ASM

PSM

PMaSynRM

E-Motortypen für sekundäre Elektroantriebe im Vergleich

Mit dem Erfolg von Elektrofahrzeugen rückt auch die Frage nach geeigneten Elektromaschinen immer stärker ins Blickfeld. Dieser Beitrag von Magna Powertrain vergleicht die Eigenschaften von Asynchronmaschine, permanenterregter Synchronmaschine und permanentmagnetassistierter Synchron-Reluktanzmaschine für die Anwendung als Sekundärtrieb. Entscheidend für die richtige Auswahl ist ein detaillierter Abgleich von Leistungskennzahlen und Fahrzeuganwendung.

AUTOREN

Dipl.-Ing. (FH) Werner Neß

ist Senior Manager, Global Product Management, eMachine and Inverters bei der Magna Powertrain GmbH & Co KG in Traiskirchen (Österreich).

Dr. Klaus Raggl

ist Senior Manager, Advanced Engineering eMachine and Inverter bei der Magna Powertrain GmbH & Co KG in Traiskirchen (Österreich).

Bei aktuellen und zukünftigen Generationen elektrisch betriebener Fahrzeuge gewinnen auch elektrische Sekundärtriebe an Bedeutung. Das liegt nicht nur an der dadurch gewonnenen Allradfähigkeit und den fahrdynamischen Vorteilen, sondern auch an der Notwendigkeit, die Leistung zu skalieren. Elektrische Antriebssysteme bestehen in der einfachsten Form aus der Einheit von E-Maschine, Umrichter (Inverter) mit Software und Getriebe. Als Sekundärtriebe kommen sie zusätzlich zum Hauptantrieb zum Einsatz, jedoch nur temporär. Daher sind die Eigenschaften verschiedener E-Maschinentypen zum Teil anders zu bewerten als bei Primärtrieben.

In diesem Beitrag werden drei E-Motorbauarten untersucht: die Asynchronmaschine (ASM), die Permanentmagnet-Hybrid-Synchronmaschine mit Reluktanzmoment (PSM) und die Permanentmagnetassistierte Synchron-Reluktanzmaschine (PMaSynRM), **BILD 1**. Schließlich wird eine PSM in Verbindung mit einem Abkoppellement (Decoupling Unit, DCU) betrachtet, da dieses die

© Magna

Möglichkeit bietet, Schleppverluste vollständig zu eliminieren. Die fremderregte Synchronmaschine mit Hochfrequenz-übertrager (SSM) stellt eine weitere interessante Maschinenvariante dar, wurde allerdings aufgrund der Kosten und der Komplexität im Gesamtsystem in diesen Vergleich nicht einbezogen.

METHODISCHE GRUNDLAGEN

Sekundärantriebe kommen nur in bestimmten Fahrsituationen zum Einsatz. Dazu gehören typischerweise Schnee oder sportliches Fahren mit erhöhten längs- und querdynamischen Anforderungen. Während also Traktion und Fahrdynamik wichtige Kriterien sind, spielt die Effizienz im Prüfzyklus Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC) praktisch keine Rolle, da der Sekundärtrieb hierbei nicht benötigt wird. Der Vergleich geht von Fahrzeuganwendungen des C- bis E-Segments einschließlich SUVs aus, die einen Sekundärtrieb mit etwa 90 bis 150 kW_p (Peak-Leistung) benötigen.

BILD 1 Elektromagnetische Flussdichte von ASM, PSM und PMaSynRM (© Magna)

Die standardmäßig einbezogenen Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs) sind Kosten, Spitzenleistung, Dauerleistung, Effizienz, Rohstoffbedarf, Schleppverluste, Reaktionszeiten, Bauraum und Masse. Nach den Kosten ist die Spitzenleistung das wichtigste Kriterium. Diese ist nicht nur für fahrdynamische Anforderungen von Bedeutung, sondern auch für die Rekuperationsfähigkeit. Weniger im Fokus steht dagegen die Dauerleistung, da diese vom Primärtrieb zur Verfügung gestellt wird. Für die Spitzenleistung ist gefordert, dass diese stabil über einen Zeitraum bis 30 s verfügbar ist.

Die Effizienz der E-Maschinen wird hier nur peripher betrachtet, da der Sekundärtrieb in der Regel bei weniger als 10 % der Fahrzeit zum Einsatz kommt. Wichtiger für die Gesamteffizienz ist, welches Konzept beim passiven Mitlaufen die geringsten Schleppverluste verursacht. Entsprechend üblicher Anforderungen der Automobilhersteller wird eine typische mittlere Achsdrehzahl von rund 600/min angenommen. Ein weiteres Kriterium, die Reaktionszeit für den Drehmomentaufbau, wurde in [1] beschrieben. Mehr noch als geringe Masse ist der Bauraumbedarf von Bedeutung. Es besteht das Interesse, diesen so gering wie möglich zu halten, um mehr Innen- und Stauraum zu gewinnen. Weitere wichtige Kriterien sind schließlich die Kosten und die Verfügbarkeit von Rohstoffen. Beispielsweise können die Preisschwankungen bei Neodym, Dysprosium oder Terbium erfahrungsgemäß über 300 % betragen. Als Alternative kommen Ferrit-Magnete in Betracht, die allerdings schwächer sind. Auch bei Kupfer gibt es Kostenschwankungen, die in der Risikobetrachtung einzubeziehen sind. Schließlich ist die Erfüllung von Umwelt- und Sozialanforderungen bei der Gewinnung der Rohstoffe ein wesentlicher Faktor, um die Nachhaltigkeit der Antriebe zu gewährleisten.

GRUNDLEGENDE E-MASCHINENEIGENSCHAFTEN

Hinsichtlich ihrer Eigenschaften wie Wirkungsgrad, Leistung und Schleppverluste unterscheiden sich die drei Maschinentypen deutlich [2, 3]. Die ASM bewährt sich seit Langem als robuste Motorvariante, die keine Permanentmagnete benötigt. Die Maschine ist aber größer, schwerer und hat einen deutlich höheren Kupferbedarf. Bei der Dauerleistung verhält sich die ASM vergleichsweise ungünstig, denn sie beträgt weniger als 25 % der Spitzenleistung. Allerdings ist dieses Kriterium wie erwähnt für einen Sekundärtrieb kaum relevant. Bei der Spitzenleistung bis zu einer Dauer von 30 s schneidet die ASM dagegen gut ab, BILD 2. Wegen der Rotorverluste hat die ASM verglichen mit der PSM allerdings einen schlechteren Wirkungsgrad. Jedoch bietet sie den Vorteil, dass im inaktiven Zustand nur sehr geringe Schleppverluste auftreten. Bei Bauraumbedarf und Masse ist die ASM aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Leistungsdichte im Nachteil.

Die PSM hat sich heute bei den meisten Anwendungen durchgesetzt, die eine hohe Leistungsdichte und somit geringe Masse und kleines Package erfordern. Sie kommt auch mit einer günstigeren Kühlung aus, da der Rotor weniger Wärme einträgt. Unter den drei E-Maschinentypen weist die PSM die höchste Effizienz auf. Im passiven Zustand entstehen allerdings hohe Schleppverluste. Während Kupfer bei der PSM ein vergleichsweise kleiner Kostenfaktor ist, bergen die volatilen Preise für Seltene Erden ein höheres wirtschaftliches Risiko.

Die Variante der PSM mit einer mechanischen DCU wurde in [1] funktional näher beschrieben. Die Maschine selbst unterscheidet sich nicht, es entstehen aber dank der Abkopplung keinerlei Schleppverluste. Voraussetzung dafür

BILD 2 Leistungsvergleich von ASM, PSM und PMaSynRM, normiert auf den Eckpunkt (© Magna)

ist eine schnell reagierende Regelung, damit die Leistung im Bedarfsfall in weniger als 200 bis 250 ms zur Verfügung steht. Um kürzere Reaktionszeiten zu erreichen, wird die Maschine ab circa 130 km/h zum rascheren Einkuppeln auf synchroner Drehzahl im Bereitschaftsmodus gehalten. In die Zykluseffizienzbetrachtung gehen die damit einhergehenden Verluste mit ein. Das System ist packageneutral, da sich bei der Magna-Antriebslösung das Abkoppellement seitlich der E-Maschine verbirgt.

Eine weitere E-Motorvariante ist die PMaSynRM. Diese ist im Prinzip eine PSM mit großem Unterschied zwischen Quer- und Längsreluktanz im Rotor. Zunächst wurde eine kostengünstige Ausführung mit Ferrit-Magneten betrachtet. Es zeigte sich, dass sich damit die geforderte Leistung, insbesondere bei hohen Drehzahlen, nicht darstellen ließ. Als ein guter

Kompromiss erwies sich jedoch ein Mischaufbau, bei dem nur anteilig Seltene-Erden-Magnete zum Einsatz kommen. Diese Konstruktion zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass die Kosten für Kupfer geringer als bei der ASM und für die Magnete niedriger als bei der PSM sind. Die Schleppverluste der PMaSynRM in dieser Ausführung liegen in derselben Größenordnung wie jene der ASM.

Die Maschine wurde so ausgelegt, dass die maximale Polradspannung stets kleiner als die Zwischenkreisspannung ist. Daraus ergibt sich ein weiterer Vorteil hinsichtlich der funktionalen Sicherheit und der Kosten für den Inverter: Während die PSM kurzschlussfest (Aktiver Kurzschluss, AKS) ausgelegt werden muss, kommen sowohl ASM als auch PMaSynRM in der vorliegenden Auslegung mit einer sogenannten offenen Schaltung (all switches open) aus.

VERGLEICH UND BEWERTUNG

Die Ergebnisse des nachfolgenden Vergleichs gelten für eine Fahrzeuganwendung, in der eine Sekundärachse mit 100 kW Spitzenleistung eingesetzt wird. Die Dauerleistung (P_{cont}) spielt beim Sekundärantrieb wie beschrieben eine untergeordnete Rolle. Eine Ausnahme ist der Leistungsbedarf bei sehr hohen Geschwindigkeiten, wenn die volle Gesamtleistung über beide Achsen benötigt wird. Das Verhältnis der Dauerleistung bei maximaler Drehzahl (n_{max}) zur möglichen Spitzenleistung ($P_{\text{cont}}/P_{\text{peak}}$) bei gängiger Wassermantel- oder Ölkühlung beträgt bei der ASM $\leq 25\%$ und bei der PSM $\geq 50\%$. Die PMaSynRM liegt mit $\leq 35\%$ dazwischen.

Bei der Spitzenleistung (P_{peak}) fällt auf, dass die PSM den geringsten Leistungsabfall bei hoher Drehzahl zeigt. Die PMaSynRM verhält sich in der

BILD 3 Aufbau und Wirkungsgradkennfelder von ASM (links), PSM (Mitte) und PMaSynRM (rechts) (© Magna)

betrachteten Auslegung ähnlich. Sie zeichnet sich durch das Effizienzmaximum im mittleren Drehzahlbereich bei höheren Drehmomenten aus. Die Spitzenleistung P_{peak} der ASM fällt dagegen über die Drehzahl deutlicher ab. Den Vergleich der drei E-Maschinentypen illustrieren **BILD 2** und **BILD 3**. Anders sieht das Ergebnis aus, wenn man die Leistungsdichte betrachtet, die sich auf Bauraumbedarf, Masse und Materialkosten auswirkt. Bei der ASM beträgt diese $< 30 \text{ kW}_p/\text{dm}^3$ und bei der PSM über $45 \text{ kW}_p/\text{dm}^3$. Die PMASynRM folgt knapp mit rund $40 \text{ kW}_p/\text{dm}^3$, bezogen auf das Volumen der Aktivteile.

Der größte Einfluss auf die Gesamteffizienz ergibt sich durch die Schleppverluste. Eine PSM als Sekundärtrieb ohne die Möglichkeit, die E-Maschine abzukoppeln, kommt nicht in Betracht. Die Verluste wären mit circa 600 W bei 600/min nicht akzeptabel. Durch die Abkopplung können die Schleppverluste der E-Maschine und des Getriebes dagegen auf null reduziert werden. Bei der ASM liegt die Verlustleistung bei etwa 150 W [1], im Wesentlichen verursacht durch Lager-, Luftspalt- und gegebenenfalls Planschverluste der Ölkühlung. Bei der betrachteten PMASynRM als Mischkonstruktion betragen die Verluste ohne Abkopplung $< 270 \text{ W}$. Die Reaktionszeit für den Drehmomentaufbau einer PSM und PMASynRM beträgt unter 10 ms, für die ASM vorsteuerungsabhängig 50 bis 70 ms.

BILD 4 Kostenvergleich der E-Maschinenbauarten einschließlich einer PSM-Variante mit DCU (t = Zeitdauer, für die P_{peak} zur Verfügung steht) (© Magna)

KOSTENBETRACHTUNG

Der Kostenvergleich für die drei Maschinentypen ist normiert und vereinfacht in **BILD 4** dargestellt. Die größten relativen Unterschiede zeigen sich aufgrund der Seltene-Erden-Magnete beim Rotor. Beim Stator der ASM ist das Kupfer ausschlaggebend. Bei der PMASynRM senkt der Anteil an Ferrit-Magneten die Kosten, er beträgt im konkreten Fall rund zwei Drittel der Gesamtmasse. Am günstigsten

wäre theoretisch die PSM ohne DCU, allerdings mit den beschriebenen Nachteilen. In den übrigen Bereichen sind die absoluten Unterschiede geringer.

Die Datenbasis für den Vergleich beruht auf durchschnittlichen Marktpreisen für Kupfer, Elektro Stahl, Neodym und Dysprosium im Jahr 2020. Das höchste wirtschaftliche Risiko bergen die Marktpreise für Seltene Erden und in weniger hohem Maße Kupfer. Wie sich die Materialkosten zukünftig entwi-

BILD 5 Szenarienvergleich: Basisszenario (vor Covid-19, Rohstoffreferenzpreis), Szenario 1 (Durchschnittsrohstoffpreise 2020: Cu -6 %, Dy +10 %), Szenario 2 (durch Covid-19 beeinflusst: Cu +18 %, Nd +57 %, Dy +10 %), Szenario 3 (Seltene-Erden-Peak-Jahr 2011: Cu -33 %, Al +31 %, Nd +300 %, Dy +394 %) (© Magna)

BILD 6 Qualitativer Vergleich der Eigenschaften von ASM, PSM und PMSynRM sowie der PSM-Variante mit DCU (© Magna)

ckeln, ist natürlich schwer vorauszusagen. Beispielsweise waren sie im Jahr mit dem höchsten Preis, 2011, für Neodym und Dysprosium kurzzeitig um das Zwanzig- bis Dreißigfache gestiegen. Hier können sich auch politische Entwicklungen oder Entscheidungen im Bezug auf Umweltaspekte oder Sozialstandards auswirken. Magna hat vier Szenarien simuliert, um die Auswirkungen näherungsweise einzugrenzen: die Marktpreise im Februar 2020 (vor der Covid-19-Pandemie), die Durchschnittspreise 2020, die Preise im Dezember 2020 (durch die Covid-19-Pandemie beeinflusst) sowie jene im Hochpreisjahr 2011 [4]. Nur im letzten Szenario war die ASM im Gesamtsystemvergleich kostengünstiger, **BILD 5**.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

BILD 6 stellt zusammenfassend die Stärken und Schwächen der drei betrachteten E-Maschinentypen qualitativ dar. Zu den interessantesten Erkenntnissen der Untersuchung zählt, dass nicht, wie vielfach angenommen, der Bedarf an teuren Seltene-Erden-Magneten gegen eine PSM oder eine PMSynRM spricht. Aufgrund

der unterschiedlichen Maschinencharakteristika der verglichenen Antriebe haben beispielsweise die geforderte Dauerleistung, die Reaktionszeiten oder der Bauraumbedarf unter Umständen eine stärkere Auswirkung auf die Gesamtkosten, die Leistung oder den Nutzen des Antriebs.

Im Einzelfall ist grundsätzlich eine Bewertung hinsichtlich der spezifischen Anwendung unter Berücksichtigung der gewünschten Betriebsstrategie und der Bauraumziele erforderlich. Magna Powertrain verfügt über die Erfahrung und Simulations-Werkzeugketten, um E-Maschinentyp und Eigenschaften, Fahrzeugrahmenbedingungen sowie anwendungsspezifische Anforderungen im Gesamtsystem ganzheitlich zu optimieren. Im Einzelfall kann sich jeder der verglichenen E-Maschinentypen als sinnvoll erweisen.

Die Bewertung der KPIs ist ein laufender Prozess. So muss der Rohstoffmarkt weiter beobachtet werden, ebenso wie neue technische Ansätze, mit denen sich der Anteil an Seltene-Erden-Rohstoffen verringern lässt. Neue Erkenntnisse fließen regelmäßig in die Entwicklungswerkzeuge von Magna Powertrain ein, um anwendungsspezifisch die optimale

Synthese aus Kosten und Produkteigenschaften anbieten zu können.

LITERATURHINWEISE

- [1] Lindvai-Soos, D.; Kaimer, S.: Elektroantriebe für Allradfunktionen – Ein Systemvergleich von ASM oder PSM. In: ATZ 124 (2022), Nr. 1, S. 48-51
- [2] Neudorfer, H.: Weiterentwicklung von elektrischen Antriebssystemen für Elektro- und Hybridstraßenfahrzeuge. Wien: Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2010
- [3] Bolte, E.: Elektrische Maschinen. Hamburg/Berlin: SpringerVieweg, 2018
- [4] Elsner, H.: Kritische Versorgungslage mit schweren Seltene Erden – Entwicklung „Grüner Technologien“ gefährdet? Online: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/36_kritische-versorgungslage.pdf?__blob=publicationFile&v=4, aufgerufen: 16. November 2021

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 Test now for 30 days free of charge:
www.mtz-worldwide.com

Plenarvorträge: Der große Überblick

- + Luca **De Meo**, Philippe **Brunet**, Renault S.A.,
zum Thema „Der neue Weg, von ICE zu E-TECH: Den Wandel mit eigenen Innovationen willkommen heißen“
- + Wolf-Henning **Scheider**, ZF Group,
zum Thema „Next Generation Mobility im Antrieb: now“
- + F. Peter **Mitterbauer**, Miba AG,
zum Thema „Miba – Technologies for a Cleaner Planet“
- + Markus **Schäfer**, Daimler AG,
zum Thema „VISION EQXX: Mission Efficiency“
- + Andreas **Gorbach**, Daimler Truck AG,
zum Thema „Wie LKW die Welt bewegen“
- + Frank **Hiller**, Deutz AG,
zum Thema „Nachhaltige Antriebssysteme in Off-Highway Anwendungen“
- + Thomas **Ulbrich**, Volkswagen AG,
zum Thema „Ready for Future – Volkswagen’s Way to Zero“

Spezialisierte Fachvorträge über

- CO₂-Verminderung – Wege zur Defossilisierung
- Elektrofahrzeuge und neue Batterietechnologien
- Wasserstoff – Brennstoffzelle & H₂-Motor
- Neue Motoren- und Komponentenentwicklung
- Elektrifizierung des Antriebsstrangs – PKW & NFZ
- Synthetische Kraftstoffe
- Abgasnachbehandlung – Herausforderungen durch EU7
- Autonomes Fahren
- Entwicklungsmethoden und Testsysteme
- Blick in die Zukunft

Virtuelle Sektion

- 25 zusätzliche Videovorträge

Podiumsdiskussion

- Thema „Antriebe für die zukünftige Mobilität“

Das 43. Internationale Wiener Motorensymposium ist als Präsenzveranstaltung geplant. Bei Covid-bedingter Absage der Präsenzveranstaltung wird eine virtuelle Veranstaltung durchgeführt, auf die alle Teilnehmer umgebucht werden.

Einzelheiten und Anmeldung unter <https://wiener-motorensymposium.at>