

**Ausgewählte Arbeiten
aus dem
Institut für Elektrische Maschinen
ETH Zürich**

Herausgegeben von Prof. Dr. K. Reichert

**Entwicklung einer Drehfeldmaschine mit
optimalem Wirkungsgrad für ein Hybridfahrzeug**

von
Lukas Küng
Dr. sc. techn.

Dissertation ETH Nr. 11373

1995

ZUSAMMENFASSUNG

Entwicklung einer Drehfeldmaschine mit optimalem Wirkungsgrad für ein Hybridfahrzeug

Teil I: Elektrische Maschinen für Hybridfahrzeuge

Die ETH Zürich entwickelt im Rahmen des Fahrzeugprojekts «Hybrid III» einen Parallelhybrid mit Schwungradspeicher. Das Projekt verfolgt das Ziel, für alle Antriebskomponenten den Wirkungsgrad zu optimieren. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Berechnung der elektrischen Maschine für dieses Hybridfahrzeug. Elektrische Energie steht in einem Fahrzeug nur beschränkt zur Verfügung. Deshalb muss die elektrische Maschine – als Motor und als Generator – einen möglichst hohen Wirkungsgrad erzielen. Eine einzige elektrische Maschine muss vier Funktionen erfüllen: Sie ist Starter für den Verbrennungsmotor, Generator für das Bordnetz sowie Antrieb und Bremse für das Fahrzeug. Diese Anforderungen bedingen einen grossen Last- und Drehzahlbereich; den optimalen Wirkungsgrad muss die Maschine bei ca. 5 % Teillast erreichen (Generator). Ein systematischer Vergleich verschiedener Maschinentypen zeigt, dass sich eine Asynchronmaschine am besten für den Einsatz in diesem Hybridfahrzeug eignet. Um den Wirkungsgrad im Teillastbereich zu optimieren, werden in dieser Arbeit drei Lösungen vorgeschlagen:

1. Flussanpassung: Der magnetische Fluss wird optimal an die Belastung der Maschine angepasst.
2. Wicklungsumschaltung: Die Wahl zwischen zwei unterschiedlichen Windungszahlen erlaubt, die Maschine mit möglichst hoher Spannung zu betreiben und die Verluste in der Leistungselektronik zu reduzieren.
3. Drehfeldmaschine mit Dauermagneten: Ein Kurzschlussläuferrotor enthält Dauermagnete im Joch. Er dreht bei Schwachlast synchron, bei Vollast asynchron.

Teil II: Berechnung der elektrischen Maschine

Teil II beschreibt die Auslegung der Asynchronmaschine. Der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Verluste wird untersucht und minimiert. Um einen optimalen Wirkungsgrad zu erreichen, muss man das maximale Kippmoment einschränken. Das komplexe Kühlungssystem – ein interner geschlossener Luftkreislauf und eine Wasserkühlung – erfordert eine dynamische Erwärmungsrechnung.

Einen Schwerpunkt der Arbeit bildet der Vergleich verschiedener Statorwicklungen. Die Arbeit zeigt für eine vorgegebene Wicklung, wie die Nutverteilung Hauptinduktivität und Streuinduktivitäten und damit das Kippmoment beeinflusst. Das Drehmoment lässt sich mit derselben Wicklung um 40 % variieren. Die Wicklungsarten werden weiter nach drei Kriterien bewertet: Grösse der Stirnraumverbindungen, Stromverdrängung, Einfluss eines exzentrischen Rotors.

Teil III: Betriebserfahrungen

Der Verfasser hat drei Prototypmaschinen hergestellt – drei Statoren mit unterschiedlicher Wicklung und drei Kurzschlussläuferrotoren (einer davon mit Dauermagneten) – und sie auf einem Prüfstand getestet. Die Regelung erfordert genaue Kenntnisse über die Ersatzschaltbildparameter, die sich aus Messungen ableiten lassen. Die Streuinduktivität des Statorwickelkopfs und den frequenzabhängigen Statorwiderstand kann man mit der Streuprobe ohne Rotor ermitteln.

Alle Prototypen erfüllen die Anforderungen der vier Betriebsarten und erreichen auch im Teillastbereich hohe Wirkungsgrade ($> 90\%$). Die Drehfeldmaschine mit Dauermagneten erreicht mit 96.5% den besten Wirkungsgrad. Mit Ausnahme des Kippbereichs lässt sie sich ohne weiteres auch asynchron betreiben.

SUMMARY

Development of a Rotating Field Machine with Optimal Efficiency for a Hybrid Car

Part I: Electric machines for hybrid cars

As part of the vehicle project «Hybrid III», the ETH Zurich is developing a parallel hybrid with flywheel storage. The project aims at optimising the efficiency of all drive components. This thesis deals with the calculations for the electric machine for this hybrid car. In a vehicle, only a limited supply of electrical energy is available. Therefore, the electric machine must achieve – as a motor and as a generator – the highest possible efficiency. One single electric machine must fulfill four functions: It must act as the starter for the combustion engine and the generator for the on-board power supply as well as being both drive and brake for the vehicle. A wide load and speed range, therefore, results from this; the machine must reach optimal efficiency at approx. 5 % of the full load (generator). A systematic comparison of different machine types shows that a squirrel cage induction machine fits the requirements of this hybrid car best. To optimise the efficiency in the partial load area, three solutions are proposed:

1. Flux adjustment: The magnetic flux is adjusted optimally to the load on the machine.
2. Coil switch: The choice of two numbers of turns allows the machine to be supplied with the highest possible voltage and the losses in the power electronics to be reduced.
3. Rotating field machine with permanent magnets: A squirrel cage rotor contains permanent magnets in the yoke. At part load, it rotates synchronously, at full load asynchronously.

Part II: Design of an induction machine

The design of the induction machine investigates and minimises the influence of the different parameters on losses. To reach optimal efficiency, the maximum breakdown torque has to be limited. The complex cooling system, consisting of an internal closed air circulation and a water-cooling requires a dynamic heat calculation.

The comparison of different stator coils is focused. The thesis shows how, for a given coil, the slot distribution influences magnetising and leakage inductances (breakdown torque). With the same coil, the torque can vary around 40 %. Furthermore, the different types of coils are rated according to three criteria: The size of the coils' end, current displacement and the influence of an eccentric rotor.

Part III: Test results

The author has manufactured and tested three prototype machines – three stators with different windings and three squirrel cage rotors (one with permanent magnets). The control requires exact knowledge of the parameters of the equivalent-circuit diagram, which can be derived from measurements. The leakage inductance of the coils' ends and the dependency of the stator resistance can be determined by the leakage test without rotor.

All prototypes fulfill the demands of the four modes of operation and also reach a high level of efficiency (> 90 %) in the part load area. The induction machine with permanent magnets reaches the best efficiency with 96,5 %. With the exception of the pull-out torque area, it can also easily be operated asynchronously.