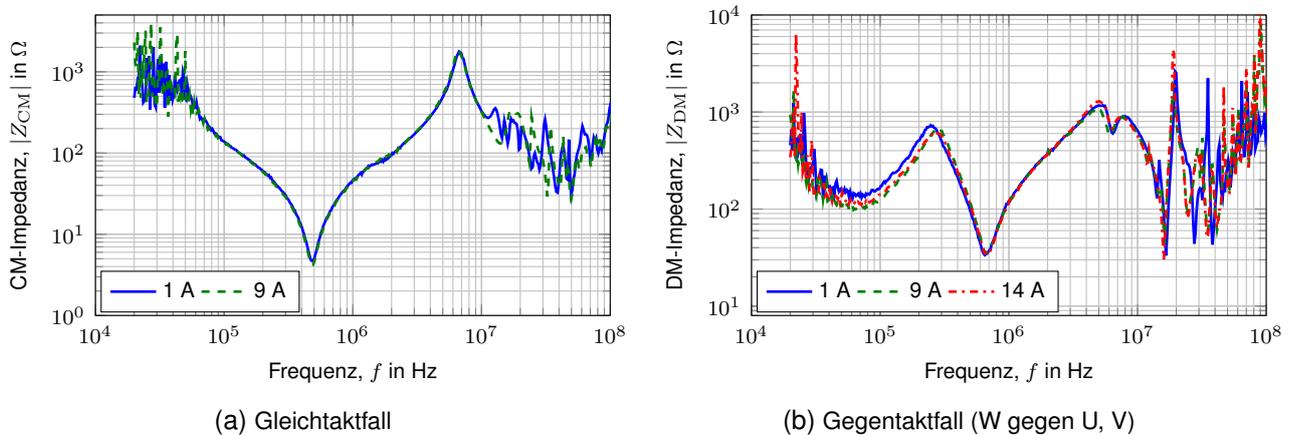


Abbildung 8: Einfluss des Erregerstroms auf die Motorimpedanz im aktiven Zustand bei 50 rpm

Der Einfluss der Drehzahl wird bei geringer Leistung untersucht. Als Grenzfälle werden 0 bzw. 50 rpm und 1000 rpm an der Antriebswelle in Abb. 9 dargestellt. Die Drehzahl hat mutmaßlich aufgrund des eingebauten Wellenerders keinen Einfluss auf die CM-Impedanz des Motors. Dies soll im Rahmen von Wellen- und Lagerstrommessungen nachgewiesen werden.

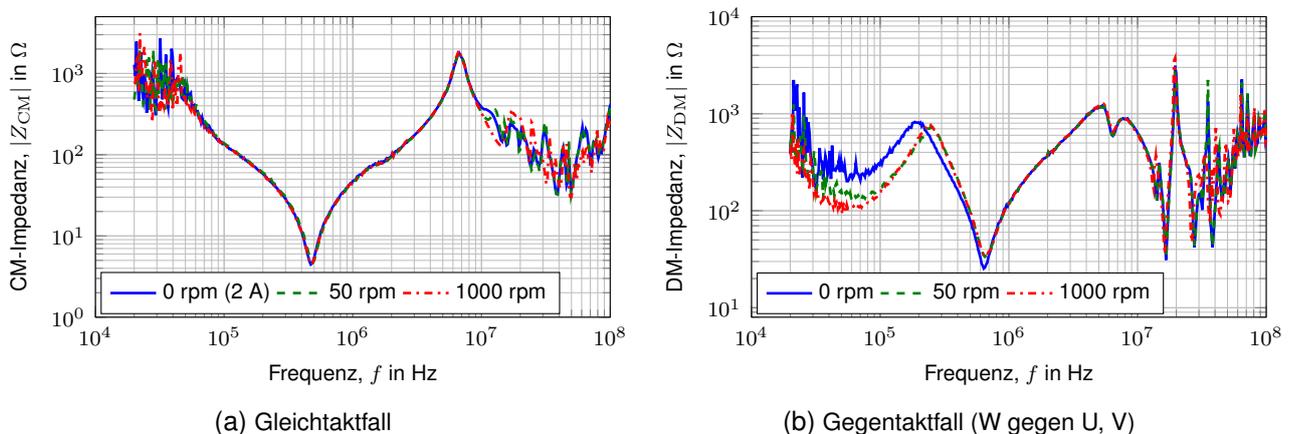


Abbildung 9: Einfluss der Drehzahl auf die Motorimpedanz im aktiven Zustand bei 1 A

Bei der DM-Impedanz zeigt sich im Frequenzbereich bis zur ersten Hauptresonanz bei ca. 200 kHz ein deutlicher Unterschied zwischen drehender Maschine und Stillstand. Die Abweichung liegt jedoch innerhalb der rotorpositionsabhängigen Impedanzkurven. Aufgrund der Messdauer des VNA

bei einer Frequenz findet im drehenden Betriebszustand eine Mittelung der maximalen und minimalen Induktivität statt, sodass die DM-Impedanz aller drei Phasen übereinstimmt. Eine Impedanzmessung mit einem Zeitbereichsmessverfahren könnte dies anschaulich nachweisen.

4 Modellierung der Motorimpedanz

Im ersten Schritt wird untersucht, inwiefern existierende Modelle für PMSMs als Verhaltensmodell für EESMs angewendet werden können. Danach werden die zusätzlichen parasitären kapazitiven Koppelpfade bei der EESM beschrieben sowie ein einfaches Impedanzmodell der Erregerwicklung vorgestellt und die Parameter aus den Messergebnissen berechnet. Abschließend wird mithilfe einer Schaltungssimulation gezeigt, inwiefern das vorgeschlagene Phasenmodell die gemessene Motorimpedanz nachbildet.

4.1 Bestehende Motormodelle

In der Literatur wurden zahlreiche Schaltungsmodelle für Asynchronmaschinen und PMSMs vorgestellt. [8] gibt eine ausführliche Übersicht über verschiedene Modelle von PMSMs. Bei der Charakterisierung anhand von Impedanzmessungen wird zwischen Gleichtakt- und Gegentaktimpedanz unterschieden. Die in der Literatur gezeigten Kurvenverläufe sind häufig ähnlich zu den gemessenen CM- und DM-Verläufen der betrachteten EESM [3]–[5]. Um den exakten Verlauf einer Maschine nachzubilden, sind sehr komplexe Modelle notwendig. Je nach Anwendungsfall werden daher einfache oder vereinfachte Modelle verwendet, was zu einer Vielzahl verschiedener Ersatzschaltungen führt. Häufig werden diese für eine Anregungsart gefittet, Abweichungen in der anderen Anregungsart werden in Kauf genommen [8].

4.2 Kapazitive Koppelpfade bei der EESM

Im Vergleich zur PMSM treten bei der EESM aufgrund der Erregerwicklung zusätzliche kapazitive Kopplungen zwischen den Maschinenteilen auf. Diese sind als parasitäre Kapazitäten in Abb. 10a dargestellt. Die zusätzlichen Kapazitäten sind in grün hervorgehoben.

Bei PMSMs tritt die größte kapazitive Kopplung zwischen Statorwicklung und Gehäuse $C_{sw,g}$ auf [9]. Die Kopplung zwischen Statorwicklung und Rotor $C_{sw,r}$ sowie zwischen Rotor und Gehäuse $C_{r,g}$ hat einen kleineren Einfluss. Bei der EESM gibt es außerdem eine mutmaßlich stärkere Kopplung zwischen Rotorwicklung und Rotor $C_{rw,r}$, neben den Kopplungen zwischen Rotorwicklung und Gehäuse $C_{rw,g}$ sowie zwischen Rotor- und Statorwicklung $C_{sw,rw}$.

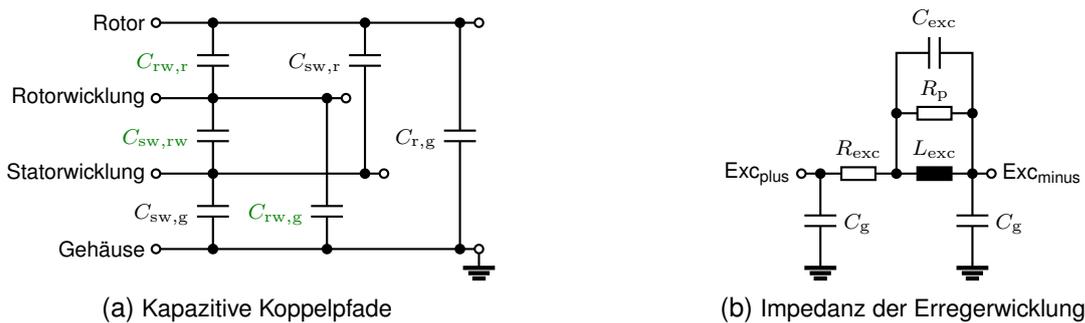


Abbildung 10: Modellbildung bei der elektrisch erregten Synchronmaschine

4.3 Modell der Erregerwicklung

Das Rotormagnetfeld wird durch eine mit Gleichstrom bestromte Wicklung, der Erregerwicklung (Exc) erzeugt. Diese kann näherungsweise als reale Spule modelliert werden. Abb. 10b zeigt das Impedanzmodell mit der Hauptinduktivität L_{exc} , dem Reihenwiderstand R_{exc} , dem Parallelwiderstand R_p sowie der parallelen Kapazität C_{exc} zwischen den Windungen der Erregerwicklung. Die

Werte können aus der DM-Messung (s. Abb. 4) sowie einer DC-Widerstandsmessung bestimmt werden. L_{exc} wird bei einer Frequenz von 100 Hz berechnet, C_{exc} bei 200 kHz.

Durch den Einbau in der Maschine entsteht zusätzlich ein kapazitiver Koppelpfad zum Gehäuse, im Modell als C_g berücksichtigt. Die kapazitive Kopplung wird vereinfacht als symmetrisch verteilte, an den Rotorklemmen (Exc_{plus} und Exc_{minus}) konzentrierte Kapazität angenommen. C_g kann mithilfe der CM-Impedanzmessung (s. Abb. 4) bestimmt werden und entspricht der Hälfte der bei 100 Hz berechneten Kapazität. Tabelle 1 zeigt die ermittelten Werte für das Impedanzmodell der Erregerwicklung.

L_{exc}	R_{exc}	R_p	C_{exc}	C_g
650 mH	4,5 Ω	65 k Ω	320 pF	1,6 nF

Tabelle 1: Werte der Impedanz der Erregerwicklung

Die beiden C_g entsprechen nicht der Kopplung $C_{rw,g}$ zwischen Rotorwicklung und Gehäuse; die übrigen kapazitiven Kopplungen spielen ebenfalls eine Rolle. Zur Bestimmung der kapazitiven Kopplungen der EESM sollen Stator und Rotor im ausgebauten Zustand vermessen werden.

4.4 Einfaches Modell der Motorimpedanz

Abb. 11a zeigt das verwendete Modell für eine Phase der in Stern verschalteten Maschine, basierend auf den Modellen für eine PMSM aus [4], [5]. Die Parameterwerte können aus dem CM- und DM-Kurvenverläufen bestimmt werden. Für eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Impedanzverläufen müssen diese anschließend manuell angepasst werden. Tabelle 2 zeigt die ermittelten Werte für die Messungen im passiven Zustand bei kurzgeschlossener Erregerwicklung.

L_C	$L_{S,U}$	$L_{S,V}$	$L_{S,W}$	L_i	L_T	R_g
0,25 μ H	70 μ H	280 μ H	150 μ H	1,67 μ H	35 μ H	3 Ω
R_E	R_i	R_T	C_{g1}	C_{g2}	C_i	C_T
500 Ω	20 Ω	25 Ω	2,4 nF	1,4 nF	2 nF	0,5 nF

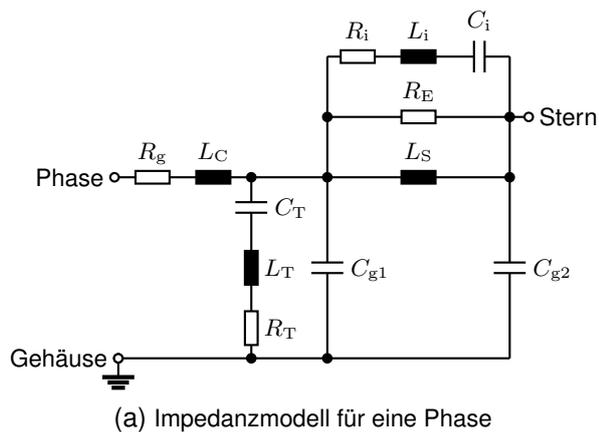
Tabelle 2: Werte der Impedanz der Erregerwicklung

Das Simulationsergebnis der Motorimpedanz ist für den Gleichtakt- und Gegentaktfall (beispielhaft für W-UV) in Abb. 11b dargestellt. Die Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung, v.a. im niederfrequenten Bereich bis ca. 1 MHz. Allerdings entstehen teilweise zusätzliche Resonanzen, z.B. bei ca. 150 kHz, sowie betragsmäßige Abweichungen. Fitting-Methoden und Sensitivitätsanalysen können bei der Verbesserung des Phasenmodells helfen.

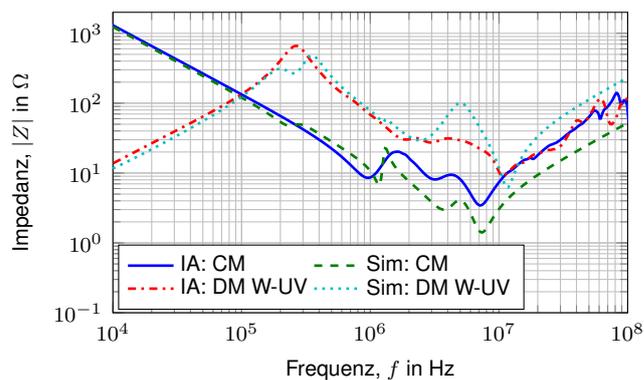
5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand von Impedanzmessungen im aktiven und passiven Betrieb wurde die Gleichtakt- und Gegentaktimpedanz an den Statorwicklungen sowie an der Erregerwicklung einer elektrisch erregten Synchronmaschine gemessen. Die gemessene CM-Impedanz des Motors ist unabhängig von der Rotorposition, dem Erregerstrom sowie der Drehzahl. Bei der DM-Impedanz des Motors zeigen sich Einflüsse hinsichtlich der Rotorposition im passiven Betrieb bis ca. 300 kHz. Aufgrund des Messverfahrens werden diese im aktiven Betrieb (drehende Maschine) nicht erfasst. Des Weiteren zeigt sich beim Gegentaktfall bis ca. 30 kHz im passiven Betrieb der deutliche Einfluss der Erregerwicklung aufgrund der kapazitiven und induktiven Kopplung zum Rotor und der Rotorwicklung. Unterschiedliche Erregerströme bzw. Leistungen beeinflussen ebenfalls die Gegentaktimpedanz. Die Rotordrehzahl zeigt hingegen keine Auswirkung.

Die verwendete Messmethode zeigt deutliche Einschränkungen im Bereich über 3 MHz. Durch eine Optimierung der Ersatzlast können die erwartbaren Messergebnisse verbessert werden. Im



(a) Impedanzmodell für eine Phase



(b) Messung vs. Simulation (passiv, short)

Abbildung 11: Modellierung der Motorimpedanz

Rahmen weiterer Messungen sollen die parasitären Kapazitäten zwischen den Maschinenteilen ermittelt werden. Dazu werden Stator und Rotor im ausgebauten Zustand vermessen, sodass die parasitären Kapazitäten zwischen Rotor und Rotorwicklung bestimmt werden können. Das Phasenmodell der Motorimpedanz kann um weitere Elemente ergänzt werden, um den Kurvenverlauf besser nachbilden zu können. Allerdings sollte das Modell für die Nachbildung mit einer elektrischen Maschinenemulation möglichst einfach gehalten werden. Daher können Sensitivitätsanalysen und Fitting-Methoden helfen, das Phasenmodell und die berechneten Parameterwerte zu optimieren. Des Weiteren soll der Einfluss der Motortemperatur und der Leistung sowie des Wellenerders näher untersucht werden. Für Impedanzmessungen bei höherer Leistung ist eine aktiv gekühlte Ersatzlast notwendig.

Literatur

- [1] CISPR 25, *Vehicles, Boats and Internal Combustion Engines - Radio Disturbance Characteristics - Limits and Methods of Measurement for the Protection of On-Board Receivers*, 2016.
- [2] M. Gruber, M. Fischer, M. Beltle und S. Tenbohlen, „Investigation of the Suitability of an Electrical Machine Emulation for EMC Component Tests of Drive Inverters,“ *PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, S. 1777–1783, 2021.
- [3] M. S. Toulabi, L. Wang, L. Bieber, S. Filizadeh und J. Jatskevich, „A Universal High-Frequency Induction Machine Model and Characterization Method for Arbitrary Stator Winding Connections,“ *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Jg. 34, Nr. 3, S. 1164–1177, 2019. DOI: 10.1109/TEC.2019.2891349.
- [4] G. Vidmar und D. Miljavec, „A Universal High-Frequency Three-Phase Electric-Motor Model Suitable for the Delta- and Star-Winding Connections,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 8, 2015. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2352452.
- [5] Y. Wu et al., „High-frequency modelling of permanent magnet synchronous motor with star connection,“ *IET Electric Power Applications*, Jg. 12, Nr. 4, S. 539–546, 2018. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0593.
- [6] M. Gruber, N. Dölzer, M. Beltle und S. Tenbohlen, „Motor-Impedanzmessungen im aktiven Betriebszustand anhand einer permanentmagneterregten Synchronmaschine,“ *EMV 2022, Köln, 2022*. DOI: 10.15488/12565.
- [7] S. Müller, D. Maier und N. Parspour, „Inductive Electrically Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles—Design, Optimization and Measurement,“ *Energies*, Jg. 16, Nr. 4, 2023. DOI: 10.3390/en16041657.
- [8] Y. Moreno, G. Almandoz, A. Egea, B. Arribas und A. Urdangarin, „Analysis of Permanent Magnet Motors in High Frequency—A Review,“ *Applied Sciences*, Jg. 11, Nr. 14, S. 6334, 2021. DOI: 10.3390/app11146334.
- [9] A. Bubert, J. Zhang und R. W. de Doncker, „Modeling and measurement of capacitive and inductive bearing current in electrical machines,“ *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, S. 1–6, 2017. DOI: 10.1109/COBEP.2017.8257251.