

Jahresbericht 2003, 12. Dezember 2003

Projekt

Hocheffiziente getriebelose Antriebe

Autor und Koautoren	Ralph Niederer
beauftragte Institution	Konsortium Technocon / Bartholdi
Adresse	c/o Technocon AG, Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	01/ 445 18 30, niederer@technocon.ch , www.technocon.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	45815 / 85874
Dauer des Projekts (von – bis)	1.05.02 bis 30.04.04

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Projekt werden hocheffiziente, getriebelose Antriebe für Anwendungen mit tiefen Drehzahlen entwickelt. Dieses System besteht aus einem IGBT-Umrichter und einer hochpoligen permanenterregten Synchronmaschine. Dieses System kann mit beiden Drehrichtungen und beiden Energierichtungen arbeiten, so dass es auch als Generatorsystem bei der Stromerzeugung verwendet werden kann.

Die hohe Effizienz hinsichtlich Wirkungsgrad und Materialeinsatz wird erreicht, weil einerseits auf ein mechanisches Getriebe verzichtet werden kann, und andererseits Maschine und Umrichter in vielen Schritten auf einander abgestimmt und in vielen Details verbessert wurden.

Dieses Antriebssystem wird für 2 Leistungsklassen entwickelt und geprüft: 1.2 MW und 3 kW.

In diesem Jahr wurden Umrichter und Maschine für das 1.2 MW System fertig gestellt und geprüft.

Die Prüfungen verliefen erfolgreich. Die Funktionsfähigkeit bei Nennbetrieb wurde nachgewiesen und die geprüften Störfälle wurden problemlos beherrscht. Weder an Umrichter noch an der Maschine mussten Änderungen vorgenommen werden. Die vorausgerechneten Wirkungsgrade von ca. 95.8% für die Maschine und ca. 98% für den Umrichter konnten messtechnisch bestätigt werden.

Damit betragen die Gesamtverluste dieses Antriebssystems total ca. 6.2% gegenüber ca. 11% des konventionellen Systems, was einer Reduktion um mehr als 50% entspricht. Die Verluste sind mehr als 20% tiefer als zu Projektbeginn erwartet.

Bei der Auslegung der 3 kW Maschine musste erheblich mehr Zeitaufwand als erwartet aufgewendet werden, um eine optimale Lösung zu erreichen, da sich das ursprünglich vorgesehene „Down-Scaling“ der 1.2 MW Maschine als ungeeignet erwiesen hat. Die Prüfung des 3 kW Systems beginnt im Januar 2004.

Projektziele

Es wird die Technologie für ein drehzahlvariables Antriebssystem, bestehend aus IGBT-Umrichter und einer hochpoligen permanentenerregten Synchronmaschine für eine Leistung bis 1.5 MW entwickelt. Gleichzeitig wird an der *Hochschule Wallis* die Umsetzung dieses Konzepts auf kleinere Leistungen (1 .. 100 kW) untersucht.

Dieses Antriebssystem ist geeignet für getriebelose Antriebe mit tiefen Drehzahlen. Da dieses System für beide Drehrichtungen und beide Energierichtungen ausgelegt ist, kann es auch als Generatorsystem bei der Stromerzeugung verwendet werden.

Neu an diesem Projekt ist die sehr enge Zusammenarbeit von Maschinenhersteller und Umrichterhersteller in allen Phasen der Entwicklung. Dies erlaubt eine Optimierung des Gesamtsystems bezüglich Verfügbarkeit, Wirkungsgrad und Materialeinsatz.

Die Firmen *Technocon AG* und *Bartholdi AG* entwickeln, produzieren und prüfen einen Umrichter bzw. eine Maschine mit einer Bauleistung von 1.2 MW.

Die *Hochschule Wallis* entwickelt, produziert und prüft das gleiche Antriebskonzept an einem Prototyp mit ca. 3 kW Bauleistung.

Bedeutung und Vorteile dieses Antriebssystems

Das getriebelose Antriebssystem hat folgende Vorteile:

- Keine Getriebe-Verluste
- Keine Getriebe-Geräusche
- Platz-, Gewicht- und Materialreduktion
- Erhöhte Zuverlässigkeit, da keine Getriebeausfälle
- Geringer Wartungsaufwand

Einsatzgebiete dieses Antriebssystems

Getriebelose Antriebs- bzw. Generatorsysteme sind insbesondere für folgende Anwendungen geeignet:

- Förderanlagen
- Mühlen (Zement, Zucker, ...)
- Walzwerke
- Schiffsantriebe
- Evtl. Traktion
- Windgeneratoren
- Evtl. Wassergeneratoren

Energiesparpotential dieses Antriebssystems

Heutige drehzahlvariable Antriebs- und Generatorsysteme für niedrige Drehzahlen weisen folgende Anlagenteile auf:

- Getriebe (ca. 3% Verluste)
- Asynchronmaschine (ca. 5% Verluste)
- Frequenzumrichter (ca. 3% Verluste)

Das getriebelose System besteht aus folgenden Anlagenteilen:

- Permanenterregte Synchronmaschine (ca. 5% Verluste)
- Frequenzumrichter (ca. 3% Verluste)

Das Einsparpotential im Nennbetrieb beträgt somit ca. 3% (Einsparung der Getriebeverluste), bei Teillast ist das Potential sogar noch grösser, da die permanenterregte Synchronmaschine einen besseren Teillastwirkungsgrad aufweist als alle anderen Maschinentypen.

Aufgrund dieser Daten kann folgendes Energiesparpotential für die verschiedenen Einsatzgebiete berechnet werden:

Industrieantriebe in der Schweiz > 100 kW:	total 400 GWh/a		
Davon drehzahlvariabel mit tiefer Drehzahl (geschätzt)	20%		
Einsparpotential	3%	entspricht	2.4 GWh/a
Industrieantriebe in der Schweiz < 100 kW:	total 1920 GWh/a		
Davon drehzahlvariabel mit tiefer Drehzahl (geschätzt)	20%		
Einsparpotential	3%	entspricht	57.6 GWh/a
Seilbahnen in der Schweiz:	total 100 GWh/a		
Einsparpotential	3%	entspricht	3.0 GWh/a
Traktion in der Schweiz (technische Machbarkeit muss allerdings noch geklärt werden!)	total 2400 GWh/a		
Einsparpotential	3%	entspricht	72.0 GWh/a
Windkraftanlagen in Europa (Stand Ende 2001):	total 40'000 GWh/a		
Einsparpotential	3%	entspricht	1200 GWh/a

Zielsetzungen

Die Zielsetzungen dieses Projektes sind:

- Verbesserung des Wirkungsgrads des gesamten Antriebssystems
- Reduktion der Baugrösse
- Verkleinerung des Gewichts

Ziele für 2003

Für den 1.2 MW Prototyp wurden folgende Ziele für 2003 gesetzt:

Fertigstellung der Produktion und Prüfung des Prototyps.

Für den 3 kW Prototyp wurden folgende Ziele für 2003 gesetzt:

Fertigstellung von Berechnung, Konstruktion und Produktion des Prototyps.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

1.2 MW Umrichter

Die Produktion des Prototyp-Umrichters wurde noch 2002 abgeschlossen, so dass 2003 umfangreiche Tests durchgeführt werden konnten. Trotz der kompakten Bauweise des Umrichters konnte ein funktionaler und übersichtlicher Aufbau realisiert werden (siehe Fig. 1 und 2).

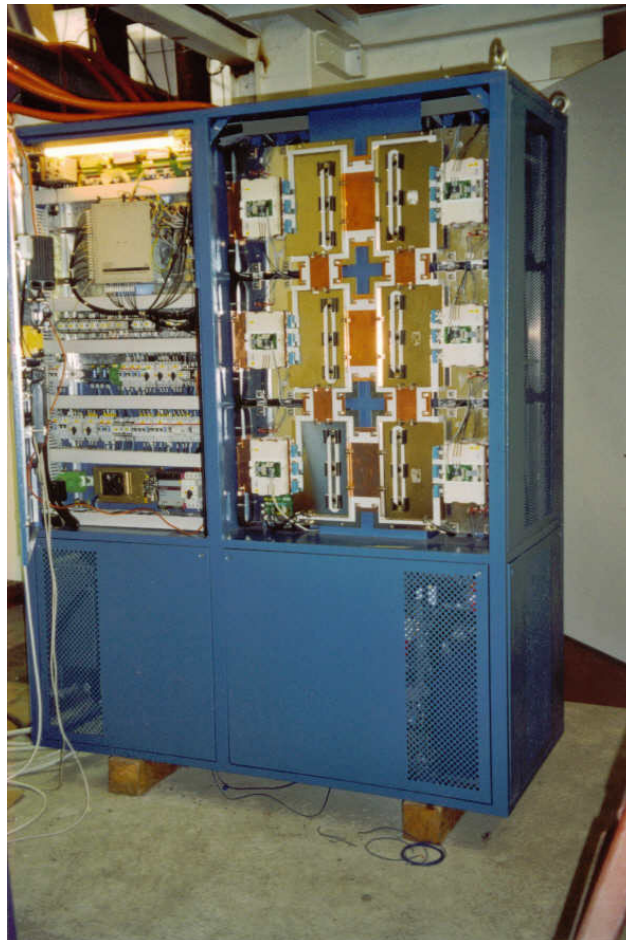


Fig. 1: Ansicht des 1.2 MW Umrichter mit geöffnetem Control-Feld und geöffnetem IGBT-Feld (Quelle: *Technocon AG*)



Fig. 2: Detail-Ansicht des Control-Feldes des 1.2 MW Umrichters (Quelle: *Technocon AG*)

Folgende Tests wurden durchgeführt:

- Spannungsprüfung (d.h. Überprüfung der Spannungsfestigkeit des Aufbaus)
- Überprüfung aller Funktionen
- Prüfung der Kommunikation über RS232-Schnittstelle und Ethernet
- Überprüfung der Diagnose-Funktionen und der Bedienung
- Überprüfung der Kühlluft-Verteilung

Die weiteren Tests wurden zusammen mit der Maschine durchgeführt.

1.2 MW Maschine

Die Produktion der Prototyp-Maschine wurde abgeschlossen (Fig. 3).

Folgende Tests wurden durchgeführt:

- Spannungsprüfung (d.h. Überprüfung der Spannungsfestigkeit des Aufbaus)
- Überprüfung der Datenblatt-Parameter

Die weiteren Tests wurden zusammen mit dem Umrichter durchgeführt.



Fig. 3: 1.2 MW Maschine, liegend (Quelle: Technocon AG)

Messungen am Gesamtsystem 1.2 MW

Um den Aufwand für den Test am Gesamtsystem zu reduzieren, wurde ein neues Testverfahren realisiert. Mit diesem Testverfahren werden ausser dem Umrichter und der Maschine keine weiteren Anlagenteile wie Belastungsmaschine, Rückspeisenumrichter, leistungsfähiger Netzanschluss, Drehzahlgeber usw. benötigt.

Dieses Testverfahren wurde bereits bei der Auslegung von Maschine und Umrichter berücksichtigt:

- Die Maschine weist 2 von einander unabhängige 3-phasige Statorsysteme auf
- Der Umrichter besteht aus 2 von einander unabhängigen 600 kW Systemen, die unabhängig von einander geregelt und in beide Energierichtungen arbeiten können
- Der Umrichter ist mit einer Software sowohl für motorischen wie auch generatorischen Betrieb ausgerüstet, welche in beiden Fällen keinen Drehzahlgeber benötigt.

Mit diesen Voraussetzungen war es möglich, über jeweils ein Umrichter- und Maschinen-System die Maschine anzutreiben und mit dem anderen System zu bremsen. So konnte die elektrische Leistung „im Kreis herum“ fließen und der Netzanschluss musste lediglich die Umrichter- und Maschinenverluste aufbringen.

Mit dieser Testmethode konnte beinahe Nennleistung gefahren werden. Dies war nicht selbstverständlich, denn regelungstechnisch ist diese Testmethode sehr anspruchsvoll, da das mechanische Trägheitsmoment sehr klein und damit das System ziemlich instabil ist.

Um Maschine und Umrichter dennoch mit Nennstrom belasten zu können, wurde zusätzlich zum Wirkstrom noch ein Blindstrom so erzeugt, dass die Summe dem Nennstrom entsprach.

In diesem Versuchsaufbau wurden umfangreiche Messungen vorgenommen [1], [2]:

- Messung der Kurvenformen von allen Spannungen und Strömen
- Detaillierte Ausmessung der Maschine durch die Firma *Sensoplan*
- Erwärmungsmessungen an Maschine und Umrichter
- Wirkungsgradmessungen an Maschine und Umrichter
- Prüfung von diversen Störfällen wie Netzabschaltung oder Maschinenklemmen-Kurzschluss

Alle Messungen wurden erfolgreich durchgeführt. Es traten keine Schäden auf und Design-Änderungen waren weder an Maschine noch Umrichter nötig.

Alle im Voraus berechneten Werte (Spannungen, Ströme, Datenblattwerte, Wirkungsgrad) wurden bestätigt.

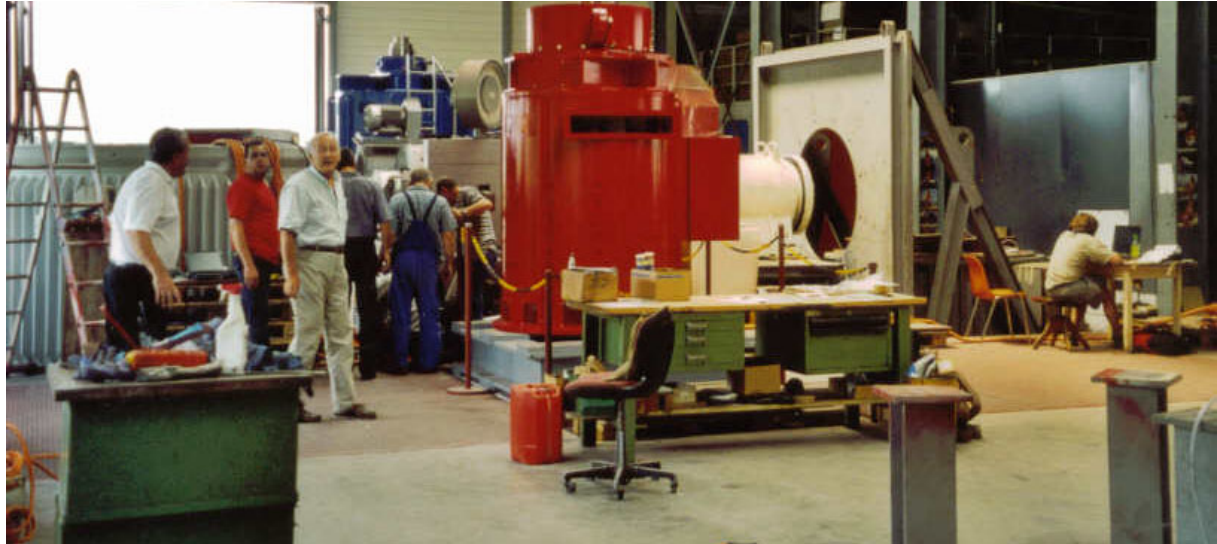


Fig. 4: Prüfung des 1.2 MW Systems (Quelle: *Technocon AG*)

links: Maschine; rechts: Bedienung des Umrichters und Messwertanalyse über Laptop

3 kW Umrichter

Die Arbeiten am 3 kW Umrichter wurden abgeschlossen. Die Regelung ist nun komplett digital in einem DSP implementiert.

Die technisch ausgereifte und hinsichtlich Kosten optimierte Ausführung steht bereit für die Tests zusammen mit der Maschine.

3 kW-Maschine

Bei den Berechnungen der 3 kW Maschine musste man feststellen, dass das ursprünglich vorgesehene „Down-Scaling“ der 1.2 MW Maschine zu keiner optimalen Lösung führt. Ein praktischer Einsatz der „Down-Scale“-Variante wäre aufgrund der Kosten und Abmessungen weitgehend unmöglich gewesen.

Die Auslegung des Magnetkreises, die elektrische Auslegung sowie die konstruktive Auslegung wurden deshalb komplett neu ausgeführt um eine optimale Ausführung hinsichtlich Wirkungsgrad, Materialaufwand und Kosten zu erreichen.

Da diese Optimierung nur in mehreren iterativen Schritten zu erreichen ist, wurde sehr viel Zeit in das Design der 3 kW Maschine investiert.

Es wurde ein gegenüber dem Down-Scaling erheblich verbessertes Design gefunden. Die 3 kW Maschine weist jetzt eine Länge von ca. 900mm, einen Durchmesser von ca. 530 mm und ein Gewicht von ca. 1100 kg auf. Sie hat einen berechneten Wirkungsgrad von ca. 93%, was für eine Maschine dieser Leistung sehr hoch ist.

Diese Maschine befindet sich zur Zeit in der Produktion bei *Bartholdi*.

Nationale Zusammenarbeit

Dieses Projekt wird in Zusammenarbeit mit der *Hochschule Wallis* durchgeführt. Das Konsortium *Technocon / Bartholdi* entwickelt dabei den Prototyp grosser Bauleistung (1.2 MW), die *Hochschule Wallis* den Prototyp kleiner Bauleistung (3 kW). Das hat den Vorteil, dass sich die Firmen auf den hohen Leistungsbereich konzentrieren können, in welchem sie sehr viel Erfahrung haben, ohne den kleinen Leistungsbereich, welcher über ein bedeutendes Energiesparpotential verfügt, vernachlässigen zu müssen.

Die *Hochschule Wallis* verfügt aufgrund früherer Projekte über ein hohes Knowhow, so dass sie ihre Arbeiten mit hoher Kompetenz durchführen kann. Alle Beteiligten erwarten deshalb aus dieser Zusammenarbeit verschiedene Synergie-Effekte.

Es ist zu erwarten, dass diese Zusammenarbeit auch nach Abschluss dieses Projektes in irgend einer Form weiter geführt wird.

Für die Berechnung der 1.2 MW Maschine wurde mit diversen spezialisierten Firmen zusammengearbeitet, z.B. mit *Applied Magnetics* für die Finite-Elemente-Simulation, mit dem *Ingenieurbüro Braun* und Prof. Reichert von der ETH für die Auslegungs-Rechnungen. Auch die Messungen an der Maschine wurden von einer spezialisierten Firma (*Sensoplan*) durchgeführt.

Internationale Zusammenarbeit

Dieses Projekt wird ohne internationale Zusammenarbeit durchgeführt, obwohl ein bedeutender Markt für dieses Antriebssystem ausserhalb der Schweiz liegt.

Dies wird jedoch nicht als Nachteil empfunden, da die beteiligten Projektpartner in der Schweiz über ausreichend Knowhow verfügen. Die geographische Nähe der Projektpartner hat sich als Vorteil erwiesen bei den gemeinsamen Optimierungsarbeiten.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Nachweis der Auslegungsdaten des 1.2 MW Systems

Das gewählte Test-Verfahren mit Verzicht auf eine Belastungsmaschine erwies sich dank dem geringen Aufwand als sehr praktikabel und lieferte aussagekräftige Resultate.

Die umfangreichen Versuche im Prüffeld der Firma *Bartholdi* verliefen erfolgreich. Maschine und Umrichter konnten mit den Nenndaten betrieben werden, ohne dass es zu unzulässigen Belastungen gekommen ist.

Auch das Verhalten bei möglichen Störfällen, z.B. Netzausfall oder Kurzschluss der Maschinenklemmen, wurde erfolgreich getestet.

Nachweis des Wirkungsgrads des 1.2 MW Systems

In der Auslegungsphase wurde für die Maschine ein Wirkungsgrad von 95.8% und für den Umrichter von gegen 98% berechnet.

Die gemessenen Werte im Nennpunkt betragen für die Maschine 95.77% und für den Umrichter 98.05%. Diese Werte stimmen unter Berücksichtigung der möglichen Genauigkeit von Wirkungsgradmessungen sehr gut mit den berechneten Werten überein.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Messung auch die durch den Umrichter verursachten Zusatzverluste der Maschine berücksichtigt sind. Somit sind diese Resultate sehr aussagekräftig.

Auslegung des 3 kW Systems

Der von der *Hochschule Wallis* entwickelte Umrichter ist nun komplett digital geregelt und angesteuert und weist sehr geringe Materialkosten auf.

Die Auslegung der 3 kW Maschine wurde gegenüber dem ursprünglich vorgesehenen „Down-Scaling“ massiv verbessert. Diese Maschine befindet sich zur Zeit in der Produktion.

Terminplan

Die Messungen am 1.2 MW System konnten wie geplant abgewickelt werden. Die Arbeiten am 1.2 MW System konnten somit wie geplant 2003 abgeschlossen werden.

Die Berechnungs- und Konstruktionsarbeiten an der 3 kW Maschine dauerten länger als erwartet. Dies liegt vor allem daran, dass die 3 kW Maschine komplett neu ausgelegt und hinsichtlich technischer Daten, Materialeinsatz und Produktionskosten optimiert wurde.

Die Maschine wird dennoch ab Januar 2004 für die Messungen zur Verfügung stehen.

Ausblick 2004

Im Jahr 2004 wird die Produktion der 3 kW Maschine abgeschlossen und anschliessend die Prüfungen am 3 kW System durchgeführt.

Ende April 2004 wird der Schlussbericht zu diesem Projekt zur Verfügung stehen.

Referenzen

- [1] **Testergebnisse 1.2 MW-Umrichter auf Bartholdi-Prüfstand**, J. Eckerle, Technocon AG, 8005 Zürich
- [2] **Prüfung der Maschine WGP 1500 M56 Permanentmagnet**, M. Bärmann, Sensoplan AG, D-79801 Hohentengen