

## Contents

Literature	0/3
List of symbols	0/4
<b>1. Permanent magnet synchronous machines as “brushless DC drives”</b>	<b>1/1</b>
1.1 Basic principles of brushless DC drives	1/1
1.1.1 Basic function of PM synchronous machine	1/2
1.1.2 Permanent magnet technology	1/5
1.1.3 Torque generation in PM machines with block and sine wave current operation	1/11
1.1.4 Induced no-load voltage (“back EMF”) in PM machines	1/14
1.1.5 Equivalent circuit of PM synchronous machines	1/20
1.1.6 Stator current generation	1/22
1.1.7 Operating limits of brushless DC drives	1/24
1.1.8 Torque ripple of brushless DC motors	1/28
1.1.9 Significance of torque ripple for motor and drive performance	1/33
1.2 Brushless DC drive systems	1/35
1.2.1 Block commutated drives	1/35
1.2.2 Sine wave commutated drives	1/36
1.3 High speed PM machines	1/38
1.3.1 How to increase power of a given machine?	1/38
1.3.2 Flux weakening with negative $d$ -current	1/39
1.3.3 Rotor configurations for flux weakening	1/43
1.3.4 Applications: Tools machinery and electric cars	1/44
1.3.5 Additional losses at high speed	1/47
1.4 PM Linear machines	1/49
1.4.1 Application of high performance linear PM motors	1/49
1.4.2 Basic elements of linear PM motors	1/50
1.4.3 Forces and acceleration in linear PM motors	1/52
1.4.4 Features of linear PM motors	1/54
1.5 High torque machines	1/56
1.5.1 Hi-torque motors with conventional distributed winding	1/57
1.5.2 Modular synchronous machines	1/59
1.5.3 Transversal flux machines	1/64
<b>2. Reluctance motors</b>	<b>2/1</b>
2.1 Switched reluctance drives	2/1
2.1.1 Basic function	2/1
2.1.2 Flux linkage per phase	2/3
2.1.3 Voltage and torque equation	2/5
2.1.4 SR machine operation at ideal conditions	2/6
2.1.5 Calculating torque in saturated SR machine	2/8
2.1.6 SR machine operation at real conditions	2/11
2.1.7 SR Drive operation – torque-speed characteristic	2/14
2.1.8 Inverter rating	2/16
2.1.9 Motor technology and performance	2/18
2.1.10 Applications of SR drives	2/20
2.2 Synchronous reluctance machines	2/21
2.2.1 Basic function of synchronous reluctance machine	2/21
2.2.2 Voltage and torque equation of synchronous reluctance machine	2/23

2.2.3	Operation of synchronous reluctance machine at constant voltage and frequency	2/26
2.2.4	Stator flux linkage, saturation of iron	2/28
2.2.5	Synchronous reluctance machine performance and application	2/32
2.2.6	Asynchronous starting	2/34
2.2.7	Special rotor designs for increased ratio $X_d/X_q$	2/36
<b>3.</b>	<b>PM synchronous machines with cage rotor</b>	3/1
3.1	Basic motor function and rotor design	3/1
3.2	Motor performance at synchronous speed	3/4
3.3	Stress of permanent magnets at failures	3/10
3.4	Torque at asynchronous starting	3/11
<b>4.</b>	<b>Induction machines</b>	4/1
4.1	Significance and features of induction machines	4/1
4.2	Fundamental wave model of line-operated induction machine	4/6
4.3	Voltage limits and premium efficiency machines	4/16
4.4	Space harmonic effects in induction machines	4/22
4.4.1	Field space harmonics and current time harmonics at sinusoidal stator voltage	4/22
4.4.2	Harmonic torques	4/32
4.4.3	Rotor skew and inter-bar currents	4/38
4.4.4	Electromagnetic acoustic noise	4/47
<b>5.</b>	<b>Inverter-fed induction machines</b>	5/1
5.1	Basic performance of variable-speed induction machines	5/1
5.2	Drive characteristics of inverter-fed standard induction motors	5/6
5.3	Features of special induction motors for inverter-operation	5/9
5.4	Influence of inverter harmonics on motor performance	5/15
<b>6.</b>	<b>du/dt-effects in inverter-fed machines</b>	6/1
6.1	Voltage wave reflection at motor terminals	6/1
6.2	HF voltage distribution in armature winding	6/9
6.3	Insulation stress of AC winding at inverter supply	6/12
6.4	System design of inverter drives coping with big du/dt	6/14
6.5	Combined inverter-motors	6/16
<b>7.</b>	<b>Mechanical motor design</b>	7/1
7.1	Rotor balancing	7/1
7.1.1	Imbalance of rigid rotor bodies	7/2
7.1.2	Balancing equation for rigid rotor bodies	7/6
7.1.3	Balancing of rigid rotors	7/7
7.1.4	Balancing of complete motor system	7/10
7.1.5	Elastic rotor system - Vibrations of rotors	7/13
7.1.6	Balancing of elastic rotors	7/18
<b>8.</b>	<b>Stepper motors</b>	8/1
8.1	Basic principle of operation of steppers	8/2
8.2	Stepper motor design	8/8
8.3	Driving circuits for stepper motors	8/12
8.4	Torque characteristics of stepper motors	8/15

**Literature**

Mohan, N. et al: Power Electronics, Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, 1995

Miller, T.: Switched Reluctance Motors and their Control, Clarendon Press, Oxford, 1993

Gieras, J.: Permanent Magnet Motor Technology, Wiley, 2000

Hendershot, J.: Design of brushless Permanent-magnet motors, Clarendon Press, Oxford, 1993

Hindmarsh, J.: Electrical Machines and their Application, Pergamon Press, 1991

Fitzgerald, A. et al: Electric machinery, McGraw-Hill, 1992

Salon, S.: Finite Element Analysis of Electrical Machines, Kluwer academic press, 1995

Boldea, I.: Reluctance synchronous machines and drives, Clarendon Press, Oxford, 1996

Parasiliti, F.; Bertoldi, P. (ed.): Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Springer, Berlin-Heidelberg, 2003

Amin, B.: Induction Motors, Springer, Berlin, 2001

Dubey, G. K.: Fundamentals of Electrical Drives, Narosa Publishing House, New Delhi, 2000

Boldea, I., Nasar, S.A.: Electric drives, CRC Press, Boca Raton, 1999

Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe, Springer, Berlin-Heidelberg, 2012

Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe - Übungsbuch, Springer, Berlin-Heidelberg, 2012

**The Greek alphabet:**

$A \alpha$	Alpha	$B \beta$	Beta	$\Gamma \gamma$	Gamma	$\Delta \delta$	Delta
$E \varepsilon$	Epsilon	$Z \zeta$	Zeta	$H \eta$	Eta	$\Theta \vartheta$	Theta
$I \iota$	Jota	$K \kappa$	Kappa	$\Lambda \lambda$	Lambda	$M \mu$	My
$N \nu$	Nye	$\Xi \xi$	Xi	$O \omicron$	Omicron	$\Pi \pi$	Pi
$P \rho$	Rho	$\Sigma \sigma$	Sigma	$T \tau$	Tau	$Y \upsilon$	Ypsilon
$\Phi \varphi$	Phi	$X \chi$	Chi	$\Psi \psi$	Psi	$\Omega \omega$	Omega

## List of symbols

$a$	-	number of parallel branches of winding in AC machines, BUT: Half of number of parallel branches of armature winding in DC machines:
$A$	A/m	current layer
$A$	m <sup>2</sup>	area
$b_s, b_r$	m	slot width (Stator, Rotor)
$b_p$	m	pole width
$B$	T	magnetic flux density
$d_E$	m	penetration depth
$d_{si}$	m	inner stator diameter
$E$	V/m	electric field strength
$f$	Hz	electric frequency
$F$	N	force
$g$	-	integer number
$h$	m	height
$H$	A/m	magnetic field strength
$I$	A	electric current
$j$	-	imaginary unit
$J$	A/m <sup>2</sup>	electric current density
$J$	kgm <sup>2</sup>	polar momentum of inertia
$J$	Vs/m <sup>2</sup>	magnetic polarization
$k$	-	ordinal number of time harmonics
$k_d$	-	distribution factor
$k_p$	-	pitch factor
$k_w$	-	winding factor
$l$	m	axial length
$L$	H	self inductance
$m$	-	number of phases
$M$	H	mutual inductance
$M$	Nm	torque
$M_b$	Nm	asynchronous break down torque
$M_{p0}$	Nm	synchronous pull out torque
$M_s$	Nm	shaft torque
$M_l$	Nm	starting torque
$n$	1/s	rotational speed
$N$	-	number of turns per phase
$N_c$	-	number of turns per coil
$p$	-	number of pole pairs
$P$	W	power
$q$	-	number of slots per pole and phase
$Q$	-	number of slots
$R$	Ohm	electric resistance
$s$	-	slip
$s$	m	distance
$t$	s	time
$T$	s	time constant, duration of period
$U$	V	electric voltage
$U_p$	V	back EMF, synchronous generated voltage
$\ddot{u}_I$	-	current transforming ratio
$\ddot{u}_U$	-	voltage transforming ratio

$v$	m/s	velocity
$V$	A	magnetic voltage
$V$	$m^3$	volume
$W$	J	energy
$W$	m	coil width
$x$	m	circumference co-ordinate
$X$	Ohm	reactance
$X_d, X_q$	Ohm	direct and quadrature reactance
$z$	-	total number of conductors
$Z$	Ohm	impedance
$\alpha$	rad	firing angle
$\delta$	m	air gap width
$\varphi$	rad	phase angle
$\Phi$	Wb	magnetic flux
$\Psi$	Vs	magnetic flux linkage
$\kappa$	S/m	electric conductivity
$\mu$	-	ordinal number of rotor space harmonics
$\mu$	Vs/(Am)	magnetic permeability
$\mu_0$	Vs/(Am)	magnetic permeability of empty space ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am))
$\nu$	-	ordinal number of stator space harmonics
$\xi$	-	„reduced“ conductor height
$\eta$	-	efficiency
$\vartheta$	$^{\circ}\text{C}$	temperature
$\Theta$	A	ampere turns
$\tau_Q, \tau_s, \tau_r$	m	slot pitch (stator, rotor)
$\tau_p$	m	pole pitch
$\omega$	1/s	electric angular frequency
$\omega_m, \Omega_m$	1/s	mechanical angular frequency

### Subscripts

$av$	average
$b$	asynchronous break down
$c$	coil
$d$	direct, DC, distribution, dissipation
$e$	electric
$f$	field
$Fe$	iron
$h$	main-
$i$	induced
$in$	input
$k$	short circuit-
$mag$	magnetising, magnetic
$m$	mechanical
$max$	maximum
$N$	rated
$out$	output
$p$	pole, pitch
$q$	quadrature

$Q$  slot  
 $r$  rotor  
 $s$  stator  
 $s$  shaft  
 $syn$  synchronous  
 $w$  winding

$\delta$  air gap  
 $\sigma$  leakage  
0 no load  
1 starting ( $s = 1$  with induction machine)

### Notation

$i$  small letters: instantaneous value (e.g.: electric current)  
 $I$  capital letters: r.m.s. or DC value (e.g.: electric current)  
 $X, x$  capital letter: value in physical units e.g. reactance in  $\Omega$ , small letter: per unit value  
 $\underline{I}$  underlined: complex values  
amplitude  
related to stator side winding  
Re(.) real part of ...  
Im(.) imaginary part of ...

## Literature (“classical” papers)

- [1] LLOYD,M.R.: Development in Large Variable Speed Drives, ICEM Proceedings, 1992, Manchester, p.7-11
- [2] ARKKIO,A.: On the Choice of the Number of Rotor Slots for Inverter-Fed Cage Induction Motors, ICEM Proceedings, 1992, Manchester, p.366-370
- [3] NEUHAUS,W.; WEPPLER,R.: Einfluss der Querströme auf die Drehmomentenkennlinie polumschaltbarer Käfigläufermotoren, ETZ-A 88, 1967, H.3, p.80-84
- [4] BINDER,A.: Vorausberechnung der Betriebskennlinien von Drehstrom-Kurzschlussläufer-Asynchronmaschinen mit besonderer Berücksichtigung der Nutung, Diss. TU Wien, 1988
- [5] WEPPLER, R.: Ein Beitrag zur Berechnung von Asynchronmotoren mit nichtisoliertem Käfig, Archiv f. Elektrotechn. 50, 1966, p.238-252
- [6] SEINSCH,H.-O.: Oberfelderscheinungen in Drehfeldmaschinen, B.G.Teubner, Stuttgart, 1992
- [7] WEPPLER,R.; NEUHAUS,W.: Der Einfluss der Nutöffnungen auf den Drehmomentenverlauf von Drehstrom-Asynchronmotoren mit Käfigläufern, ETZ-A 90, 1969, p.186-191
- [8] Moritz,W.D., RÖHLK,J.: Drehstrom-Asynchron-Fahrmotoren für elektrische Triebfahrzeuge, Ele.Bahnen 50, 1979, H.3, p.65-71
- [9] HUTH,G.: Entwicklungstendenzen und Realisierungsmöglichkeiten bei AC-Hauptspindelantrieben, ETG-Fachberichte, 1987, Offenbach, p.243-25
- [10] KLEINRATH,H.: Ersatzschaltbilder für Transformatoren und Asynchronmaschinen, e&i 110, 1993, H.2, p.68-74
- [11] KLEINRATH,H.: Stromrichtergespeiste Drehfeldmaschinen, Springer-Verlag, Wien, 1980
- [12] Motorenkatalog M11: Drehstrom-Niederspannungsmotoren, Käfigläufermotoren, SIEMENS AG, 1990
- [13] BENECKE,W.: Temperaturfeld und Wärmefluss bei kleineren oberflächengekühlten Drehstrommotoren mit Käfigläufer, ETZ-A 87, 1966, H.13, p.455-459
- [14] PFAFF,G.: Regelung elektrischer Antriebe I, Oldenbourg Verlag, München, 1990, 4.Aufl.
- [15] Antriebskatalog SIMODRIVE 611(HS/AM-Module), Siemens AG,1991
- [16] LINK,U.: Efficient Control Methods for PWM Voltage Source Inverters, ICEM Proc., 1992, Manchester, p.928-932
- [17] Gertmar,L. et al.: Rotor design for inverter-fed high speed induction motors, EPE-Proc. 1989, Aachen, p.51-56
- [18] HÜGEL,H.; SCHWESIG,G.: Neues Stromregelverfahren für Drehstrom-Asynchronmotoren, antriebstechnik 30, 1991, H.12, p.36-42
- [19] BAYER,K.-H.: TRANSVEKTOR-Regelung - Ein Regelprinzip für Drehstromantriebe, Glasers Annalen 104, 1980, H.8/9, p.291-298
- [20] ANDRESEN,E.Ch. et al.: Fundamentals for the design of high speed induction motor drives with transistor inverter supply, EPE Proc., 1989, Aachen, p.823-828
- [21] KLAUTSCHEK,H.; SPETH,F.: Mit Mikroprozessoren in hohe Leistungsbereiche der Antriebstechnik, Energie & Automation, 11, 1989, H.2, p.30-32
- [22] BRAUN,M.: Tendenzen und Perspektiven bei Umrichtern, etz 114, 1993, H.17, p.1058-1059
- [23] LORENZ,L.: MOS-Controlled Power Semiconductor Components for Voltages from 50V to 2000V, EPE Journal 2, 1992, H.2, p.77-84
- [24] BOYS,T.; HANDLEY,P.G.: Spread spectrum switching: Low noise modulation technique for PWM inverter drives, IEE Proc.-B 139, 1992, H.3, p.252-260
- [25] STEFANOVIC,V.R.: Industrial AC Drives Status of Technology, EPE Journal 2, 1992, H.1, p.7-23
- [26] GREEN,T.C; WILLIAMS,B.W.: Derivation of Motor Line-Current Wave Forms from the DC-Link Current of an Inverter, IEE Proc.B 136, 1989, H.4, p.196-203
- [27] HAUN,A.: Vergleich von Steuerverfahren für spannungseinprägende Umrichter zur Speisung von Käfigläufermotoren, Diss. TH Darmstadt, 1992
- [28] KLAUSECKER,K.;SCHWESIG,G.: Drehstromhauptspindelantriebe: digital geregelt und hochdynamisch, Energie&Automation 9, 1987, H.1, p.28-29
- [29] GICK,B. et al.: Kommunikation bei Antrieben, etz 112, 1991, H.17, p.906-918
- [30] GRIEVE,D.W.; MC SHANE,I.E.: Torque Pulsations on Inverter Fed Induction Motors
- [31] HEUMANN,K.: Grundlagen der Leistungselektronik, Teubner, Stuttgart, 1985
- [32] BINDER,A. et al.: Motor design with large air gap for centrifugal blood pumps using rare-earth magnets, Archiv f. Elektrotechn. 73, 1990, p.261-269
- [33] DEMEL,W. et al.: Block- und sinusförmige Speisung von bürstenlosen SERVODYN-Motoren für Werkzeugmaschinen und Handhabungsgeräte, ETG-Fachberichte 1988, Offenbach, p.49-60
- [34] LEHMANN,R.: Technik der bürstenlosen Servoantriebe, 1.Teil, Elektronik 21, 1989, p.96-101
- [35] MÜHLEGGGER,W., RENTMEISTER,M.: Die permanenterrregte Synchronmaschine im Feldschwächbetrieb, e&i 109, 1992, H.6, p.293-299
- [36] HENNEBERGER,G.; SCHLEUTER,W.: Servoantriebe für Werkzeugmaschinen und Industrieroboter, etz 110, 1989, H.5, p.200-205; H.6/7, p.274-279

- [37] HUTH,G.: Grenzkennlinien von Drehstrom-Servoantrieben in Blockstromtechnik, etz-Archiv 11, 1989, H.12, p.401-408
- [38] PILLAY,P.; KRISHNAN,R.: An investigation into the torque behaviour of a brushless DC drive, IEEE- IAS, 1988, p.201-207
- [39] SCHRÖDER,M.: Einfach anzuwendendes Verfahren zur Unterdrückung der Pendelmomente dauermagneterregter Synchronmaschinen, etz-Archiv 10, 1988, H.1, p.15-18
- [40] NEROWSKI,G. et al.: New Permanent-Field Synchronous Motor with Integrated Inverter, ICEM-Proc., Boston, 1990, p.124-131
- [41] MENKE,K.: Gut verpackt - Drehstromantriebe für Verpackungsmaschinen, drive&control 4, 1993, p.7-8
- [42] BEINHORN,R.; GEKELER,M.: Kostengünstiges Positionieren mit bürstenlosen Servoantrieben, antriebstechnik 30, 1991, H.3, p.84, 90, 91
- [43] Antriebskatalog SIMODRIVE 611 (Drehstrom-Vorschubantriebe), Siemens AG, 1989
- [44] FEUSTEL,H.P.: Bürstenlose Antriebe bis 130kW, elektroanzeiger 45, 1992, H.9, p.46-50
- [45] Werkstoffkatalog Selten-Erd-Magnetwerkstoffe (VACODYM, VACOMAX); Vacuumschmelze GmbH, 4/88
- [46] BÖNING,W.(Hrsg.): HÜTTE-Elektrische Energietechnik, Bd.1: Maschinen, Abschn. Elektrische Entwurfsrechnung, Springer, Berlin, 1978
- [47] RUSSENSCHUCK,S.: Mathematische Optimierung permanenterregter Synchronmaschinen mit Hilfe der numerischen Feldberechnung, Diss., TH Darmstadt, 1990
- [48] KLEINRATH,H.: Kennlinienberechnung und Entwurf von Schenkelpolsynchronmaschinen mit Erregung durch Permanentmagnete, E&M 82, 1964, H.10, p.489-500
- [49] VOLKRODT,W.: Eigenschaften eines neuartigen Synchronmotors mit Erregung durch Bariumferritmagnete, Diss. TH Braunschweig, 1960
- [50] VOLKRODT,W.: Polradspannung, Reaktanzen und Ortskurve des Stromes der mit Dauermagneten erregten Synchronmaschine, ETZ-A 83, 1962, H.16, p.517-522
- [51] VOLKRODT,W.: Ferritmagneterregung bei größeren elektrischen Maschinen, Siemens Zeitschrift 49, 1975, H.6, p.368-374
- [52] BAUSCH,H. et al.: Anlauf von Reluktanzmotoren mit geblechtem Läufer, ETZ-A 85, 1964, p.170-173
- [53] BINDER,A.: Untersuchung zur magnetischen Kopplung von Längs- und Querachse durch Sättigung am Beispiel der Reluktanzmaschine, Archiv f. Elektrotechn. 72, 1989, p.277-282
- [54] SCHROEDER,J.W.: Beitrag zum Vergleich zwischen Reluktanz- und MERRILL-Motor, ETZ-A 89, 1968, H.10, p.230-233
- [55] KURSCHEIDT,P.: Theoretische und experimentelle Untersuchung einer neuartigen Reaktionsmaschine, Diss RWTH.Aachen, 1961
- [56] SCHMIDT,A.: Beitrag zur Berechnung der Reluktanzmaschine, Diplomarbeit, TU Wien, Inst. f. ele. Masch. u. Antriebe, 1987
- [57] LAWRENSON,P.J.; GUPTA,S.K.: Developments in the performance and theory of segment-rotor reluctance motors, Proc. IEE 114, 1967, H.5, p.645-653, correspondence in: Proc. IEE 115, 1968, H.9, p.1283-1285, Proc. IEE 117, 1970, H.12, p.2271-2272
- [58] KAMPER,M.J.; TRÜBENBACH,R.A.: Vector Control and Performance of a Reluctance Synchronous Machine with a Flux Barrier Rotor, ICEM Proc., Manchester, 1992, p.547-551
- [59] TAEGEN,F. et al.: Elektromagnetisches Geräusch von Reluktanzmaschinen mit segmentiertem Läufer, Archiv f. Elektrotechn. 73, 1990, p.253-260, p.293-298
- [60] NAGRIAL,M.H.; LAWRENSON,P.J.: Optimum steady-state and transient performance of reluctance motors, ICEM Proc., Lausanne, 1984, p.321-324
- [61] BOLDEA,I. et al.: Distributed Anisotropy Rotor Synchronous Drives - Motor Identification and Performance, ICEM Proc., Manchester, 1992, p.542-546
- [62] HOPPER,E.: Geschalteter Reluktanzmotor als robuste Alternative, Elektronik 26, 1992, p.72-75
- [63] LAWRENSON,P.J.: Switched reluctance drives: a perspective, ICEM Proc., Manchester, 1992, p.12-21
- [64] RIEKE,B.: Untersuchungen zum Betriebsverhalten stromrichter gespeister Reluktanzantriebe, Diss. Hochschule der Bundeswehr, München, 1981
- [65] AMIN,B.: Structure of High Performance Switched Reluctance Machines and their Power Feeding Circuitries, ETEP 2, 1992, H.4, p.215-221
- [66] CAMERON,D.E. et al.: The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors, IEEE- IAS 28, 1992, p.1250-1255
- [67] MOGHBELLI,H. et al.: Performance of a 10HP-Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors, IEEE- IAS 27, 1991, H.3, p.531-538
- [68] OMEKANDA,A. et al.: Quadratic hybrid boundary integral equation-finite element method applied to magnetic analysis of a switched reluctance motor, ICEM Proc., Manchester, 1992, p.499-502
- [69] AUERNHAMMER,E. et al.: Kompaktere Gleichstromantriebe durch Leistungssteigerung, etz, 1992, H.21, p.1342-1349
- [70] GROSS,H. (Hrsg.): Elektrische Vorschubantriebe für Werkzeugmaschinen, Siemens AG, München, 1981



- [71] PRETZENBACHER,R.; FANGMEYER,H.: Ohne Stau zum Ziel - Antriebstechnik für Kabelfertigung, drive&control 10, 1993, H.4, p.10-11
- [72] REICHE,H.: Objektive Bewertung der Kommutierungsgüte - ein Beitrag zur Entwicklung des Gleichstromantriebes, Elektrie 46, 1992, H.7, p.344-346
- [73] GABSI,M.K. et al.: Calculation and measurement of commutation currents in DC machines, Electric machines and power systems 17, 1989, p.167-182
- [74] PARSLEY,G.M.J. et al.: Factors Affecting the Prediction of Commutation Limits for a DC Machine under Varying Speed and Load Conditions, Trans. of the SA Institute of Electrical Engineers, 1992, p.171-176
- [75] VOITS,M.: Tuning durch Digitaltechnik, Elektronik 7, 1991, p.97-102
- [76] LAUER,L.: Digitalisiertes Stromrichterkonzept für Gleichstromantriebe, antriebstechnik 30, 1991, H.11, p.62-66
- [77] HENTSCHEL,E. et al.: Beanspruchung der Wicklungsisolierung von Drehstrommaschinen, etz 114, 1993, H.7, p.1074-1077
- [78] HELLER,B.; VEVERKA,A.: Stoßerscheinungen in elektrischen Maschinen, VEB Verlag Technik, Berlin, 1957
- [79] DEISENROTH,H.; TRABERT,Ch.: Vermeidung von Überspannungen bei Pulsumrichterbetrieb, etz 114, 1993, H.17, p.1060-1066
- [80] SCHMID,W.: Pulsumrichterantriebe mit langen Motorleitungen, AGT 4, 1992, p.58-64
- [81] KAUFHOLD,M.; BÖRNER,G.: Langzeitverhalten der Isolierung von Asynchronmaschinen bei Speisung mit Pulsumrichtern, Elektrie 47, 1993, H.3, p.90-95
- [82] BUNZEL,E.; GRASS,H.: Spannungsbeanspruchung von Asynchronmotoren im Umrichterbetrieb, etz 114, 1993, H.7/8, p.448-458
- [83] FEICHTINGER,P.; GOSS,W.: Rechnergestützte Diagnose am Bus - kontinuierliche Überwachung von Gleichstromantrieben, drive&control 2, 1992, p.28-29
- [84] Wälzlager-Katalog "Präzisions-Schräggugellager", SNFA, 4.Aufl., Leonberg, Deutschland
- [85] Wälzlager-Katalog "Wälzlager für Werkzeugmaschinen", NSK (Nippon Seiko), 1991, Pr.Nr.G124, Ratingen, Deutschland
- [86] Wälzlager-Katalog "Kugellager, Rollenlager", NSK, 1988, Kat.Nr.D1100, Ratingen, Deutschland
- [87] HOFMANN,R. et al.: Wer gut schmiert...- Fett erobert den High-Speed-Bereich, Konstruktionspraxis 21, 1991, H.8, p.12-14
- [88] RENTZSCH,H.: Elektromotoren - Electric Motors, ABB-Fachbuch, 4.Aufl., 1992, ABB-Drives AG, Turgi, Schweiz
- [89] LINGENER,A.: Auswuchten - Theorie und Praxis, Verlag Technik GmbH Berlin, 1992
- [90] ECK,B.: Ventilatoren, Springer, Berlin, 1971, 5.Aufl.
- [91] BINDER,A.: Additional losses in converter-fed uncompensated D.C.motors - their calculation and measurement, Archiv f. Elektrotechn. 74, 1991, p.357-369
- [92] TAEGEN,F.: Zusatzverluste von Asynchronmaschinen, Acta Technica CSAV, 1968, H.1, p.1-31
- [93] JORDAN,H. et al.: Ein einfaches Verfahren zur Messung der Zusatzverluste in Asynchronmaschinen, ETZ-A 88, 1967, H.23, p.577-583
- [94] JORDAN,H.; TAEGEN,F.: Experimentelle Untersuchungen der lastabhängigen Zusatzverluste von Käfigläufermotoren im reverse rotation test, E&M 85, 1967, H.1, p.11-17
- [95] SCHÄFER,G.: Pendelmomente bei permanenterregten, bürstenlosen Servoantrieben, ihre Ursachen und meßtechnische Bestimmung, ETG-Fachberichte 22, Offenbach, 1988, p.109-118
- [96] DREYFUS,L.: Eine Methode zur experimentellen Ermittlung des BLONDEL'schen Koeffizienten der Gesamtstreuung für Drehstrommotoren, E&M 39, 1921, H.13, p.149-151
- [97] RENTZSCH,H.: Luftströmungsgeräusche in elektrischen Maschinen, ETZ-A 82, 1961, H.24, p.792-798
- [98] FERENCZ,G.: Alles geregelt - Erfassen und Messen von Drehzahlen bei Antrieben mit Hilfe von Tachogeneratoren, Maschinenmarkt, Würzburg 97, 1991, p.46-50
- [99] WILHELMY,L. et al.: Drehzahl-Istwertaufnehmer: Longlife oder bürstenlos?, etz 110, 1989, H.5, p.246-247
- [100] BOYES,G.S.: Synchro and Resolver Conversion, 1980, Memory Devices Ltd., Surrey, United Kingdom
- [101] Katalog "Resolvers", Moore Reed and Company Ltd., 1979, Walworth, Andover, Hampshire, United Kingdom
- [102] SCHRÖDL,M.; STEFAN,T.: New Rotor Position Detector for Permanent Magnet Synchronous Machines Using the "Inform"-Method, ETEP 1, 1991, H.1, p.47-53
- [103] CARDOLETTI,L. et al.: Indirect position detection at stand-still for brushless DC and step motors, EPE Proc. 1989, Aachen, p.1219-1222
- [104] SATTLER,Ph.-K.; STÄRKER,K.: Estimation of speed and pole position of an inverter fed permanent excited synchronous machine, EPE Proc., 1989, Aachen, p.1207-1212
- [105] BINNS,K.J. et al.: A self-commutating PM machine with implicit rotor position sensing using search coils, ICEM Proc., Boston, 1990, p.53-56

- [106] BINNS, K.J. et al.: Implicit rotor position sensing using motor windings for a self-commutating permanent-magnet drive system, IEE Proc.B 138, 1991, H.1, p.28-34
- [107] BRUNSBACH, B.-J. et al.: Lagegeregelt Servoantriebe ohne mechanische Sensoren, Archiv f. Elektrotechn. 76, 1993, p.335-341
- [108] BRUNSBACH, B.-J.; HENNEBERGER, G.: Einsatz eines Kalman-Filters zum feldorientierten Betrieb einer Asynchronmaschine ohne mechanische Sensoren, Archiv f. Elektrotechn. 73, 1990, p.325-335
- [109] PANDA, S.K.; AMARATUNGA, G.A.J.: Waveform detection technique for indirect rotor-position sensing of switched reluctance motor drives, IEE Proc.B 140, 1993, H.1, p.80-96
- [110] SCHRÖDL, M.: Sensorless Control of Induction Motors at low Speed and Standstill, ICEM Proc., Manchester, 1992, p.863-867
- [111] ENGEL, U.; JORDAN, H.: Über pendelmomentbildende Sättigungsfelder in Drehstrom-Asynchronmaschinen, ETZ-A 94, 1973, H.1, p.1-3
- [112] REICHERT, K.; NEUBAUER, R.; REICHE, H.; BERG, F.: Elektrische Antriebe energieoptimal auslegen und betreiben, RAVEL-Broschüre, Bern, 1993 (Eidgen. Drucksachen- u. Materialzentrale, Best.Nr.724.331d)
- [113] URGELL, J.J.; REGIS, A.: A new spindle drive: High power-to-weight and low speed through magnetic flux control, GEC Alsthom Techn. Review 6 (1991), p.67-74
- [114] GAILLARD, G.; REGIS, A.; FAGE, P.: Moteur synchrone adapté pour marcher à puissance constante et commande pour ce moteur, Europ. Patentamt, Patent Nr.0 378 162 A1 (1990), zurückgezogen 1994, (Fa.Parvex, Dijon, Frankreich)
- [115] CUENOT, A.; PETITBOULANGER, A.: Moteur synchrone comportant des aimants insérés dans un rotor, Europ. Patentamt, Patent Nr.0 695 018 A 1(1995) (Fa.Parvex, Dijon, Frankreich)
- [116] HENZE, M.: Standard-Asynchronmotor mit integriertem Frequenzumrichter, antriebstechnik 35 (1996), H.11, p.36/39
- [117] PAUSTIAN, R.: Drehstrommotoren mit integriertem Frequenzumrichter für Pumpenantriebe, antriebstechnik 35 (1996), H.8, p.40/41
- [118] STEINBECK, L.: Innovation durch Integration - SIMOVERT COMBIMASTER, der Frequenzumrichter im Motor, drive&control (1995), H.3, p.20-21
- [119] BÄHR, H.: Gemeinsam noch stärker - 2BH7, der intelligente ELMO-G Verdichter mit integriertem Frequenzumrichter, drive&control (1996) H.2, p.6-7
- [120] KIZLER, A.: Evolution im Motorenbau - ROTEC - progressive Motoren für Umrichterbetrieb von 0.5kW bis 300kW, drive&control (1996) H.1, p.14-15
- [121] RICHTER, E.; CALO FERREIRA, A.; RADUN, A.V.: Testing and performance analysis of a high speed, 250kW switched reluctance starter generator system, Proc. ICEM 1996, Vigo, Vol.3, p.364-369
- [122] LUTZ, J.F.: Selecting pole count for permanent magnet motor designs, Proc. ICEM 1996, Vigo, Vol.2, p.3675-380
- [123] WEH, H.: Permanentmagneterregte Synchronmaschinen hoher Kraftdichte nach dem Transversalflusskonzept, etzArchiv 10 (1988), H.5, p.143-149
- [124] WEH, H.; HOFFMANN, H.; LANDRATH, J.: New permanent magnet excited synchronous machine with high efficiency at low speeds, Proc. ICEM 1988, Pisa, p.35-40
- [125] VOITH Transversalflussmotoren - Grundlagen, Werbeprospekt Fa.Voith G1320 4.92 (1992)
- [126] VOITH Transversalflussmaschine - Entwicklung eines elektrischen Einzelradantriebes für Citybusse der Zukunft, Werbeprospekt Fa.Voith G1401 d 5.95 (1995)
- [127] KOLLETSCHKE, H.-D.: Die modulare Dauermagnetmaschine - Aufbau und Eigenschaften, Diss. Techn. Univ. der Bundeswehr Neubiberg b. München, 1987
- [128] BAUSCH, H.; KOLLETSCHKE, H.-D.: A novel polyphase multipole permanent-magnet machine for wheel drive applications, Proc. ICEM 1984, Lausanne, p.591-594
- [129] TAEGEN, F.; KOLBE, J.: Drehmomente und Geräusche der modularen Dauermagnetmaschine, Archiv f. Elektrotechnik 77 (1994), p.391-399
- [130] STILLMAN, H.: IGCT2 – Megawatt-Halbleiterschalter für den Mittelspannungsbereich, ABB Technik 3 (1997), p.12-17
- [131] LEMP, D.: Realisierung eines asynchronen Antriebs mit direkter Fluss- und Drehmomentregelung, Diss. TH Darmstadt, 1997, Verlag Shaker, Deutschland
- [132] Pelloloa, M.; Perala, S.; Bryfors, U.: ACS600-Antriebe mit direkter Drehmomentregelung, ABB Technik 6 (1997), p.31-39
- [133] Wissenswertes über Frequenzumrichter, Handbuch, Danfoss A/S, 1997
- [134] Binder, A.: Motor- und Kabelbelastung durch Umrichter, in: Reichert, K. (Hrsg.): Messen von Betriebsparametern elektrischer Antriebe, RAVEL-Broschüre, 1996, p. 48-52
- [135] BINDER, A.; SCHREPFER, A.: Bearing Currents in Induction Machines due to Inverter Supply, Proc. ICEM 1998, Istanbul, p.586-591
- [136] BINDER, A.: Measures to cope with a.c. motor insulation stress due to IGBT-inverter supply, Proc. PEVD, Nottingham, 1996, p.569-574

- [137] GREUBEL, K.; HELBIG, F.; HEINEMANN, G.; PAPIERNIK, W.: Einsatz von Linearantrieben zur Herstellung von Konturenwerkzeugen, ETG-Fachbericht 79, 1999, p.461-470
- [138] SCHNURR, B.; WINKLER, W.: Lineare Direktantriebe: Neue Möglichkeiten im Werkzeugmaschinenbau, ETG-Fachbericht 79, 1999, p.449-460
- [139] STÖLTING, H.-D.; BEISSE, A.: Elektrische Kleinmaschinen, Teubner, Stuttgart, 1987
- [140] N.N.: Stepping motors and associated electronics, Philips Data Handbook: Components and Materials, Book C17, Philips Export B.V., Eindhoven, Netherlands, 1986
- [141] N.N.: Drei-Phasen-Schrittmotoren und Leistungsansteuerungen, Katalog Berger-Lahr, Juni 1994
- [142] RUMMICH, E. (Hrsg.): Elektrische Schrittmotoren und -antriebe, expert-Verlag, Band 365, Ehningen/Böblingen, 1992
- [143] KENJO, I.: Stepping motors and their microprocessor controls, Oxford Press, 1984

## German-English translation of important technical items

$a$	-	Anzahl paralleler Wicklungszweige bei Drehfeldmaschinen, aber: HALBE Anzahl paralleler Wicklungszweige bei Gleichstrommaschinen	number of parallel winding branches of poly-phase machines, however: HALF of the number of parallel winding branches of dc machines
$A$	A/m	Strombelag	electric loading
$A$	m <sup>2</sup>	Fläche	area
$b_s, b_r$	m	Nutbreite (Stator, Rotor)	slot width (stator, rotor)
$b_p$	m	Polschuhbreite	width of pole shoe
$b_{Stab}$	m	Stabbreite	width of bar
$B$	T	magnetische Induktion (Flussdichte)	magnetic induction (flux density)
$c_d, c_q$	-	Feldfaktoren der Längs-, Querachse	field factors of d-(direct) and q-(quadrature) axis
$c_g$	Nm/rad	Ersatzfederkonstante der Synchronmaschine	equivalent spring constant of a synchronous machine
$d_{si}$	m	Bohrungsdurchmesser	bore diameter
$D$	As/m <sup>2</sup>	elektrische Verschiebung (elektrische Flussdichte)	electric displacement (electric flux density)
$E$	V/m	elektrische Feldstärke	electric field density
$f$	Hz	elektrische Frequenz	electric frequency
$F$	N	Kraft	force
$g$	-	ganze Zahl	integer
$h$	m	Höhe	height
$H$	A/m	magnetische Feldstärke	magnetic field density
$I$	A	elektrische Stromstärke	electric current
$j$	-	imaginäre Einheit	imaginary unit
$J$	A/m <sup>2</sup>	elektrische Stromdichte	electric current density
$J$	kgm <sup>2</sup>	polares Trägheitsmoment	moment of inertia
$k$	-	Ordnungszahl	ordinal number
$k_d$	-	Zonenfaktor	distribution factor
$k_K$	-	Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis	no load - short circuit ratio
$k_p$	-	Sehnungsfaktor	pitch factor
$k_R, k_L$	-	Stromverdrängungsfaktoren	current displacement factors
$k_R$	V·s/A	Proportionalitätskonstante der Reaktanzspannung	proportional constant of the reactance voltage
$k_w$	-	Wicklungsfaktor	winding factor
$K$	-	Anzahl der Kommutatorsegmente	number of collector segments
$l$	m	Länge (axial)	length (axial)
$L$	H	Selbstinduktivität	self inductance
$m$	-	Strangzahl	number of phases
$M$	H	Gegeninduktivität	mutual inductance
$M$	Nm	Drehmoment	torque
$M_b$	Nm	asynchrones Kippmoment	asynchronous breakdown torque
$M_{p0}$	Nm	synchrones statisches Kippmoment	synchronous, steady-state breakdown torque
$M_s$	Nm	Kupplungsmoment, Wellenmoment	shaft torque

$M_l$	Nm	Anfahrmoment	breakaway torque
$n$	1/s	Drehzahl	motor speed
$N$	-	Windungszahl je Strang	number of windings per phase
$N_c$	-	Spulenwindungszahl	number of windings per coil
$p$	-	Polpaarzahl	number of pole pairs
$P$	W	Leistung	power
$q$	-	Lochzahl (Nuten pro Pol und Strang)	number of slots per pole and phase
$Q$	-	Nutenzahl	number of slots
$R$	Ohm	elektrischer Widerstand	electric resistance
$s$	-	Schlupf	slip
$s$	m	Weglänge	distance
$t$	s	Zeit	time
$T$	s	Zeitkonstante	time constant
$u$	-	Spulenseiten je Nut und Schicht	number of coils per slot and layer
$U$	V	elektrische Spannung	electric voltage
$U_p$	V	Polradspannung	synchronous internal voltage
$\ddot{u}, \ddot{u}_U$	-	Übersetzungsverhältnis (Spannungsübersetzungsverhältnis)	ratio (voltage ratio)
$\ddot{u}_I$	-	Stromübersetzungsverhältnis	current ratio
$v$	m/s	Geschwindigkeit	velocity
$V$	A	magnetische Spannung	magneto-motive force ("magnetic voltage")
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen	volume
$W$	J	Energie	energy
$W$	m	Spulenweite	coil width
$x$	m	Umfangskoordinate	circumferential coordinate
$X$	Ohm	Reaktanz	reactance
$X_d, X_q$	Ohm	Längs-, Querreaktanz	d-, q-reactance
$y$	-	Weite einer Spule, gezählt in Nutteilungen	width of a coil in numbers of slots
$z$	-	gesamte Leiterzahl	total number of conductors
$Z$	Ohm	Impedanz	impedance
$\alpha_e$	-	äquivalente Polbedeckung	pole pitch factor
$\alpha$	rad	Zündwinkel	firing angle
$\alpha_Q$	rad	Nutenwinkel (elektrischen Grad)	slot angle (electric degrees)
$\gamma$	rad	Umfangswinkel (elektrische Grad)	circumferential angle (electric degrees)
$\delta$	m	Luftspalt	air-gap
$\varphi$	rad	Phasenwinkel	phase angle
$\Phi$	Wb	magnetischer Fluss (Scheitelwert)	magnetic flux (peak value)
$\Psi$	Vs	magnetische Flussverketzung (Scheitelwert)	magnetic flux linkage (peak value)
$\kappa$	S/m	elektrische Leitfähigkeit	electric conductivity
$\mu$	-	Ordnungszahl	ordinal number
$\mu$	Vs/(Am)	magnetische Permeabilität	magnetic permeability
$\mu_0$	Vs/(Am)	magnetische Permeabilität des Vakuums ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am))	magnetic permeability of vacuum ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am))

$\nu$	-	Ordnungszahl	ordinal number
$\xi$	-	„reduzierte“ Leiterhöhe	“reduced” conductor height
$\eta$	-	Wirkungsgrad	efficiency
$\vartheta$	rad	Polradwinkel (elektrische Grad)	load angle (electric degrees)
$\Theta$	A	elektrische Durchflutung	Ampere-turns
$\sigma$	-	BLONDEL'scher Koeffizient der Gesamtstreuung, Streuziffer	BLONDEL's leakage coefficient
$\sigma_o$	-	Streuziffer der Oberfelderstreuung	leakage coefficient of harmonic leakage
$\tau_c$	m	Kommutatorstegteilung	collector segment pitch
$\tau_Q, \tau_s, \tau_r$	m	Nutteilung allgemein bzw. Stator- und Rotornutteilung	slot pitch in general, stator / rotor slot pitch
$\tau_p$	m	Polteilung	pole pitch
$\omega$	1/s	elektrische Kreisfrequenz	electric angular frequency
$\Omega$	1/s	elektrische Winkelgeschwindigkeit	electric angular speed
$\omega_m, \Omega_m$	1/s	mechanische Winkelgeschwindigkeit	mechanic angular speed
<b>Indizes / Subscripts</b>			
$a$		Anker	armature
$av$		Mittelwert	average value
$b$		Bürste, asynchrones Kippen	brush, asynchronous breakdown
$c$		Spule, Kommutator	coil, collector
com		Kommutierungs-	collector
$C$		Koerzitiv-	coercive
$d$		direct (längs), dc (Gleichgröße), Zone (distribution), Verluste (dissipation)	direct, dc (direct current), phase (distribution), losses (dissipation)
$D$		Dämpferwicklung in der Längsachse	damper winding in direct axis
$e$		elektrisch, äquivalent	electric, equivalent
$f$		Feld	field
$Fe$		Eisen	steel
$h$		Haupt-	mutual / magnetising
$i$		induziert	induced
$in$		zugeführt	fed -
$k$		Kurzschluss-	short circuit -
$m$		Magnetisierungs-, magnetisch	magnetising -, magnetic
$m$		mechanisch	mechanical
$m$		maximal	maximum
$N$		Nenn	rated
$out$		abgegeben	delivered
$o$		Oberfelder	harmonics
$p$		Pol, Polrad, Sehnung	pole, rotor (synchronous machine), pitch
$q$		quer	quadrature
$Q$		Dämpferwicklung in der Querachse	damper winding in the quadrature axis

$Q$		Nut	slot
$r$		Rotor	rotor
$R$		Reaktanz- (Gleichstrommaschine), Remanenz, Reibung	reactance (DC machine), remanence, friction
$s$		Stator	stator
$s$		Welle	shaft
$sch$		schalt	switching
$syn$		Synchron	synchronous
$sh$		Shunt	shunt
$v$		Vorwiderstand	external resistance
$w$		Wicklung	winding
$W$		Wendepol	commutating
$\delta$		Luftspalt	air-gap
$\sigma$		Streu-	leakage
$0$		Leerlauf	no load
$1$		Anfahrpunkt ( $s = 1$ bei Asynchronmaschine)	breakaway ( $s = 1$ with asynchronous machines)
<b>Notationen / Notations</b>			
$i$		Kleinbuchstabe: z.B.: elektrische Stromstärke, Augenblickswert	lower case letter: e.g.: electric current, instantaneous value
$I$		Großbuchstabe: z.B.: elektrische Stromstärke, Effektivwert oder Gleichstrom-Wert	upper case letter: e.g.: electric current, rms or dc value
$X, x$		Großbuchstabe: z.B. Reaktanz, Kleinbuchstabe: z.B. bezogene Reaktanz (p.u. -Wert)	upper case letter: e.g. reactance, lower case letter: e.g. normalised reactance (p.u.-value)
$\underline{I}$		unterstrichen: komplexe Größen	underlined: complex values
$\hat{I}$		Spitzenwert, Amplitude	peak value, amplitude
$I'$		auf Ständerwicklungsdaten umgerechnet	as seen from the stator winding
$X', X''$		transiente, subtransiente Reaktanz	transient, subtransient reactance
$\underline{I}^*$		konjugiert komplexer Wert von $\underline{I}$	conjugated complex value of $\underline{I}$
$\text{Re}(\cdot)$		Realteil von ...	real part of ...
$\text{Im}(\cdot)$		Imaginärteil von ...	imaginary part of ...