Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

EFFIZIENTER IEC PERMANENT-MAGNET-MOTOR (3KW)

Jahresbericht 2007

Autor und Koautoren	M. Lindegger, D. Salathé, H.P. Biner, B. Evéquoz
beauftragte Institution	Circle Motor AG, Fachhochschulen Luzern und Wallis
Adresse	Circle Motor AG, Tannackerstrasse 25, 3073 Gümligen
Telefon, E-mail, Internetadresse	031 952 52 52, info@circlemotor.ch, www.circlemotor.com
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100915 / 152353
BFE-Projektleiter	Roland Brüniger
Dauer des Projekts (von – bis)	01.11.06 bis 30.09.08
Datum	11.12.07

ZUSAMMENFASSUNG

Die Studie „ Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren „ zeigte auf, dass der Wirkungsgrad bei den Permanent-Magnet-Motoren bis in den Leistungsbereich von 100kW, höher liegt, als bei vergleichbaren Asynchronmotoren. Eine einfache und schnell durchzuführende Massnahme wäre ein massgebender Austausch von ineffizienten Asynchronmotoren, über die genormte IEC Wellen-Flanschverbindung, mit effizienten Permanent-Magnet-Motoren. Die aktuelle Aufgabe besteht darin einen 3kW Permanent-Magnet-Motor mechanisch für den Einbau in ein IEC Normgehäuse zu konstruieren, auf möglichst hohe Effizienz zu berechnen und zu bauen. Ebenfalls soll ein Konzept einer zugehörigen effizienten Steuerung entwickelt und die Steuerung anschliessend gebaut werden. Motor und Steuerung sind auf einem Prüfstand auszumessen. Für den Permanent-Magnet-Motor und die Steuerung zur Drehzahlverstellung sind eine möglichst seriennahe Kostenrechnung und das Sparpotential zu bestimmen. Ebenfalls wird die Möglichkeit eines Aufbaus als Integralmotor geprüft werden. Bestätigen sich die erwarteten Resultate, bezüglich Effizienz und Kosten, soll die vorgeschlagene Permanent-Technik unter Einbezug der Industrie, in weiterführenden Schritten bis zu einer Leistungsgrösse von 22 kW ausgeweitet werden.

Diese Aufgaben teilen sich Circle Motor AG, die Fachhochschulen Wallis und Luzern.

Bis zum 30.11.07 sind die Ziele der Berechnung, des Baus eines effizienten Permanent-Magnet-Motors, die Herstellung einer effizienten Antriebssteuerung und der Inbetriebnahme auf dem Prüfstand bei der Hochschule Wallis erreicht worden.

Die ersten Messresultate zeigen, dass ein Wirkungsgrad beim Permanent-Magnet-Motor im Bereich 90 – 92% und bei der Antriebssteuerung von 95% zu erwarten ist.

Die wesentlichen Punkte bei der Weiterführung des Projekts sind der Nachweis der Effizienz durch Messungen auf dem Prüfstand und die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit und des Sparpotentials an Energie.

Einleitung

Der überwiegende Anteil der IEC Normmotoren ist nach dem Asynchronprinzip ausgeführt. Der bedeutendste Anteil der am Mark betriebenen IEC Motoren betreffen den Leistungsbereich 1kW bis 22kW. Die Wirkungsgrad Klassifizierung teilt 2 und 4 polige Normmotoren in die drei Klassen EFF1 bis 3 ein. Die grössten am Markt eingesetzten Effizienz-Gruppen sind EFF2 und EFF3. Zu beachten ist, dass die stark gestiegenen Rohstoffpreise die Ausbreitung der EFF1 Asynchronmotoren hemmt. Der EFF1 Typ erkauft seine höhere Effizienz durch Mehraufwand beim Kupfer, Aluminium und höher legiertem Elektroblech.

Die BFE Studie „ Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren „ [1] zeigte auf, dass der Wirkungsgrad bei den Permanent-Magnet-Motoren bis in den Leistungsbereich von 100kW, höher liegt, als bei vergleichbaren Asynchronmotoren.

Diese Studie zeigte auch, dass effiziente Permanent-Magnet-Motoren mit den gleichen Kosten, wie EFF2 Normmotoren, hergestellt werden könnten, wenn die Herstellungsbedingungen etwa gleich wären. Diese Aussage der Kostengleichheit begründet sich in den rasant gestiegenen Rohstoffpreisen, vor allem beim Kupfer und Aluminium. Da das Magnetmaterial nur etwa 1 – 2 % der Masse des Rotors / Stators beträgt, ist es preislich tragbar, zudem lassen sich effiziente Permanent-Magnet-Motoren leichter bauen, als vergleichbare Asynchronmotoren.

Ausgangslage

Eine einfache und schnell durchzuführende Massnahme wäre ein massgebender Austausch von EFF3 Normmotoren, über die genormte IEC Wellen-Flanschverbindung, mit effizienten Permanent-Magnet-Motoren. Nun ist es aber so, dass die wenigen Hersteller von genormten Permanent-Magnet-Motoren, sogar mit den modernen Informationsmitteln, schwer zu finden sind. Heute ist die Marktdurchdringung sehr gering. Deshalb kann eine unmittelbare Empfehlung für eine Vereinbarung mit der Industrie, bezüglich effizienten Permanent-Magnet-Motoren noch nicht erfolgen.

Projektziele

Als Sofortmassnahme wird deshalb ein 3 KW Permanent-Magnet-Motor mit den effizienzbezogenen Erkenntnissen, hervorgegangen aus den BFE Arbeiten: „ Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren“ [1] und „ Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich kleiner 1kW“ [2], realisiert mit dem Ziel seine Effizienz nachzuweisen. Die aktuelle Forschungsarbeit ist im Sinne von „Scale Up“ zu verstehen und die Ergebnisse der früheren und laufenden BFE Aufträge sollen, soweit möglich in die neue Arbeit einfliessen.

Der Permanent-Magnet-Motor im aktuellen Auftrag ist mechanisch für den Einbau in ein IEC Normgehäuse zu konstruieren, in einem FEM Programm auf möglichst hohe Effizienz zu optimieren, aufzubauen und auf dem Prüfstand der Fachhochschule Wallis auszumessen. Für den Permanent-Magnet-Motor und die Steuerung zur Drehzahlverstellung ist eine möglichst seriennahe Kostenrechnung (Herstellungspreis und Kosten der eingesparten Energie, Amortisationszeit) zu erstellen. Ebenfalls soll die Möglichkeit eines Aufbaus als Integralmotor geprüft werden. Bestätigen sich die erwarteten Resultate, bezüglich Effizienz und Kosten, soll die vorgeschlagene PM-Technik unter Einbezug der Industrie, in weiterführenden Schritten bis zu einer Leistungsgrösse von 22 kW ausgeweitet werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die Aufgaben in aktuellen Auftrag teilen sich die Fachhochschulen Luzern, Wallis und Circle Motor AG. Die bis zum 30. November 2007 geleisteten Arbeit sind folgend durch die Projektmitglieder beschrieben.

Fachhochschule Luzern

Die erste Aufgabe bestand im Auslegen des effizienten 3 kW Motors im *Maxwell 3D*, sowie im zugehörigen Eingabeprogramm *RMxprt* für genutete el. Maschinen: Es zeigte sich bald, dass die IEC Baugrössen 90 und 100 für den angestrebten Motor geeignet sind. Abb 1 ist ein Zusammenzug der zahlreich durchgeführten Berechnungen. Die Berechnungen zeigen gut den Einfluss der Effizienz, wenn verschiedene Maschinenparameter und die IEC Baugrösse variiert wird. Die Wahl für die zu bauende Maschine fiel auf die Baugrösse IEC 100 mit dem Standardblechschnitt 100/4 und einer Eisenpaketlänge von 70mm. Ausschlaggebend war der um 1-2% höhere Wirkungsgrad gegenüber der IEC 90 Grösse. Zudem bleibt im IEC 100 Statorgehäuse bei einer Eisenpaketlänge von 70mm noch freier Platz übrig für die Aufnahme der Antriebselektronik (Realisierung eines 3kW Integral Sparmotors) was bei der Baugrösse IEC 90 aus Platzgründen nicht mehr möglich ist. Da ein 2 poliger 3kW Asynchronmotor ebenfalls die Baugrösse 100 aufweist, besteht der grosse Vorteil IEC 100 Asynchronmotoren durch unsere effizienteren IEC 100 Permanent-Magnet-Motoren in bestehenden Anlagen einfach und schnell, ohne Änderungen an der Mechanik von bestehenden Anlagen, auszutauschen.

Auslegung des effizienten 3kW Permanent-Magnet- Motor im Maxwell. Bauweise IEC.
Erarbeitet durch die FH Luzern

Veränderbare Parameter					Ergebnisse der Berechnung					
Fe-Länge [mm]	Luftspalt [mm]	Mag-Breite [mm]	Wind-Typ	Anz Wdg. pro Nut.	FE-Verl. [W]	Cu-Verl. [W]	Out-Power [W]	Speed [U/min]	Wirkungsgrad [%]	Drehm. [Nm]
Synchronmotor IEC 90 Blechschnitt 6-8Pol, 36 Nuten										
70	1.8	3.2	ganz	24	109	164	3000	2935	91.4	9.8
70	1.7	3.0	ganz	23	115	156	3000	3074	91.5	9.3
70	1.7	2.8	ganz	24	105	168	3000	2970	91.4	9.6
70	1.6	2.6	ganz	24	103	171	3000	2961	91.4	9.7
70	1.2	2.4	ganz	22	119	152	3000	3063	91.4	9.4
70	1.0	2.2	ganz	22	119	154	3000	2968	91.4	9.7
Brushless DC Motor IEC 90 Blechschnitt 6-8Pol, 36 Nuten										
70	0.6	2.5	ganz	18	243	73	3000	2940	90.2	9.7
70	0.8	2.5	ganz	18	236	73	3000	3060	90.4	9.4
70	1.0	2.5	ganz	19	209	120	3000	2967	89.9	9.7
70	1.2	2.5	ganz	19	204	120	3000	3087	90.0	9.3
70	1.4	2.5	ganz	20	184	129	3000	3027	90.3	9.5
70	1.6	2.5	ganz	21	167	137	3000	2970	90.5	9.6
70	1.8	2.5	ganz	22	152	147	3000	2923	90.7	9.8
70	2.0	2.5	ganz	22	148	147	3000	3035	90.8	9.4
Synchronmotor IEC 100 Blechschnitt 4 Pol, 36 Nuten										
70	1.0	2.5	ganz	21	113	143	3000	2995	91.9	9.6
70	1.0	2.5	ganz	21	116	92	3000	3041	93.2	9.4
70	1.2	2.5	ganz	22	106	99	3000	3020	93.3	9.5
70	1.4	2.5	ganz	23	97	106	3000	2997	93.4	9.6
Brushless DC Motor IEC 100 Blechschnitt 4 Pol, 36 Nuten										
70	1.0	2.5	ganz	19	154	79	3000	2972	92.5	9.6
70	1.2	2.5	ganz	20	139	85	3000	2927	92.8	9.8
70	1.4	2.5	ganz	20	136	85	3000	3063	92.9	9.4

Abb 1 zeigt den wesentlichen Zusammenzug der berechneten Maschinendaten.

Folgende Zeilen führen die Daten des effizienten 3 kW Permanent-Magnet-Motors, Baugrösse 100, mit **sinusförmigen Phasenspannungen** auf.

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	3
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	6
Given Rated Speed (rpm):	3000
Frictional Loss (W):	6
Wind Loss (W):	3
Rotor Position:	Inner
Type of Load:	Constant Power
Type of Circuit:	Y3
Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees:	0
Trigger Pulse Width in Elec. Degrees:	120
One-Transistor Voltage Drop (V):	0
One-Diode Voltage Drop (V):	0
Operating Temperature (C):	75
Maximum Current for CCC (A):	0
Minimum Current for CCC (A):	0

STATOR DATA

Number of Stator Slots:	36
Outer Diameter of Stator (mm):	150
Inner Diameter of Stator (mm):	90
Type of Stator Slot:	4
Dimension of Stator Slot	
hs0 (mm):	0.29
hs1 (mm):	0.84
hs2 (mm):	13.68
bs0 (mm):	2.4
bs1 (mm):	4.1
bs2 (mm):	6.35
rs (mm):	1.2
Top Tooth Width (mm):	3.9538
Bottom Tooth Width (mm):	4.09694
Skew Width (Number of Slots)	1
Length of Stator Core (mm):	70
Stacking Factor of Stator Core:	0.95
Type of Steel:	steel_1008
Slot Insulation Thickness (mm):	0

End Length Adjustment (mm):	0
Number of Parallel Branches:	1
Number of Conductors per Slot:	22
Type of Coils:	11
Average Coil Pitch:	5
Number of Wires per Conductor:	3
Wire Diameter (mm):	0.6438
Wire Wrap Thickness (mm):	0.2
Stator Slot Fill Factor (%):	65.7432
Coil Half-Turn Length (mm):	138.788

ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1.2
Inner Diameter (mm):	30
Length of Rotor (mm):	70
Stacking Factor of Iron Core:	0.95
Type of Steel:	steel_1008
Polar Arc Radius (mm):	35.3899
Mechanical Pole Embrace:	0.6666
Electrical Pole Embrace:	0.609581
Max. Thickness of Magnet (mm):	2.5
Width of Magnet (mm):	29.5312
Type of Magnet:	NdFe35
Type of Rotor:	1

PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.29534
Coercive Force (kA/m):	1030.83
Maximum Energy Density (kJ/m^3):	333.819
Relative Recoil Permeability:	1
Demagnetized Flux Density (Tesla):	7.90614e-005
Recoil Residual Flux Density (Tesla):	1.29534
Recoil Coercive Force (kA/m):	1030.83

MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Density (kg/m^3):	8900
Permanent Magnet Density (kg/m^3):	7800
Armature Core Steel Density (kg/m^3):	7650
Rotor Core Steel Density (kg/m^3):	7650
Armature Copper Weight (kg):	0.955387
Permanent Magnet Weight (kg):	0.222383

Armature Core Steel Weight (kg):	4.24598
Rotor Core Steel Weight (kg):	2.36645
Total Net Weight (kg):	7.7902
Armature Core Steel Consumption (kg):	8.98108
Rotor Core Steel Consumption (kg):	2.92766

STEADY STATE PARAMETERS

Stator Winding Factor:	0.965926
D-Axis Reactive Inductance Lad (H):	0.00352236
Q-Axis Reactive Inductance Laq (H):	0.00352236
D-Axis Inductance L1+Lad(H):	0.00477118
Q-Axis Inductance L1+Laq(H):	0.00477118
Armature Leakage Inductance L1 (H):	0.00124882
Zero-Sequence Inductance L0 (H):	0.00124882
Armature Phase Resistance R1 (ohm):	0.814145
D-Axis Time Constant (s):	0.00432645
Q-Axis Time Constant (s):	0.00432645
Ideal Torque Constant KT (Nm/A):	1.12189
Ideal Back-EMF Constant KE (Vs/rad):	1.12189
Start Torque Constant KT (Nm/A):	0.792183
Start Back-EMF Constant KE (Vs/rad):	0.792183

NO-LOAD MAGNETIC DATA

Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.73281
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	0.881188
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.48214
Air-Gap Flux Density (Tesla):	0.810904
Magnet Flux Density (Tesla):	0.815834

Stator-Teeth By-Pass Factor:	0.00568068
Stator-Yoke By-Pass Factor:	6.46377e-006
Rotor-Yoke By-Pass Factor:	8.32819e-006
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	82.3407
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	2.63339
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	0.789465
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	868.424
Magnet Ampere Turns (A.T):	-953.977
Armature Reactive Ampere Turns at Start Operation (A.T):	6395.65
Leakage-Flux Factor:	1
Correction Factor for Magnetic	

Circuit Length of Stator Yoke:	0.864235
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.882498
No-Load Speed (rpm):	3552.38
Cogging Torque (N.m):	8.04933e-012

FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	8.10163
Root-Mean-Square Armature Current (A):	7.20397
Armature Thermal Load (A^2/mm^3):	148.855
Specific Electric Loading (A/mm):	20.1792
Armature Current Density (A/mm^2):	7.37664
Frictional and Wind Loss (W):	8.96859
Iron-Core Loss (W):	104.709
Armature Copper Loss (W):	126.756
Transistor Loss (W):	0
Diode Loss (W):	0
Total Loss (W):	240.433
Output Power (W):	3000.22
Input Power (W):	3240.65
Efficiency (%):	92.5807
Rated Speed (rpm):	2993.71
Rated Torque (N.m):	9.57006
Locked-Rotor Torque (N.m):	194.225
Locked-Rotor Current (A):	245.202

WINDING ARRANGEMENT

The 3-phase, 1-layer winding can be arranged in 12 slots as below:

AAZZBBXXCCYY

Angle per slot (elec. degrees):	30
Phase-A axis (elec. degrees):	105
First slot center (elec. degrees):	0

TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:

Number of Turns:	132
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.814145
End Leakage Inductance (H):	0.000282484

2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	70
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Equivalent Br (Tesla):	1.29534
Equivalent Hc (kA/m):	1030.83
Estimated Rotor Moment of Inertia (kg m^2):	0.00315652

Folgende Zeilen führen die Daten des effizienten 3 kW Permanent Magnet Motors, Baugrösse 100, mit **trapezförmigen Phasenspannungen** auf.

GENERAL DATA	
Rated Output Power (kW):	3
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	6
Given Rated Speed (rpm):	3000
Frictional Loss (W):	6
Wind Loss (W):	3
Rotor Position:	Inner
Type of Load:	Constant Power
Type of Circuit:	Y3
Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees:	0
Trigger Pulse Width in Elec. Degrees:	120
One-Transistor Voltage Drop (V):	0
One-Diode Voltage Drop (V):	0
Operating Temperature (C):	75
Maximum Current for CCC (A):	0
Minimum Current for CCC (A):	0
STATOR DATA	
Number of Stator Slots:	36
Outer Diameter of Stator (mm):	150
Inner Diameter of Stator (mm):	90
Type of Stator Slot:	4
Dimension of Stator Slot	
hs0 (mm):	0.29
hs1 (mm):	0.84
hs2 (mm):	13.68
bs0 (mm):	2.4
bs1 (mm):	4.1

bs2 (mm):	6.35
rs (mm):	1.2
Top Tooth Width (mm):	3.9538
Bottom Tooth Width (mm):	4.09694
Skew Width (Number of Slots)	1
Length of Stator Core (mm):	70
Stacking Factor of Stator Core:	0.95
Type of Steel:	steel_1008
Slot Insulation Thickness (mm):	0
End Length Adjustment (mm):	0
Number of Parallel Branches:	1
Number of Conductors per Slot:	20
Type of Coils:	11
Average Coil Pitch:	5
Number of Wires per Conductor:	3
Wire Diameter (mm):	0.6438
Wire Wrap Thickness (mm):	0.2
Stator Slot Fill Factor (%):	59.7665
Coil Half-Turn Length (mm):	138.788

ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1.2
Inner Diameter (mm):	30
Length of Rotor (mm):	70
Stacking Factor of Iron Core:	0.95
Type of Steel:	steel_1008
Polar Arc Radius (mm):	43.8
Mechanical Pole Embrace:	0.9
Electrical Pole Embrace:	0.893889
Max. Thickness of Magnet (mm):	2.5
Width of Magnet (mm):	39.7696
Type of Magnet:	NdFe35
Type of Rotor:	1

PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.29534
Coercive Force (kA/m):	1030.83
Maximum Energy Density (kJ/m^3):	333.819
Relative Recoil Permeability:	1
Demagnetized Flux Density (Tesla):	7.90614e-005
Recoil Residual Flux Density (Tesla):	1.29534

Recoil Coercive Force (kA/m):	1030.83

MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Density (kg/m^3):	8900
Permanent Magnet Density (kg/m^3):	7800
Armature Core Steel Density (kg/m^3):	7650
Rotor Core Steel Density (kg/m^3):	7650
Armature Copper Weight (kg):	0.868534
Permanent Magnet Weight (kg):	0.328439
Armature Core Steel Weight (kg):	4.24598
Rotor Core Steel Weight (kg):	2.36645
Total Net Weight (kg):	7.8094
Armature Core Steel Consumption (kg):	8.98108
Rotor Core Steel Consumption (kg):	2.92766

STEADY STATE PARAMETERS

Stator Winding Factor:	0.965926
D-Axis Reactive Inductance Lad (H):	0.00291104
Q-Axis Reactive Inductance Laq (H):	0.00291104
D-Axis Inductance L1+Lad(H):	0.00394313
Q-Axis Inductance L1+Laq(H):	0.00394313
Armature Leakage Inductance L1 (H):	0.00103208
Zero-Sequence Inductance L0 (H):	0.00103208
Armature Phase Resistance R1 (ohm):	0.740132
D-Axis Time Constant (s):	0.00393314
Q-Axis Time Constant (s):	0.00393314
Ideal Torque Constant KT (Nm/A):	1.17578
Ideal Back-EMF Constant KE (Vs/rad):	1.17578
Start Torque Constant KT (Nm/A):	0.788917
Start Back-EMF Constant KE (Vs/rad):	0.788917

NO-LOAD MAGNETIC DATA

Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.66292
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	1.24005
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.678493
Air-Gap Flux Density (Tesla):	0.778197
Magnet Flux Density (Tesla):	0.852519
Stator-Teeth By-Pass Factor:	0.0031205
Stator-Yoke By-Pass Factor:	7.71245e-006
Rotor-Yoke By-Pass Factor:	7.01179e-006
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	43.4068

Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	3.10162
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	0.885741
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	833.397
Magnet Ampere Turns (A.T):	-880.994
Armature Reactive Ampere Turns at Start Operation (A.T):	6113.97
Leakage-Flux Factor:	1
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.606614
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.835639
No-Load Speed (rpm):	3340.39
Cogging Torque (N.m):	1.35882e-012

FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A):	8.13795
Root-Mean-Square Armature Current (A):	6.99124
Armature Thermal Load (A^2/mm^3):	127.449
Specific Electric Loading (A/mm):	17.8031
Armature Current Density (A/mm^2):	7.15882
Frictional and Wind Loss (W):	8.54063
Iron-Core Loss (W):	138.105
Armature Copper Loss (W):	108.527
Transistor Loss (W):	0
Diode Loss (W):	0
Total Loss (W):	255.173
Output Power (W):	3000.01
Input Power (W):	3255.18
Efficiency (%):	92.161
Rated Speed (rpm):	2906.39
Rated Torque (N.m):	9.85688
Locked-Rotor Torque (N.m):	212.769
Locked-Rotor Current (A):	269.722

WINDING ARRANGEMENT

The 3-phase, 1-layer winding can be arranged in 12 slots as below:

AAZZBBXXCCYY

Angle per slot (elec. degrees):	30
Phase-A axis (elec. degrees):	105
First slot center (elec. degrees):	0

TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:	
Number of Turns:	120
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.740132
End Leakage Inductance (H):	0.000233457
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	70
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Equivalent Br (Tesla):	1.29534
Equivalent Hc (kA/m):	1030.83
Estimated Rotor Moment of Inertia (kg m^2):	0.00315652

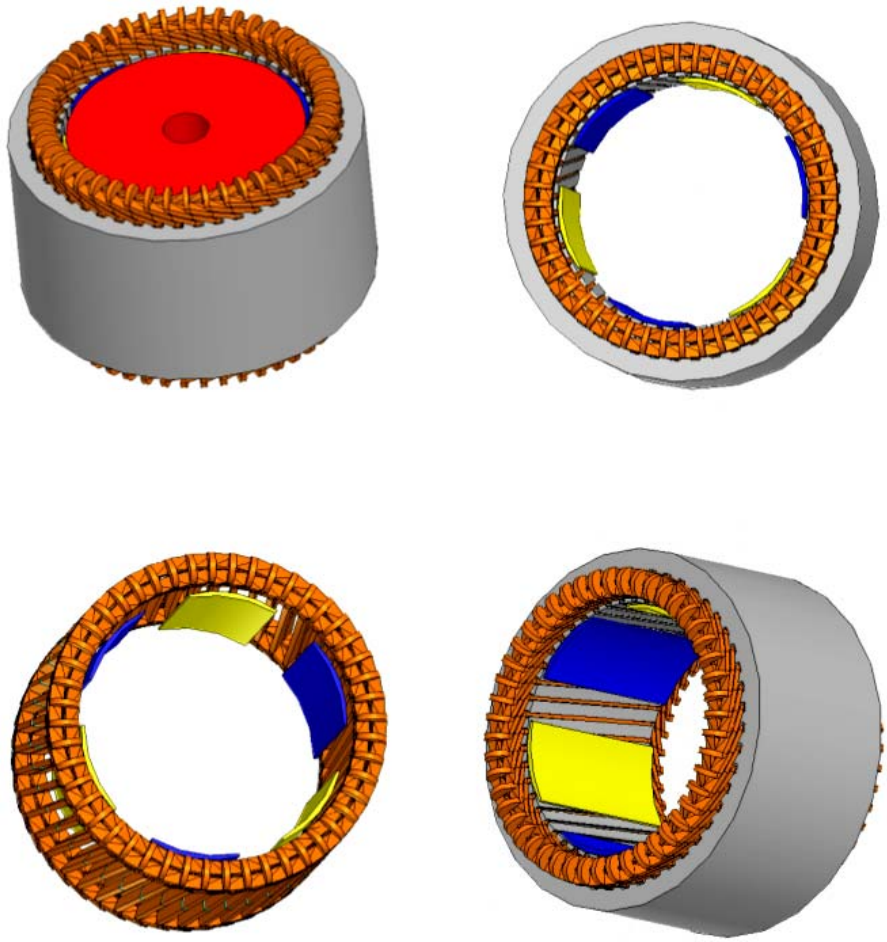


Abb 2 zeigt die Komponenten eines Permanent-Magnet-Motors gezeichnet durch *Maxwell 3D*

Fachhochschule Wallis

Die Aufgabe der Fachhochschule Wallis besteht im Konzeptentwurf, in der Auslegung und im Bau einer effizienten Antriebselektronik zum 3kW Permanent Magnet Motor.

Wahl des Konzepts

Ein Projektziel liegt im Ersatz eines 3kW ASM-Antriebs mit Frequenzumrichter durch einen Permanentmagnet-Maschinen-Antrieb mit einer Antriebselektronik zu Drehzahlverstellung zu gleichen Kosten.

Meistens werden bei ASM- oder PM-Antrieben unter 3kW Leistung einphasige Gleichrichter mit Power Factor Corrector (PFC) und PWM-Wechselrichter auf der Maschinenseite verwendet. Mit dem PFC wird eine Zwischenkreisspannung erzeugt, die höher liegt als der Spitzenwert der Wechselspannung. Die Maschinensteuerung erfolgt durch einen pulsbreitenmodulierten Wechselrichter (PWM), der unterhalb der Nenndrehzahl als Abwärtssteller arbeitet. Im einphasigen Betrieb kann der Aufbau mit 600V Transistoren erfolgen.

Im Rahmen des Projekts soll ein 3kW PM-Antrieb realisiert werden, mit dreiphasiger Speisung. Im Vergleich zu den üblichen Schaltungstopologien wurde eine Struktur mit dreiphasigem Gleichrichter, Abwärtsteller und dreiphasigem Wechselrichter gewählt (Abb 3), und dies aus folgenden Überlegungen:

a) Mit dem Abwärtssteller wird die PM-Maschine stromgesteuert: Die Regelung des Abwärtsstellerstromes bestimmt direkt das Maschinenmoment. Die Maschinenspannung ergibt sich aus der Drehzahl und der Belastung. In diesem Aufbau ist eine einfache Maschinenregelung ohne Positionsgeber möglich. Ein einziger kostengünstiger 1200V Transistor mit rekuperierendem Enlastungsnetzwerk erlaubt die Stromsteuerung bei hoher Schaltfrequenz (Soft Switching) und gutem Wirkungsgrad: Er erzeugt rechteckförmige Netzstromblöcke, deren Gehalt an Harmonischen im interessierenden Leistungsbereich den Normen entspricht.

b) Der maschinenseitige Wechselrichter (Abb3, Q1 – Q6) kann mit 600V Transistoren realisiert werden.

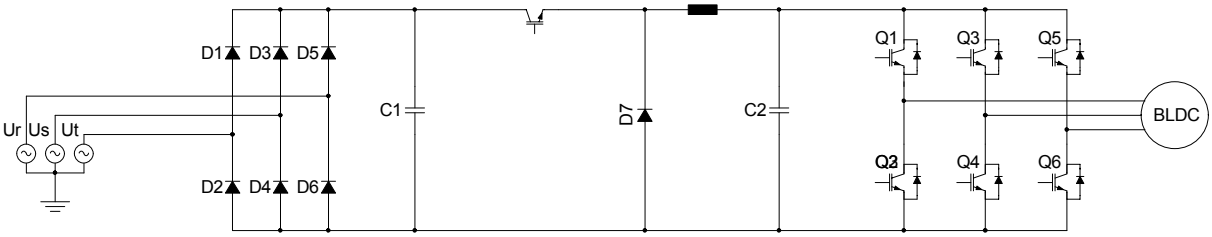


Abb 3: Gewählte Schaltungstopologie

Insbesondere werden die Schalter bei der brushless DC Maschine (trapezförmige Phasenspannungen an der Wicklung) nicht mehr pulsbreitenmoduliert: Die Stromblöcke werden im Grundschwingungsverfahren umgeschaltet.

Dadurch können kostengünstige Schalter mit wenig Durchlassspannung und höheren Schaltverlusten (hier ohne Nachteil) verwendet werden (z.B. IGBT mit UCE = 1.1V statt 2.1V).

In diesem Betriebsfall entstehen nur geringe Leitverluste und der maschinenseitige Wechselrichter erreicht einen hohen Wirkungsgrad (> 98%).

Durch die tiefere Spannung und die langsameren Spannungsflanken wird auch die Wicklungsisolation der Maschine weniger beansprucht.

c) Mit der Stromsteuerung der PM-Maschine werden einfachere Regelstrategien möglich, ohne Messung der Rotorposition. Ein Überstrom der Maschine ist ausgeschlossen. Die Drehzahlregelung kann wie bei einer Gleichstrommaschine als Kaskadenregelung aufgebaut werden, mit dem inneren Strom-

regelkreis und dem überlagerten Drehzahlregler. Diese Algorithmen können in kostengünstigen Prozessoren implementiert werden. Sehr einfach wird die Regelung mit einer BLDC Maschine.

d) Der Aufwand an teuren Strommessgliedern wird verringert: Eine einzige Strommessung genügt. Die Spannungsmessungen erfolgen mit Differenzverstärkern. Auch dadurch wird ein kostengünstiger Aufbau ermöglicht.

Für höhere Leistungen werden 2 zusätzliche Schalter benötigt, um die Norm der Netzstromharmonischen zu erfüllen.

Auslegung, Bau und Messungen

An der HES_SO Wallis wurde eine erste gedruckte Schaltung realisiert um die Eingangsstufe mit dem Abwärtssteller zu testen

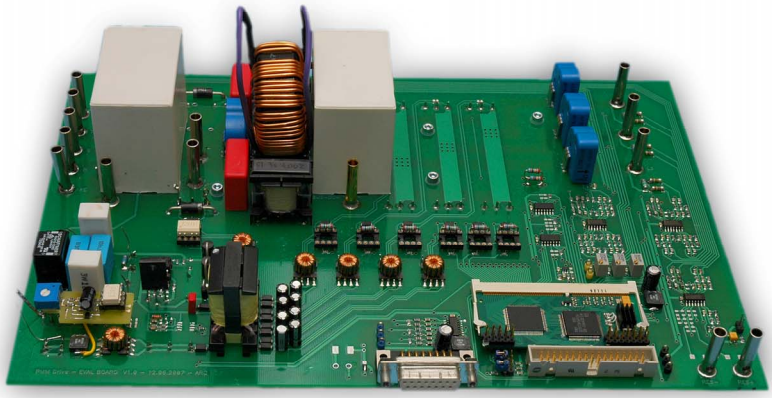


Abb 4, Aufbau des Prototyps der Antriebselektronik

Mit den viel versprechenden Resultaten dieser Messungen wurde eine zweite gedruckte Schaltung realisiert (Abb 4). Dieser Aufbau umfasst den dreiphasigen Diodengleichrichter für die Netzspannung, die Abwärtsstellerschaltung, den dreiphasigen Ausgangswechselrichter und den DSP zur Regelung des Systems. Die Abb 4 zeigt diese realisierte gedruckte Schaltung für die Weiterführung des Projekts. Es wurden im Vergleich zur gewünschten Endversion des Aufbaus mehrere zusätzliche Messglieder eingeführt (Ströme – Spannungen – Winkelgeber). Zusätzliche Steckverbindungen werden den einfachen Test verschiedener Regelstrategien ermöglichen.

Der Test der Eingangsstufe erfolgte mit ohmscher Belastung. Die Ausgangsspannung des Abwärtsstellers wurde nach der Methode der Kaskadenregelung realisiert, mit dem inneren Stromregelkreis und dem überlagerten Spannungsregelkreis.

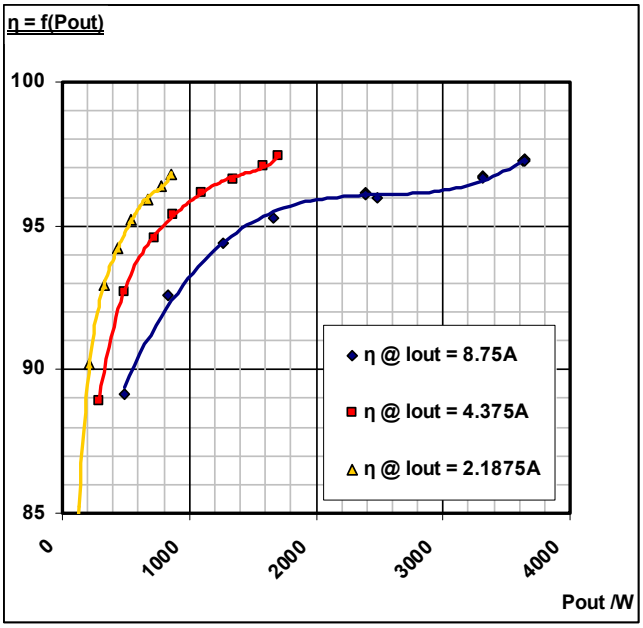
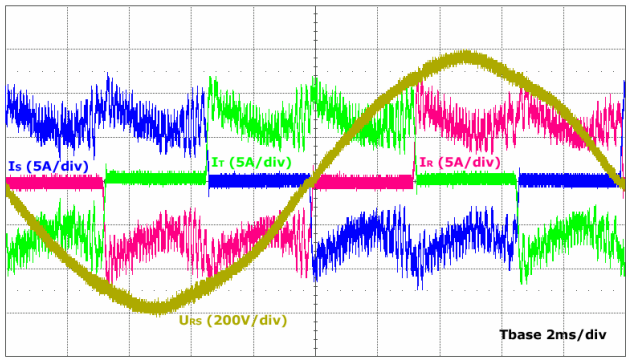


Abb 5: Wirkungsgrad η des Diodengleichrichters mit Abwärtssteller

Die wichtigste Messung für die Weiterführung des Projekts beinhaltet den Wirkungsgrad der Eingangsstufe (passiver Gleichrichter mit Abwärtssteller), da dieser Punkt die gewählte Topologie bestätigen soll. **Die bisherigen Messungen überschreiten den Wert von 97%.** Die Abb 5 zeigt die Wirkungsgradmessungen mit der realisierten gedruckten Schaltung. Schon bei diesem Aufbau folgt bei Nennspannung und Nenndrehzahl einer PM-Maschine im Teillastbereich ein Konverterwirkungsgrad höher als 96%.

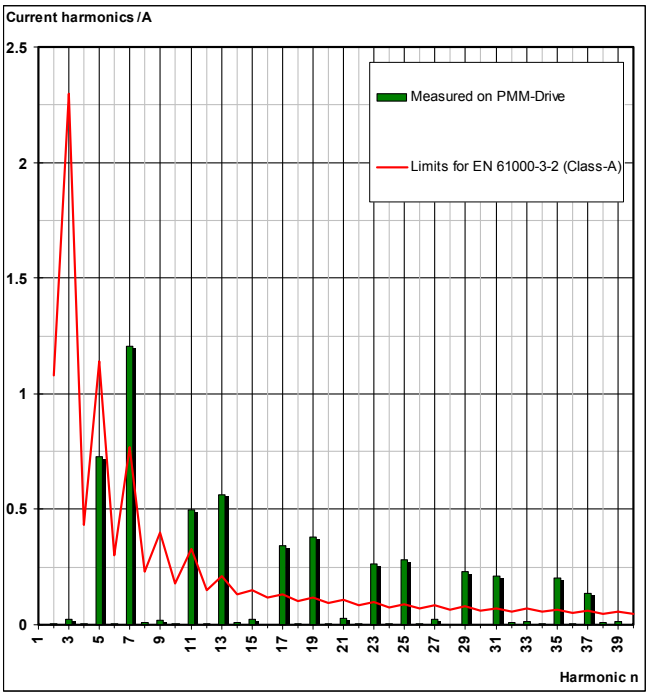
Mit einer BLDC Maschine ermöglicht die gewählte Schaltungstopologie eine variable Maschinenspannung und die Grundschwingungstaktung bei der Umschaltung der Stromblöcke. Die Verluste der Schalter des Ausgangswechselrichters beschränken sich damit auf die Leitverluste, die auf ca. 28W (2x1.7Vx8.3A) geschätzt werden. Dadurch wird der Wirkungsgrad des Konverters bei 3kW um ca. 1% verringert.



Die Abb 6 zeigt die Netzströme bei 3.75kW Eingangsleistung (ca. 3kW Wellenleistung).

Die hochfrequente Stromwelligkeit wird noch nicht genügend gedämpft, da die Messung ohne Eingangsfilter erfolgte.

Der Netzstromverlauf zeigt noch keinen konstanten Verlauf, vielmehr erkennt man beim Einschalten der Blöcke eine Stromspitze. Diese rührt daher, dass der Stromregler noch nicht optimiert wurde, um die Norm EN61000-3-2 zu erfüllen.



Die Abb 7 zeigt die Harmonischen des Stromes bei der Eingangsleistung von 3.75kW.

Die Harmonischen 7-9-11-13-15-17-19-23-25-29-31-35-37 überschreiten die Norm. Sie entstehen durch die Modulation des Stromes mit den 300Hz der gleichgerichteten Spannung.

Die Elektronik, der DSP – Programm - Code, sowie die PM- Maschine montiert auf dem Prüfstand stehen bereit. Mit der Strom-Regelung des Abwärts-Wandlers ist es bereits möglich, den Strom in der Maschine zu beherrschen. Ein Geschwindigkeits – kaskadierter - Regler ist implementiert. Die ersten Test's auf dem Prüfstand mit 1 kW an der Motorenwelle sind erfolgt. Die Bestimmung des Wirkungsgrads der gesamten Elektronik zeigte 94%. Zum Wirkungsgrad des Motors sind noch keine Messungen realisiert worden.

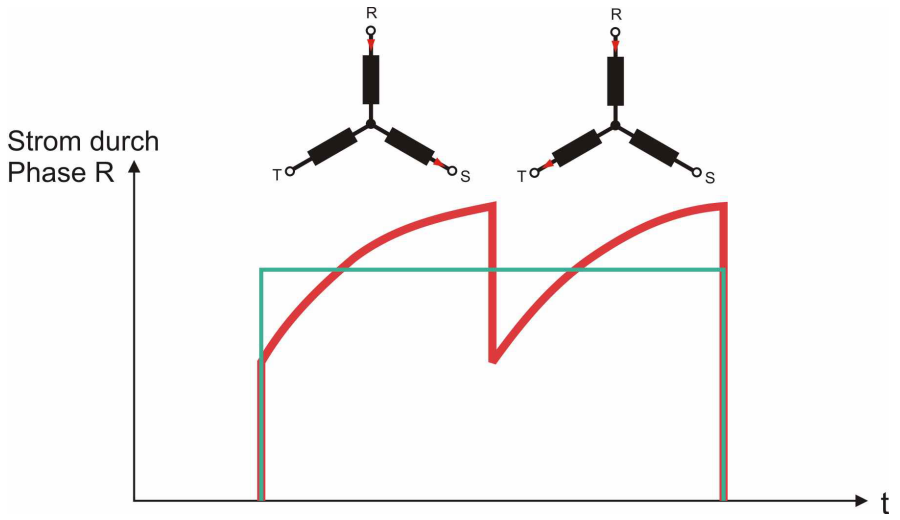


Abb 8 zeigt den Verlauf des gemessenen Stroms in einer Phase des Motors

Beim gewählten 6 pulsigen brushless Steuerverfahren fliesst der Strom jeweils nur in zwei Phasen, die dritte Phase bleibt unbestromt. Der gemessene Verlauf des Phasenstroms bricht in der Mitte des Blocks (Abb 8) einen und steigt gemäss einer e-Funktion wieder an. Dieser Stromeinbruch erzeugt die Umschaltung (Kommutierung), in unserem Beispiel von Phase S nach Phase T. Der induktive Widerstand der Phase T verzögert den Stromanstieg. Die Regelung des Abwärtsstellers kann, durch einen Spannungshub, den roten Verlauf nicht einem vollständig rechteckigen Verlauf des Stromes angleichen (grüne Linie). Dies begründet sich im induktiven Widerstand der Nutstreuung, die nicht beliebig verkleinert werden kann. Der rechteckige Stromverlauf wäre aber deshalb vorteilhaft, weil weniger Stromwärme in der Wicklung erzeugt wird und nur beim rechteckigen Verlauf, der Abwärtssteller das Netz so belastet, dass die EMV Normen erfüllt sind.

Nach dem Studium der Fachliteratur fanden wir sehr interessante Anregungen, die zudem auch Vorteile bezüglich der Effizienz zeigen. Vorgeschlagen wird an Stelle der 6 pulsigen Steuerverfahren auf 12 Pulse zu erhöhen. [3].

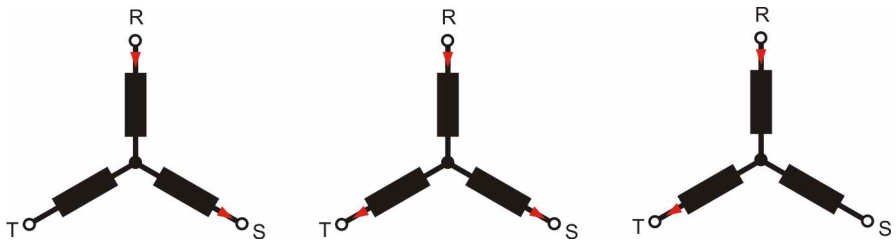


Abb 9: zeigt ein Ausschnitt aus einem 12 pulsigen Steuerverfahren

Im mittleren Bild (Abb 9) ist ein weiterer Puls dazwischen gefügt. Die Phasen S und T sind an Minuspotential der Steuerung geschaltet um bereits in der Phase T einen Strom aufzubauen. Damit bricht der Strom nicht mehr ein (Abb 8). Die Effizienz erhöht sich durch weniger Stromwärme in der Wicklung und die Geräusche der Kommutierung sind reduziert.

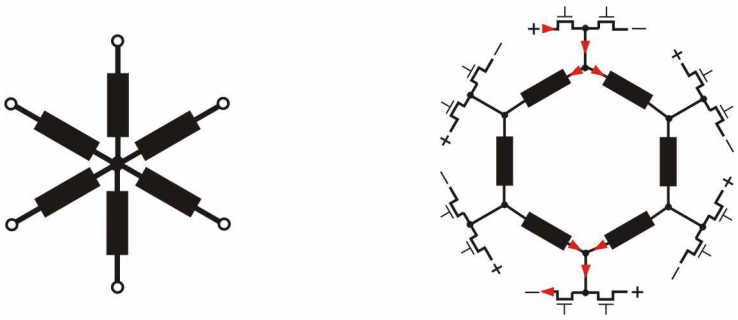


Abb 10: zeigt die Möglichkeit von Wicklungen mit mehr als 3 Phasen

Ein weiterer Ansatz besteht in der Realisierung von Wicklungen mit mehr als 3 Phasen. Die grössere Anzahl der Kommutierungen bei kleinerem Strom zeigt weniger Schwankungen im Drehmoment, verringern die Geräusche und erhöhen den Wirkungsgrad. Erste Berechnungen im FEMAG, einem Programm für die Auslegung von el. Maschinen entwickelt an der ETHZ, zeigen die angesprochenen Vorteile, wenn von einem 3 Phasen-System zu 6 Phasen gewechselt wird.

Die Wicklung in Abb 10 links zeigt Vorteile in der Fertigung, wenn eine 3 Phasen Wicklung nur noch wenige Leiter pro Nut aufweisen würde. Bei wechseln zur 6 Phasen Wicklung sinkt der Strom pro Phase und die Leiterzahl pro Nut steigt an. Die Herstellung der Wicklung, die Montage der Anschlüsse ans Klemmenbrett werden somit einfacher. Diese Vorteile zeichnen sich besonders dann aus, wenn noch leistungsstärkere IEC Permanent-Magnet-Motoren für den Einsatz in der Industrie entwickelt werden. Oder wenn von einer Speisung von 3x400V auf eine Batteriespannung von 24 / 36 / 48 Volt gewechselt wird. Diese effizienten, leistungsstarken Permanent-Magnet-Motoren, gebaut für Niederspannung, mit einer 6 oder sogar 12 Phasen Wicklung wären für den Einsatz in Elektrofahrzeugen bestens geeignet!

Abb 8 rechts zeigt eine Sechseckschaltung der Wicklung. Jedes Eck ist über zwei Leistungshalbleiter an den Ausgang des Abwärtsstellers (Abb 3) geschaltet. Mit diesem Vorschlag entstehen in einfacher Weise berührungsfreie elektronische Bürsten für einen Permanent-Magnet-erregten Gleichstrommotor. Mit dem IEC 100/4 Blechschnitt, wie beim gebauten Motor verwendet, liesse sich sogar eine Zwölfeckschaltung einer Wicklung bauen, was das Stromproblem in Abb 8 elegant lösen würde.

Die Überlegungen der Seiten 16 und 17, betreffen das Ansteuerverfahren des maschinenseitigen Wechselrichters (Abb 3 Q1 – Q6, und erweitert mit Q7-Q12 Abb 9/10) auf die beste Effizienz und könnten sinnvoller Weise in einem möglichen weiteren Auftrag verfolgt werden.

CIRCLE MOTOR AG

Circle Motor AG führt die Projektleitung und fertigte den Permanent Magnet Motor.

Berechnet wurden die effizienten Permanent Magnet Motoren für sinus- und trapezförmige Phasenspannungen.

Permanent Magnet Motoren mit sinusförmigen Phasenspannungen (Synchronmotor) haben den Vorteil von kleineren Eisenverlusten und geringeren Geräuschen. Nachteilig sind die grösseren Verluste in der Antriebselektronik durch hohe Taktfrequenzen > 16 kHz, was zu hoher Rechnerleistung und zu teureren Prozessoren führt. Zudem sind Strom- und Spannungssensoren in der Elektronik nötig, die aber vom Aufwand etwa gleich zu bewerten sind, wie die Hallsensoren und deren Montage bei Motor mit trapezförmigen Spannungen.

Permanent Magnet Motoren mit trapezförmigen Phasenspannungen (brushless DC Motor) haben den Vorteil von geringeren Schaltverlusten in der Antriebselektronik. Bei Vollblockbetrieb und Nennlast beträgt die Taktfrequenz bei unserem PM Motor nur 900 Hz. Hier liegt die grösste Effizienz aller mir bekannten Antriebssteuerungen vor. Zudem ist das Steuerungsverfahren recht einfach, was den Einsatz von günstigeren Prozessoren erlaubt. Nachteilig sind die höheren Eisenverluste, Mehraufwand an Magnetmaterial und etwas höheren Geräusche als beim Synchronmotor.

Da bei etwa gleicher Effizienz der brushless DC Motor einfacher zu steuern ist und damit auch geringere Kosten in der Serie verspricht, wurde der effiziente IEC Permanent-Magnet-Motor als brushless DC Motor gebaut.

Folgend einige Fotos aus der Herstellung des Motors

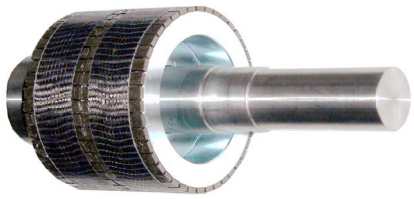


Abb 11: Rotor mit den Permanent-Magneten, die mit Kohlefasern bandagiert sind.

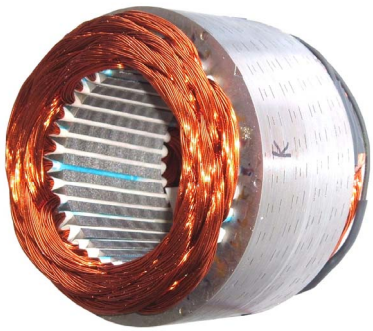


Abb 12: gewickelter Stator

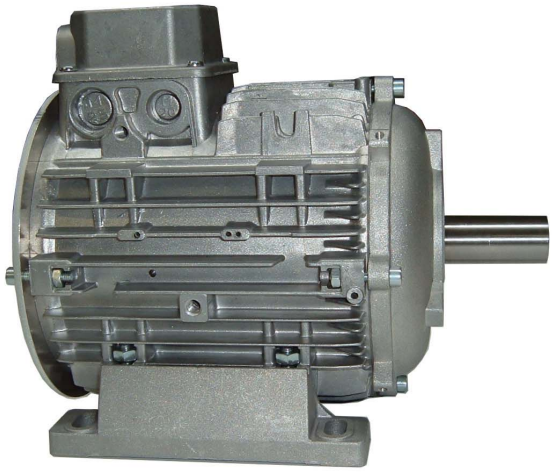


Abb 13: gefertigter 3 kW Permanent-Magnet Motor in der Baugrösse IEC 100

Der gewickelte Stator benötigt im Statorleergehäuse nicht den vollständigen Platz. Eine durchgehende Welle von A zu B Lagerflansch, wie bei einer konventionellen Motorenbauweise üblich, würde zu einer recht schweren Welle führen. Ebenfalls haben solche langen Wellen die Neigung zum Schwingen. Aus diesem Grund entstand das Konzept direkt im Statorleergehäuse das B Lager aufzunehmen und die Welle kürzer zu gestalten. Das B Ende des Statorleergehäuses ist mit einem einfachen Deckel verschlossen. Zwischen dem Deckel und der Aufnahme des B Lagers im Statorleergehäuse (Abb14) könnte in einem zukünftigen Entwicklungsauftrag die Antriebselektronik aufgenommen werden. Damit würde ein effizienter 3 kW IEC 100 Permanent Magnet Motor in der Ausführung als Integral Sparmotor möglich werden (Abb15). Der Deckel beim B Ende des Statorleergehäuse müsste in einer zukünftigen Serie als Gussteil mit entsprechenden Kühlrippen so ausgeführt sein, dass der Integral – Sparmotor genügend gekühlt wird.

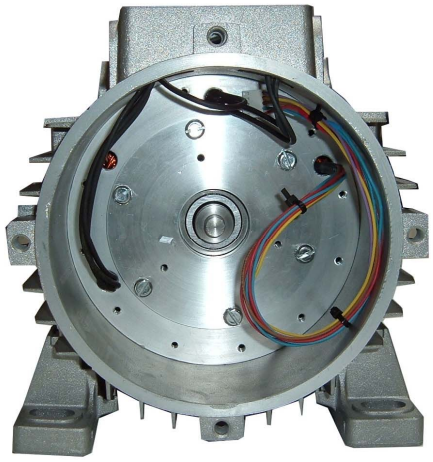


Abb 14 zeigt den noch freien Platz im Statorleergehäuse

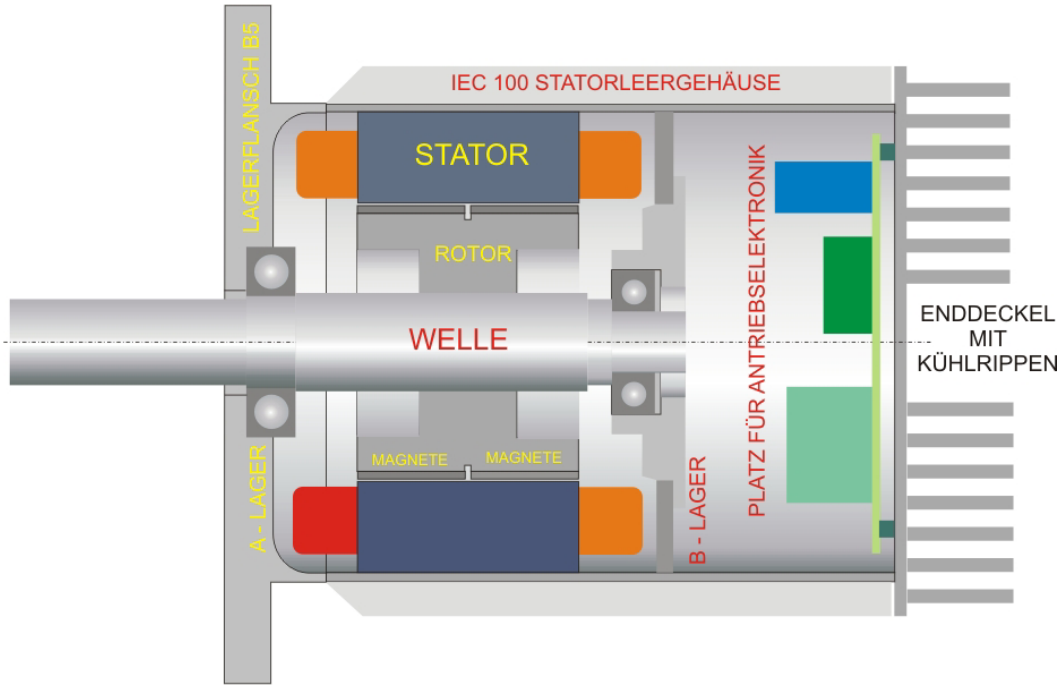


Abb 15 zeigt, wie ein 3 kW Integral-Sparmotor in PM Technik zu bauen wäre.

Gewicht

Effiziente Permanent-Magnet-Motoren sind leichter als Asynchronmotoren mit gleicher Wellenleistung und gleicher Drehzahl. In der Tabelle 16 sind die Gewichte pro Komponente des Permanent-Magnet-Motors aufgeführt, sowie das Gesamtgewicht mit Asynchronmotoren verglichen. Für eine spätere Kostenrechnung, sowie zur Bestimmung einer Ökobilanz, grauer Energie zeigt die Tabelle auch die Zusammenstellung der Rohstoffe und deren Gewicht für den Permanent-Magnet-Motor.

Gewichtstabelle des 3kW PM Motors (ohne Elektronik)	
nach Komponenten	Gewicht in kg
Statoreisen	4.3
Kupfer der Wicklung	1.7
NdFeB Magnete	0.295
Rotor (Fe) ohne Magnete	1.9
Welle ohne Lager	1.17
Kugellager A	0.21
Kugellager B	0.11
Statorleergehäuse inkl. Klemmenkasten, Flansch mitte, Enddeckel, ohne A-Flansch, alle Teile aus ALU	3.1
Alu A-Flansch inkl Sinterstahl-Buchse	0.82
Gesamtgewicht PM Motor	**13.605**

nach Rohstoffen	Gewicht in kg
FE	7.69
Cu	1.7
ALU	3.92
NdFeB	0.295

im Vergleich zu namhaften Herstellern von 2 poligen 3 kW Asynchronmotoren	
Hersteller und Wirkungsgrad in %	Gewicht in kg
Hersteller 1: EFF1 87.5%	25
Hersteller 1: EFF2 86%	21
Hersteller 2: EFF3 78.6%	27
Hersteller 3: EFF3 82 %	20.5

Tabelle 16 zeigt einen Vergleich der Gewichte

Beim effizienten 3kW Permanent – Magnet - Motor in der IEC Bauart 100, wird ein Wirkungsgrad von etwa 91 bis 92 % erwartet. Zu beachten ist, dass ein EFF1 Asynchronmotor diesen Wirkungsgrad erst bei der IEC Baugrösse 160 erreicht. Sein Gewicht liegt dann bei 70 -80 kg. (Asynchronmotor 2 polig, beide Motoren ohne Elektronik)

Erste Messungen

Die Fachhochschule Wallis und Circle Motor AG führten mit dem gebauten BLDC Motor bereits Messungen auf dem Prüfstand durch.

Der Kupferwiderstand Phase zu Phase beträgt 0.8 Ohm und die Induktivität Phase zu Phase 6mH. Diese Parameter stimmen recht genau mit den *Maxwell- B*erechnungen überein.

Die Welle des Permanent-Magnet-Motors weist einen leichten Gang, ohne magnetisches Rastmoment auf.

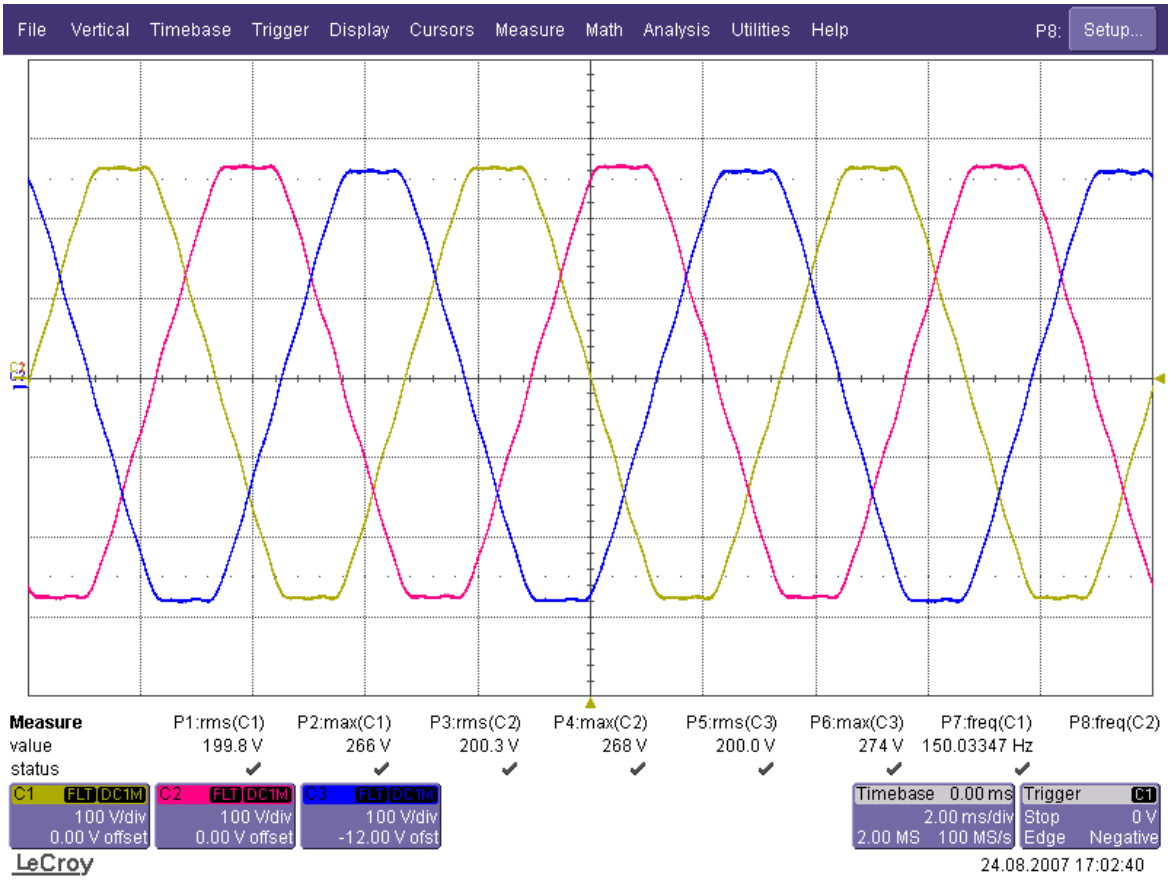


Abb 17 zeigt den Spannungsverlauf der verketteten Wicklungsspannung des Permanent-Magnet-Motors.

Die Trapezform ist sehr schön erkennbar. Das Steuerungsverfahren von brushless DC Motoren zeichnet sich dadurch aus, dass die Motorenwicklung, welche momentan den grössten Spannungswert aufweist, über die 6 Leistungstransistoren mit der Zwischenkreisspannung der Antriebselektronik verbunden wird. Bei einer trapezförmigen Wicklungsspannung liegt also immer der obere gerade Teil der Wicklungsspannung am Zwischenkreis. Die Motorenwicklung erhält somit aus Sicht des Zwischenkreises einen reinen Gleichspannung Verlauf. Deshalb heisst dieses Steuerungsverfahren „brushless DC“. Die Motorencharakteristik entspricht demjenigen der bürstenbehafteten Gleichstrommaschine, jedoch ohne Bürsten, die mit Elektronik ersetzt sind. Das brushless DC Verfahren ist deshalb effizient, weil eine Gleichspannung geschaltet werden muss. Bei Vollblockbetrieb erfolgt nur ein Schaltzyklus alle 60°. Bei unserem Permanent-Magnet-Motor ist die Schaltfrequenz nur 900Hz bei 3000 U/min.

Der effiziente Permanent-Magnet-Motor ist nach dem *Maxwell* Berechnungen gebaut worden. Einige Effizienz bezogenen Vorteile flossen bei Bau des Motor ein. Die *Maxwell*berechnungen basieren auf einer Blechqualität von M400-50A. Da beim Hersteller M330-50A Statorblech lagerhaltig war, wurde dieses verlustarme Blech eingekauft. *Maxwell* schreibt 20 Windungen pro Nut vor, gewickelt mit 3 parallelen Leitern mit einem Durchmesser von je 0.64mm. Die Nuten konnten mit 20 Windungen gefüllte werden, mit 4 parallelen Leitern mit einem Cu Durchmesser von je 0.71mm.

Überrascht hat das Ergebnis des Spannungswerts der Wicklung. *Maxwell* rechnete mit einer verketteten Spannung von 400V, gemessen wurde ein Amplitudenwert von 270V. Die zu tiefe Wicklungsspannung öffnet uns aber die Möglichkeit den Wirkungsgrad des Motors auch bei 3600 U/min zu bestim-

men. Es ist eine weltweite Normung der Effizienzklassen für Elektromotoren in Vorbereitung, sodass die höhere Drehzahl von 3600U/min vorteilhaft sein kann, wenn sich eine höhere Effizienz bei den Messungen zeigt. Die Antriebssteuerung ist bezüglich der Motorenspannung flexibel, solange die 400V Grenze nicht überschritten wird.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Bis zum 30.11.07 sind die Ziele der Berechnung, des Baus eines effizienten Permanent-Magnet-Motors, die Herstellung einer effizienten Antriebssteuerung und der Inbetriebnahme auf dem Prüfstand bei der Hochschule Wallis erreicht worden.

Die ersten Messresultate, auch unter Berücksichtigung der zu tiefen Wicklungsspannung zeigen, dass ein Wirkungsgrad beim Permanent-Magnet-Motor im Bereich 90 – 92% und bei der Antriebssteuerung von 95% zu erwarten ist.

Weiterführung des Projekts

HTA: Die offenen Fragen der zu tiefen Wicklungsspannung und Differenzen bei Kupferwiderstand der Wicklung an den *Maxwell*-Hersteller einreichen.

HEV: Optimierung der Hardware des Abwärtsstellers zur Erhöhung des Wirkungsgrads.

Funktionsüberprüfung des maschinenseitigen Wechselrichters und Test der brushless DC-Maschine mit Blockkommutierung.

Studie und Test einer verbesserten Steuerstrategie des Abwärtsstellers zur Erfüllung der Norm EN-61000-3-2 (Klasse A).

Circle Motor AG:

Gemeinsam mit HEV's messen der Effizienz des Permanent-Magnet-Motors mit der Antriebssteuerung.

Stufenweise vergrössern der Drehzahl auf 3600 U/min und bestimmen der Effizienz. Die Motorenspannung liegt dann bei 325V. Auf den Bau eines zweiten Motors mit 400 Volt Wicklung wird deshalb verzichtet.

Prüfen der Wirtschaftlichkeit und des Energiesparpotentials.

Ausblick

Der Auftrag des effizienten IEC Permanent-Magnet- Motors lieferte bereits die Erkenntnis, dass es sinnvoll wäre, das Ansteuerverfahren des maschinenseitigen Wechselrichters (Abb 3 Q1 – Q6, und erweitert mit Q7-Q12 Abb 9/10) auf die beste Effizienz, in einem möglichen weiteren Auftrag, zu untersuchen.

Referenzen

[1] ***Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren***. Studie des Bundesamts für Energie. Durchgeführt von Circle Motor AG, Fachhochschulen Luzern und Wallis. www.electricity-research.ch

[2] ***Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich kleiner 1kW.*** Auftrag des Bundesamts für Energie. Durchgeführt von Circle Motor AG. www.electricity-research.ch

[3] **Electronically commutated motors for fan applications.** Andràs Lelkes, emb-Werke GmbH & Co. KG, D-74671 Mulfingen.

Alle Bilder, Tabellen, Diagramme und Fotos erstellt durch die Projektmitglieder.