

VERGLEICH VERSCHIEDENER ANTRIEBSSYSTEME FÜR EINEN ELEKTRISCHEN 75 kW - FAHRZEUGANTRIEB

A. Lange, W.-R. Canders, F. Laube, H. Mosebach

(Deutsche Kurzfassung des ICEM 2000 – Beitrages: "Comparison of different drive systems for a 75 kW electrical vehicle drive“)

Die Untersuchungen beziehen sich auf elektrische Antriebe für Stadtbusse in Niederflurtechnik. Es existieren einschneidende Restriktionen bezüglich der Abmessungen und der Energieumwandlungsgüte von Maschine und Stromrichter. Beispielhaft wird eine mechanische Leistung von 75 kW bei Raddrehzahlen von ca. 100 min^{-1} mit einem Feldschwäcbereich mit konstanter Leistung von 100 bis ca. $400 \dots 500 \text{ min}^{-1}$ angenommen.

Zunächst geht es um die Wahl eines geeigneten Übersetzungsverhältnisses für das Getriebe, wobei die Fragen des Drehmomentbedarfs, der Maschinenabmessungen und der Verluste als Funktion der Kraftdichte und der Maximalfrequenz zu betrachten sind. Der Durchmesser- und Längenzuwachs gegenüber den aktiven Abmessungen wird als proportional zur Polteilung angenommen. Es zeigt sich, daß die geforderten Abmessungen bei einer Kraftdichte von z. B. 40 kN/m^2 Frequenzen von über 400 Hz und Getriebeübersetzungen von mindestens 6 erfordern.

Für den beabsichtigten Vergleich werden die folgenden 6 Maschinenkonzepte herangezogen:

- Asynchronmaschine (ASM)
- Geschaltete Reluktanzmaschine (SRM)
- Hybrid erregte Synchronmaschine (HPSM)
- Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM)
- Polyphasige permanentmagneterregte Synchronmaschine (PPSM)
- Transversalflußmaschine (TFM)

Je nach Eignung wurden dabei Innen- und Außenläufervarianten betrachtet.

Die **Asynchronmaschine** ist als etablierte Lösung anzusehen. Sie leidet jedoch unter der erheblichen Läuferverlustleistung und dem hohen Blindleistungsbedarf. Weiterhin ist ihre natürliche Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie bei

konstanter Statorspannung entsprechend $M \sim 1 / n^2$ derart, daß eine Diskrepanz zum Drehmomentbedarf $M \sim 1 / n$ besteht. Hieraus resultiert eine erhebliche Überdimensionierung des Maschinenentwurfs.

Die **Geschaltete Reluktanzmaschine** wird allgemein als interessante Alternative zur Asynchronmaschine angesehen, da sie noch robuster und einfacher aufgebaut ist als diese und besonders einfache Stromrichterkreise (nur 1 Stromrichtung) ermöglicht. Eine Überlegenheit über die Asynchronmaschine konnte insgesamt jedoch nicht festgestellt werden. Der Scheinleistungsbedarf war – vor der TFM – der größte im gesamten Vergleich.

Die Möglichkeiten der **Hybrid erregten Synchronmaschine** werden nach Meinung der Autoren in der Regel unterschätzt. Sie bietet bei niedrigem Permanentmagnetaufwand ausgezeichnete Feldschwächeigenschaften, so daß der Statorstrom bis beinahe zu den höchsten Drehzahlen zurückgenommen werden kann. Die HPSM wird vorzugsweise als Außenläufermaschine realisiert.

Die **Permanentmagneterregte Synchronmaschine** sowie die **Polyphasige permanentmagneterregte Synchronmaschine** werden zweckmäßig als Maschinen mit Magneten am Luftspalt (Flachmagnetausführung) konzipiert. Verglichen mit den zuvor angesprochenen Varianten erhält man deutlich kleinere Aktivmassen und einen besseren Wirkungsgrad. Die Feldschwächeigenschaften sind demgegenüber als eingeschränkt zu bezeichnen, so daß der Bedarf an Scheinleistung trotz der eingprägten Magnetisierung ähnlich hoch ist wie bei der Asynchronmaschine.

Bei der **Transversalflußmaschine** findet man eine im wesentlichen quer zur Bewegungsrichtung verlaufende Flußführung. Die Wicklung besteht demnach aus einfachen Ringspulen, während der mechanische Gesamtaufbau im übrigen als kompliziert anzusehen ist. Die Maschine ist vom Prinzip her als Einphasenmaschine anzusprechen. Das Gesamtmoment wird aus der Überlagerung der Teilmomente der beiden Maschinenhälften gebildet. Bei erhöhtem Permanentmagnetbedarf und einem gewissen Mehraufwand an Wechselrichterleistung (beides gegenüber den anderen untersuchten Konzepten mit Permanentmagneterregung) bietet die TFM aufgrund der kurzen Wicklungslänge einen hervorragenden Wirkungsgrad, weiterhin gute Feldschwächeigenschaften und ein kleines Bauvolumen.

Für den Vergleich der Antriebseigenschaften wurden im wesentlichen das Maschinenvolumen, die aktive Masse, die Baulänge, der Magnetbedarf, die Verlustleistung und die zu installierende Wechselrichterscheinleistung herangezogen. Zur möglichst objektiven Bewertung eignet sich die Methode des paarweisen Vergleichs, bei der die Gewichtungsfaktoren durch eine Vergleichsmatrix mit der paarweisen Vergabe von 4 Punkten je Paar ermittelt und der Erfüllungsgrad der einzelnen Kriterien durch Punkte von 0 bis 10 dargestellt wird. Die Methode ist relativ einfach z.B. in EXCEL darzustellen und erweist sich im Idealfall als weitgehend unempfindlich gegenüber einer Variation der Teilbeurteilungen.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Antriebseigenschaften ist durch die folgende **Tabelle 1** gegeben.

Tabelle 1: Vergleich der Antriebsvarianten

Maschine Merkmal	ASM	SRM	HPSM	PSM	PPSM	TFM
Läuferbauform	innen	innen	außen	innen	innen	Hohlz.
Volumen (10^{-3} m^3)	53,2	44,0	37,6	35,0	38,9	22,3
Aktivmasse (kg)	272	147	106	79	71	73
Magnetmasse (kg)	-	-	2,7	4,7	7,0	11,5
Wirkungsgrad	0,900	0,930	0,932	0,941	0,949	0,976
Scheinlsg. (kVA)	396	984	254	361	385	455
Punkte (0... 10)	2 ... 3	2 ... 3	5 ... 6	6 ... 7	5 ... 6	7 ... 8

Unter den hier getroffenen Annahmen und Spezifikationen stellt die Transversalflußmaschine demnach die optimale Lösung dar.

Als Stand der Realisierung ist der Einsatz als Generator in einem Niederflrbus der VAG Nürnberg (Voith Elvo Drive / MAN) zu nennen.

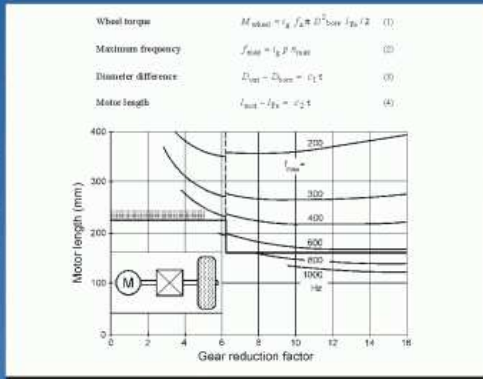
Comparison of different drive systems for a 75kW electrical vehicle drive

VOITH TURBO
POWER TRANSMISSION

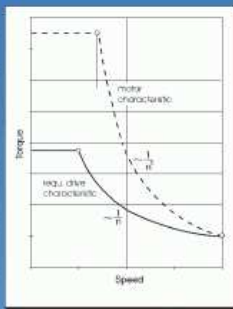
A. Lange
Voith Turbo
Heidenheim, Germany



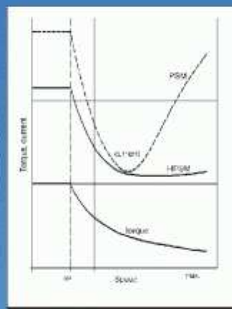
W.-R. Canders, F. Laube, H. Mosebach
Technical University Braunschweig
Braunschweig, Germany



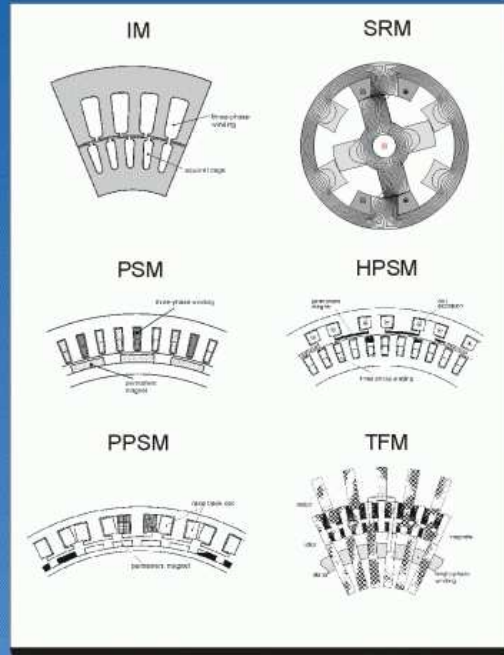
Selection of gear reduction factor



Induction machine characteristic conflicting with required load



Current-speed curves of a HPSM compared to a PSM



Investigated machines



Voith Turbo TFM and ELVO-Drive[®] equipped bus

Applied criteria:

- volume
- total active mass
- Fe-, Cu- and PM-masses
- power loss at rated speed
- power loss at maximal speed
- inverter power

Example for the method of ranking

The method is explained by an example with 3 criteria:

Step 1: One by one comparison to define weighting factors

The features are compared one by one, assigning in total 4 points for each pair ($n_{11} = n_{22} = 4$).

Criterion / feature	1	2	3	weighting factor G_i
1 A		3	2	5
2 B	1		1	2
3 C	2	3		5

$\sum G_i = 12$

The matrix elements are obtained by a series of questions and answers, e.g.:
 Question: "What is more important to you?" A or B?
 Answer: "A is more important for me (3 points) than B (1 point)."

Step 2: System evaluation

The degree in which the criteria are met by the considered system is described by points from 0 to 10. Example:

Criterion	weighting factor	assigned points	weighted points
1	5	9	45
2	2	3	6
3	5	2	10

$\sum P_i G_i = 61$

Achieved normalized points: $\sum P_i G_i / \sum G_i = 61 / 12 = 5.08$

Method of ranking

feature \ machine	IM	SRM	HPSM	PSM	PPSM	TFM
volume (10 ⁻³ m ³)	53.2	44.0	37.6	35.9	38.9	22.3
active mass (kg)	272	147	106	79	71	73
magnet mass (kg)	-	-	2.7	4.7	7.0	11.3
efficiency	0.900	0.930	0.922	0.941	0.949	0.976
inverter power (VVA)	396	98.4	254	3.61	385	435
ranking (points 0... 10)	2... 3	2... 3	5... 6	6... 7	5... 6	7... 8

Comparison and ranking