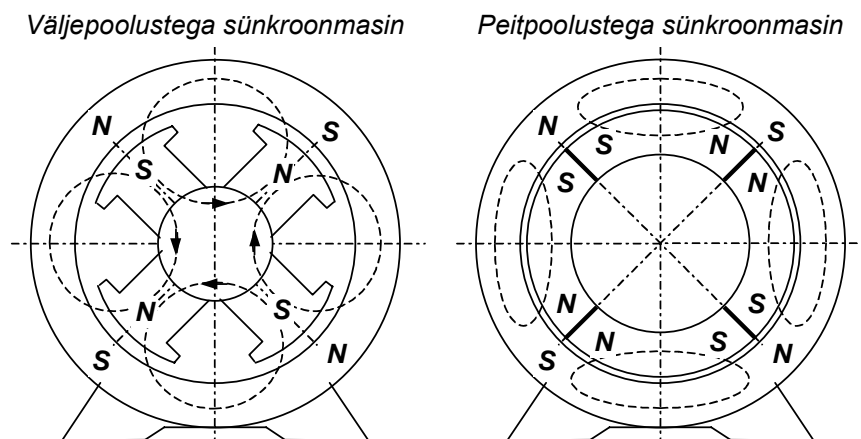


3.5. Sünkroonmasin

Sünkroonmootori (samuti ka asünkroonmasina) staatorimähis tekitab pöörleva magnetvälja (joonis 3.17). Erinevalt asünkroonmootorist tekitatakse aga sünkroonmootori rootoris elektromagnet- või püsिमagnetergutusega veel teine magnetvoog (ergutusvoog), mis magnetahela kaudu aheldub staatorimähise magnetvooga. Selle tulemusena haarab staatori pöörlev magnetväli rootori endaga kaasa (s.t. staatorivälja N poolused tõmbuvad rootori S poolustega ja vastupidi) ning rootor hakkab pöörlema staatorivälja sünkroonkiirusel. Rotori ergutamiseks elektromagnetite abil tuleb ergutusvool juhtida pöörlevasse rootorisse läbi rootoril asuvate kontaktrõngaste. Püsिमagnetite kasutamisel sellist vajadust pole.

Sõltuvalt sünkroonmasina rootori kujust ja pooluste asetusest eristatakse väljepoolustega (*salient pole*) ja peitpoolustega masinaid. Esimesel juhul on rootori poolused selgesti eristatavad ning õhupilu on minimaalne pooluse kohal. Teisel juhul on rootori pind sile ning õhupilu on ühtlane kogu ulatuses. Väljepoolustega masin töötab ka ilma ergutusväljata, s.t. ilma ergutuseks kasutatavate püsi- või elektromagnetiteta. Sel juhul on tegemist nn reaktiivse sünkroonmootoriga ehk reluktantsmootoriga (*reluctance motor*), mille töö põhineb õhupilu magnetilise takistuse (e. reluktantsi) muutumisel sõltuvalt rootori asendist.



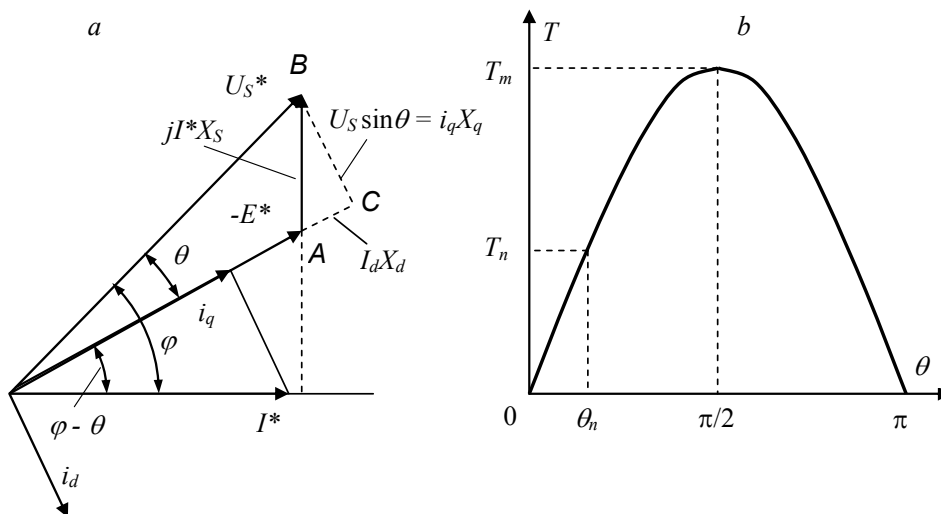
Joonis 3.17. Sünkroonmootori tööõhimõte

Sünkroonmootor arendab momenti ainult sünkroontalitusel. Seepärast on omaette probleemiks sünkroonmootori käivitamine otsevõrkulülituse puhul, milleks kasutatakse asünkroonkäivitusmähist. Sünkroonmasina kiiruse reguleerimine toimub samuti nagu asünkroonmasina puhul toitepinge sageduse reguleerimisega.

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \text{ p/min} \quad \omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \text{ s}^{-1}$$

Sünkroonmootori lihtsustatud vektordiagramm ja momendi-nurgatunnusjoon on näidatud joonisel 3.18. Vektordiagrammil näidatud staatorimähise elektromotoorjõu ja võrgupinge vektorite vaheline nurk on ühtlasi masina koormusnurk, millest sõltub masina poolt tekitatav moment. Koormusnurga suurenemisel üle $\pi/2$ hakkab moment vähenema. See nurk on masina stabiilsuspääriks. Suurel koormusel ei suuda mootor enam tasakaalustada koormusmomenti ning mootor langeb sünkronismist välja. Selleks, et normaaltalitusel oleks mootoril teatav

momendivaru valitakse tavaliste sünkroonmotorite puhul nimitalitlusele vastav koormusnurk suhteliselt väike (alla $\pi/4$).



Joonis 3.18. Sünkroonmotori lihtsustatud vektordiagramm (a) ja momendi-nurgatunnusjoon (b)

Sünkroonmasina vektordiagrammil on kasutatud alljärgnevaid suurusid:

- I^* - staatori faasivoolu vektor
- E^* , U_S^* - staatorimähise elektromotoorjõu ja võrgupinge vektorid
- X_S - staatorimähise induktiivtakistus
- φ - võrgupinge ja staatorivoolu vektorite vaheline nurk
- θ - staatorimähise elektromotoorjõu ja võrgupinge vektorite vaheline nurk

Lihtsustatud vektordiagrammi puhul ei arvestata staatorimähise aktiivtakistust ja loetakse selle väärtus nulliks, s.t. $R_S = 0$. See eeldus kehtib suhteliselt suurte masinate puhul, mille kasutegur on üle 95 %. Sel juhul antakse kogu võrgust tarbitav elektriline võimsus staatorilt üle rootorile, s.t. $P_{el} = P_S = P_R$.

Sünkroonmasina elektriline võimsus ja elektromagnetiline moment

$$P_{el} = 3 \cdot U_S I \cos \varphi \quad (3.22)$$

$$T_{em} = \frac{P_{el}}{\omega_0} = \frac{3 \cdot U_S I \cos \varphi}{\omega_0} \quad (3.23)$$

Vektordiagrammi põhjal $U_S \cos \varphi = E \cos(\varphi - \theta)$. Kolmnurga ABC põhjal

$$\cos(\varphi - \theta) = \frac{U_S \sin \theta}{I \cdot X_S}, \quad (3.24)$$

millest järeldub, et:

$$U_S \cos \varphi = \frac{E \cdot U_S}{I \cdot X_S} \sin \theta \quad (3.25)$$

Sünkroonmasina elektromagnetiline moment

$$T_{em} = \frac{3 \cdot E \cdot U_s}{\omega_0 X_s} \sin \theta = T_{\max} \sin \theta, \quad (3.26)$$

kus $T_{\max} = \frac{3EU_s}{\omega_0 X_s}$

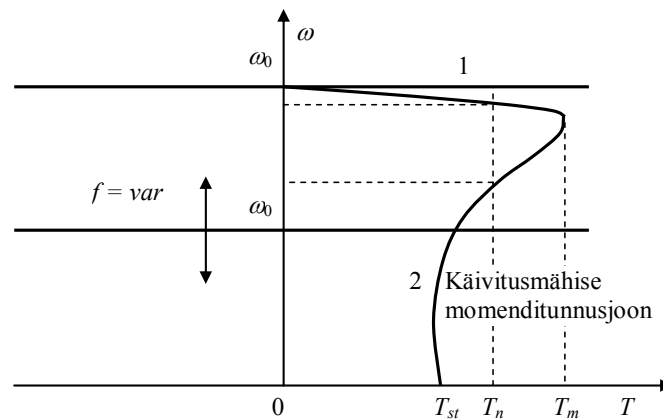
Elektromagnetilise momendi maksimaalväärtuse T_{\max} ja nimiväärtuse T_n suhe iseloomustab masina ülekoormatavust. Tavaliselt

$$\lambda = \frac{T_{\max}}{T_n} = 2 \dots 3 \quad (3.27)$$

Suurem koormus põhjustab rootori suurema mahajäämuse staatori magnetväljast. Seda iseloomustab koormusnurk. Masina nimimomendile vastab nimikoormusnurk. Tavaliselt $\theta_n = 25 \dots 30^\circ$. Väljepoolustega sünkroonmootori puhul arvutatakse moment valemiga

$$T_{em} = \frac{3}{\omega_0} \left[\frac{E \cdot U_s}{X_d} \sin \theta + \frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right] \quad (3.28)$$

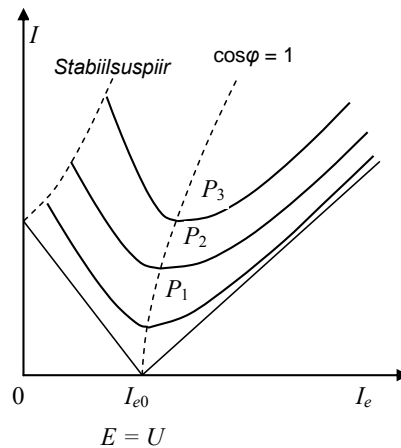
Sünkroonmootori mehaaniline tunnusjoon kujutab endast horisontaalset sirgjoont 1 (joonis 3.19). Sünkroonmootori käivitamisel sageduse sujuva suurendamisega tõuseb mehaaniline tunnusjoon koos sagedusega ülespoole ning koos sellega suureneb kiirus ja tõuseb masina tööpunkt. Sageduse vähendamisel aga langeb tunnusjoon allapoole. Sünkroonmootori otsevõrkukäivitamiseks on rootoril olemas asünkroonkäivitusmähis, mille poolt tekitatud momenti iseloomustab kõver 2. Kui käivitamisel kiirus kasvab sünkroonkiiruse lähedale tõmbub masin teatud kiirusel ja momendil sünkrootalitlusse.



Joonis 3.19. Sünkroonmootori mehaaniline tunnusjoon 1 ja asünkroonkäivitusmähise momendikõver 2

Ergutusmähisega sünkroonmasinat iseloomustavad nn U-kõverad ehk staatorivoolu sõltuvus ergutusvoolust. Kõveratel on olemas miinimumpunkt, milles staatorivool sama võimsuse juures on kõige väiksem. Selles punktis tarbib masin aktiivvõimsust. Ergutusvoolu vähendamisel ehk alaergutamisel tarbib sünkroonmootor võrgust pingest mahajäävat ehk induktiivse iseloomuga voolu, üleergutamisel aga pingest etteruttavat ehk mahtuvusliku

iseloomuga voolu. Seega saab ergutusvoolu reguleerimisega muuta võrgust tarbitavat reaktiivenergiat. Spetsiaalselt reaktiivenergia kompenseerimiseks toodetud tühijooksul töötavaid sünkroonmasinaid nimetatakse sünkroonkompensaatoriteks.



Joonis 3.20. Ergutusmähisega sünkroonmasina U-kõverad

Püsimagnetitega sünkroonmootoritel ergutusmähis puudub ning ergutusvoog tekitatakse püsimagnetitega. Püsimagnetitega sünkroonmasina rootori ehitus on lihtne (joonis 3.21), mistõttu niisugune mootor eriti töökindel muutuva kiirusega ajamites. Püsimagnetitega sünkroonmootori tööd kirjeldavad võrrandid sarnanevad alalisvoolumasina võrranditele

$$\begin{aligned} \dot{U}_S &= \dot{I}_S (R_S + j\omega L_S) + jE \\ E &= \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \Phi_{erg} \\ T_m &= \Phi_{erg} i_{Sq} \end{aligned} \quad (3.29)$$

kus \dot{I}_S ja \dot{U}_S on staatorimähise kompleksvool ja –pinge ning E staatorimähise püsimagnetite poolt indutseeritud elektromotoorjõud, Φ_{erg} ergutusvoog ja i_{Sq} staatorivoolu põikikomponent. Kui sünkroonmasina koormusnurk on $\pi/2$, siis staatorivoolu pikikomponent $i_d = 0$, põikikomponent $i_q = i_S$ ning mootor arendab maksimaalset momenti. Ühtlasi töötab mootor sel juhul ka stabiilsuspiiril, mis tavaliste sünkroonmootorite puhul pole lubatav.



Joonis 3.21 Püsimagneterutusega võimsa sünkroonmasina rootor.

Toitemuundurist toitmisel saab nimikiirusest väiksematel kiirustel mootori koormuse suurenemisel automaatselt suurendada mootori pinget ning mootori töö koormuse muutumisel stabiliseerida. Tänapäeval toodetakse ka väga suure, megavattideni ulatuva võimsusega püsिमagnetitega mootoreid. Sünkroonmasinate põhilised kasutusvalad on võimsad kompressorid, laeva veo- ja tüürimisajamid, veskid, pumbad, paberimasinad jm.

Firma ABB sünkroonmasinate andmeid

Tabel 3.2

Võimsus	Tüüp	Nimivool	Kasu- tegur	Nimi- moment	Võimsus- tegur	Momendi- kordsus	Inertsii- moment	Maks. kiirus	Mass
		I_n , A	η	T_n , Nm	$\cos \varphi$	T_{maks}/T_n	J kgm ²	n_{maks} , p/min	M , kg
$n_n = 430$ p/min (45 s-1)		$p = 7$							
55	M3_J 280SMB	101	92.7	1222	0.92	1.0	2.2	516	660
80	M3_J 315SMC	141	93.8	1776	0.94	1.1	3.9	516	890
125	M3_J 315MLA	223	94.5	2775	0.93	1.1	5.8	516	1125
150	M3_J 315LKB	263	95.0	3329	0.94	1.2	7.8	516	1430
200	M3_J 315LKC	351	95.1	4440	0.94	1.1	9.8	516	1605
200	M3_J 355SMB	335	95.1	4440	0.98	1.2	17.1	516	1780
280	M3_J 355MLB	487	95.6	6207	0.94	1.3	22.4	516	2210
335	M3_J 355LKB	567	95.8	7434	0.96	1.3	28.5	516	2690
423	M3_J 400LC	748	96.4	9384	0.92	1.3	41.1	516	3280
596	AMZ 0500LE10 _AM	1053	97.2	13237	0.92	1.3	68	516	5240
834	AMZ 0500LJ10 _AM	1472	97.4	18523	0.92	1.3	90	516	6020
1071	AMZ 0500LN10 _AM	1846	97.5	23786	0.92	1.3	113	516	6800
1298	AMZ 0560LL10 _AM	2250	97.7	28828	0.93	1.4	183	516	9500
1502	AMZ 0560LR10 _AM	2495	98.0	33358	0.95	1.6	245	516	10990
$n_n = 600$ p/min (62,8 s-1)		$p = 5$							
80	M3_J 280SMB	148	94.1	1274	0.90	1.0	2.2	720	660
110	M3_J 315SMC	195	95.1	1750	0.93	1.1	3.9	720	890
160	M3_J 315MLA	276	95.5	2546	0.95	1.1	5.8	720	1125
200	M3_J 315LKB	355	95.8	3179	0.92	1.3	7.8	720	1430
250	M3_J 315LKC	427	95.9	3977	0.95	1.2	9.8	720	1605
250	M3_J 355SMB	424	96.0	3974	0.96	1.4	17.1	720	1780
375	M3_J 355MLB	638	96.2	5963	0.95	1.3	22.4	720	2210
425	M3_J 355LKB	696	96.2	6763	0.99	1.3	28.5	720	2690
560	M3_J 400LC	934	96.9	8904	0.97	1.2	41.1	720	3280

Firma ABB püsिमagnetitega sünkroonmootorite nimesildid.

ABB Oy, Electrical Machines LV Motors, Vaasa, Finland						
3~Motor M3BJ 315LKC 12 B3						
PERMANENT MAGNET SYNCHR. MOTOR						
S1 SPEC.INSUL.				No. 0312-010512426		
Ins.cl. F				IP 55		
V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	Duty
370 D	43	200	430	352	0,93	
640 Y	43	200	430	203	0,93	
Prod. code 3GBJ316830-ADG183707						
INSULATED BEARINGS AT N-END						
			I_{nmax}	r/mln		
6319/C3			6316M/C3VLO241	1605 kg		
ABB IEC 60034-1						

Võlli kõrgus 280...400 mm

ABB		CE		ABB Oy	
		Made in Helsinki, Finland			
Type	AMZ 0500LN10 RAM	No	7654321		
Year	2004	Phases	3~	Output	1468 kW
Duty	S9, ACS CONVERTER	Voltage	690	V	
Connection	Y	Frequency	50	Hz	
Insul.cl.	F	Speed	600	rpm	
Weight	6800	kg	Current	145,7	A
IP	55	Power factor		0.93	
IC	416	Tmax/Tn		1.6	
IM	1001				
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE					
IEC 60034-1					

Võlli kõrgus 500...560 mm

Väikesevõimsuselisi püsिमagnetergutusega masinaid kasutatakse tööpinkide ja robotite ajamites. Kuna tööpinkides täidavad niisugused mootorid sageli abi- ehk teenindusfunktsiooni, siis on hakatud nimetama servomootoriteks ning vastavaid ajameid servoajamiteks. Oma olemuselt on niisugused mootorid samuti sünkroonmootorid, kuid neisse on sisse ehitatud asendiandur, mis võimaldab täpselt määrata rootori asendi staatori suhtes ning vastavalt asendisignaalile juhtida mootori toitepinget. Niisugune juhtimine on võrreldav alalisvoolumootori harikommutaatori talitlusega, mis samuti lülitab ankru toitepinget sõltuvalt ankru asendist (pöördenurgast).

Harjadeta alalisvoolumootorid, mis on ette nähtud talitluseks koos pooljuhtkommutaatoriga, sarnanevad oma ehituselt püsिमagnetitega sünkroonmootoritega. Neil masinatel ergutusmähis puudub ning ergutusvoog tekitatakse samuti püsिमagnetitega. Pöördmagnetväli tekitatakse staatorimähise ja pooljuhtkommutaatoriga, kusjuures kommutaatori lülitusprotsessi juhitakse sõltuvalt rootori pöördenurgast. Pöördenurga mõõtmiseks on masinasse integreeritud pöördenurga ehk asendiandurid (resolverid). Harjadeta alalisvoolumootori mehaaniline tunnusjoon erineb sünkroonmootori omast ning on võrreldav tavalise harikommutaatoriga varustatud mootori mehaanilise tunnusjoonega. Kui sünkroonmootori kiirus on koormusest sõltumatu (konstantne), siis harjadeta alalisvoolumootori kiirus hakkab koormuse suurenemisel vähenema. Mootori talitlust kirjeldavad alalisvoolumasinale sarnased võrrandid

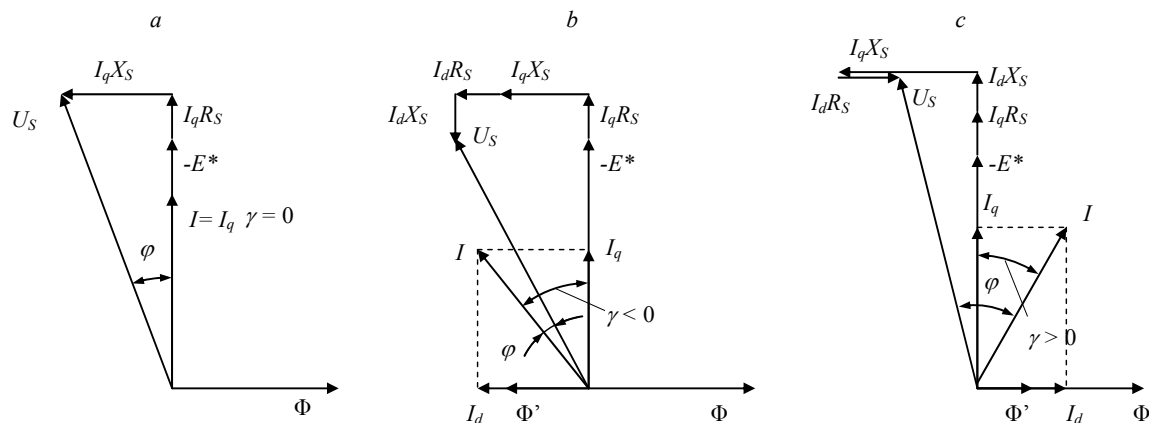
$$\begin{aligned}
 U &= E + L_s \frac{di}{dt} + iR_s \\
 E &= k_{mas} \Phi_{erg} \omega_{rot} \\
 T_{em} &= \frac{P_{em}}{\omega_{rot}} = \frac{3EI \cos \gamma}{\omega_{rot}} = k_{mas} \Phi_{erg} I \cos \gamma,
 \end{aligned}
 \tag{3.30}$$

kus γ on elektromotoorjõu E ja voolu I faasivektorite vaheline nurk, ω_{rot} rootori nurkkiirus, Φ_{erg} püsिमagnetite poolt tekitatud ergutusvoog.

Tavaliste alalisvoolumootorite puhul kasutatakse kiiruse suurendamiseks üle nimikiiruse ergutusvoolu vähendamist, millega koos väheneb masina magnetvoog. Märkimisväärne, et ankrupinget tasakaalustav elektromotoorjõud on võrdeline magnetvoo ja nurkkiiruse korrutisega. Järelikult magnetvoo vähenemisel peab sama elektromotoorjõu säilitamiseks suurendama masina nurkkiirust.

Harjadeta püsिमagnetergutusega alalisvoolumootorit saab juhtida ainult staatorimähise kaudu ning ergutusvoogu eraldi juhtida ei saa. Masina summaarset magnetvoogu saab aga kaudselt juhtida staatorimähise kommuteerimishetke valikuga. Staatorimähise magnetvoog liitub püsिमagnetite poolt tekitatud ergutusvooga ning sõltuvalt mähise ja magneti suhtelisest asendist toimib staatorivool magnetvoogu suurendavalt (samasuunalised vood) või vähendavalt (vastassuunalised vood). Nähtus on võrreldav harikommutaatoriga masina ankrureaktsiooniga. Kommutatsiooni juhtimisega saab muuta elektromotoorjõu E ja voolu I faasivektorite vahelist nurka γ . Kui nurk $\gamma = 0$, siis vool on magnetvooga risti ning masina moment on maksimaalne (joonis 3.22, a). Kui $\gamma < 0$, siis voolu faasivektor ennetab elektromotoorjõu faasivektorit ning vooluvektori pikikomponendi magnetvoog on vastassuunaline masina ergutusvooga. Sama nähtus esineb alalisvoolumasina harjade pöörlemisel neutraalteljelt kõrvale, kas pöörlemissuunas (kiirendav kommutatsioon) või pöörlemisega vastassuunas (aeglustav kommutatsioon). Voolu ennetav kommuteerimine magneetib masinat lahti, nõrgendab masina summaarset magnetvoogu ja suurendab

pöörlemiskiirust (joonis 3.22, b). Voolu hilinev kommuteerimine suurendab masina magnetvoogu ja momenti ning vähendab masina pöörlemiskiirust (joonis 3.22, c).

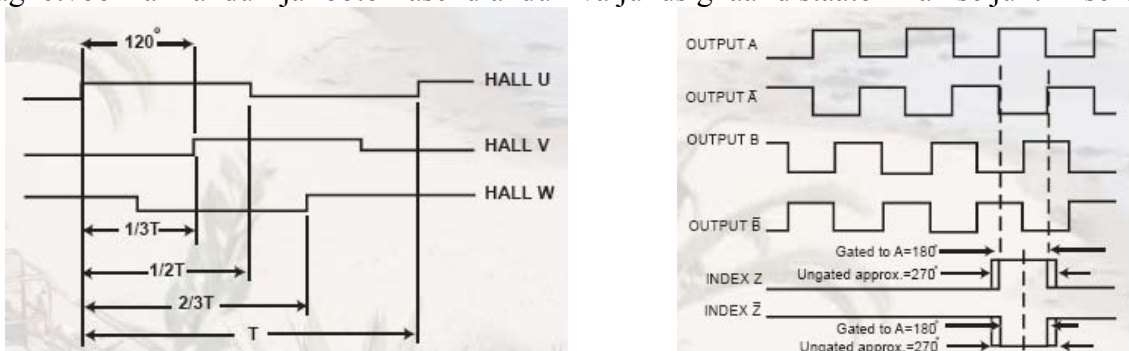


Joonis 3.22. Harjadeta alalisvoolumootori vektordiagrammid elektromotoorjõu ja voolu faasivektorite erineva asetuse korral: vool on magnetvooga risti (a), vool ennetab elektromotoorjõudu (b) ja vool jääb elektromotoorjõust maha (c)

Kokkuvõttes võib väita, et harjadeta alalisvoolumootori rootor pöörleb staatori poolt tekitatud magnetväljaga sünkroonselt nagu sünkroonmootori rootor, kuid antud juhul on staatori magnetvälja pöörlemiskiirus pooljuhtkommutaatoriga reguleeritav. Rootori võlli mehaanilise momendi suurenemisel hakkab rootor staatori väljast maha jääma, kuid tänu kommutatsiooni rootori asendist sõltuval automaatsele juhtimisele aeglustub ka staatori välja pöörlemine ning rootor säilitab staatori väljas oma suhtelise asendi. Seega eristab sünkroonmootorit alalisvoolumootorist vaid pöördvälja tekitamise põhimõte. Sünkroonmootori pöördväli tekitatakse toitevõrgu või -muunduri konstantse sagedusega pingesüsteemiga. Harjadeta alalisvoolumootori pöördväli tekitatakse rootori asendianduri signaali abil juhitava pooljuhtmuunduriga.

Rootori asendi määramine otsese mõõtmisega toimub magnetvoo Halli anduritega, optiliste impulssanduritega või resolveritega. Kaudne ehk anduriteta (*sensorless*) mõõtmine põhineb staatori magnetvoo, mähise induktiivsuse ja voolu rootori asendist sõltuva kõrgsagedusliku pulseerimise mõõtmises, indutseeritud elektromotoorjõu nullväärtuse tuvastamises või mootori pinge kõrgsageduslike harmooniliste komponentide mõõtmises.

Magnetvoo Halli anduri ja rootori asendianduri väljundsignaalid staatorimähise juhtimiseks



Firma ABB harjadeta püsिमagnetertutusega (NdFeB) servomootorid Drive^{IT}

Tabel 3.3

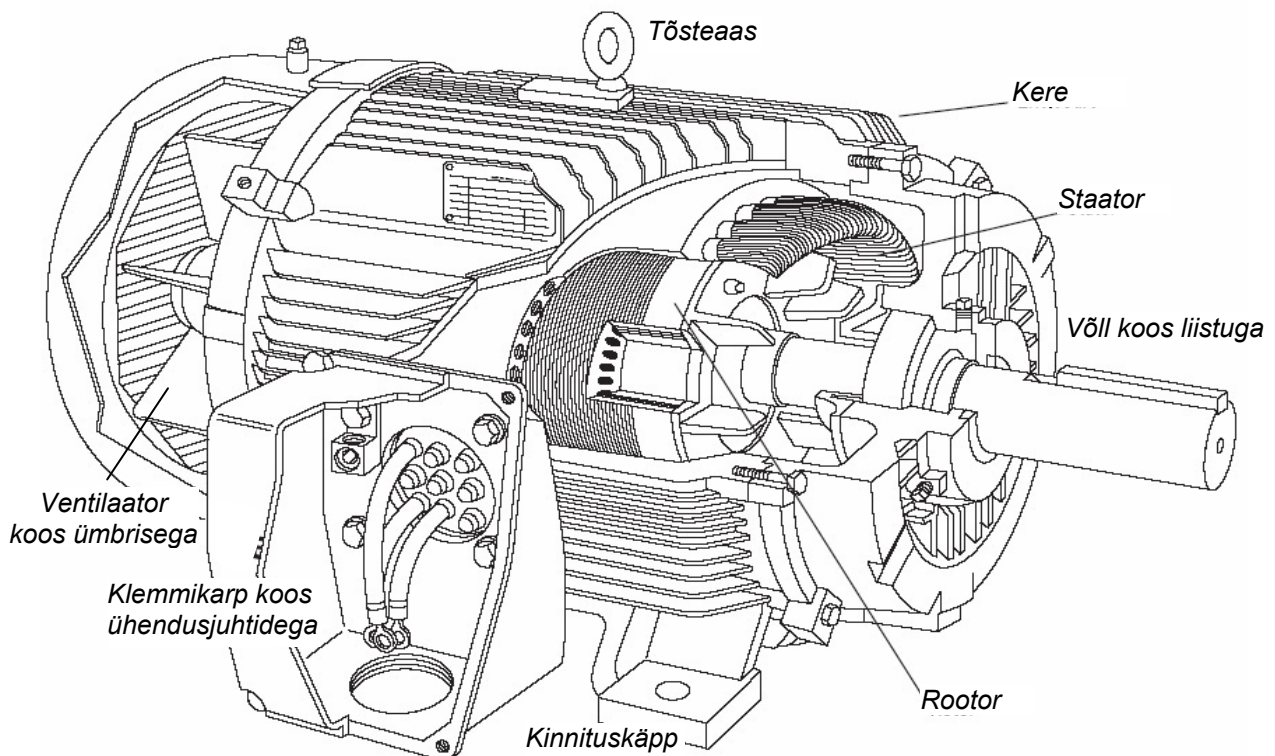
Tüüp	Vääratusmoment	Vääratusmomendi vool		Nimi-moment	Nimivool		Nimikiirus	Mehaaniline võimsus	Maksimaal-moment	Maksimaalmomendi vool		Inertsimoment	Mass	Pooluste arv
	M ₀ [Nm]	I ₀ [A]	I ₀ [A]	T _N [Nm]	I _N [A]	I _N [A]	n _N [p/min]	P _N [kW]	M _{max} [Nm]	I _{max} [A]	I _{max} [A]	J _m [kgcm ²]	m [kg]	N
		400 V	230 V		400 V	230 V								
8NB.2.40...	0.36	-	0.79	0.34	-	0.75	4000	0.20	1.7	-	10.0	0.17	1.0	4
8N0.1.40...	0.53	-	1.05	0.47	-	0.99	4000	0.30	2.5	-	12.8	0.24	1.2	4
8N0.2.40...	0.95	-	1.86	0.84	-	1.73	4000	0.50	5.0	-	24.0	0.45	1.8	4
8C1.1.30...	1.3	1.4	2.1	1.2	1.3	2	3000	0.38	4.6	5.5	8.1	0.90	3.1	6
8C1.1.60...	1.3	2.1	3.2	1.05	1.8	2.7	6000	0.66	4.6	8.1	12.5	0.90	3.1	6
8C1.2.30...	2.5	2.5	3.1	2.2	2.3	2.8	3000	0.69	8.8	9.7	11.9	1.65	4.1	6
8C1.2.60...	2.5	3.1	5	1.8	2.4	3.8	6000	1.13	8.8	12.2	19.3	1.65	4.1	6
8C1.3.30...	3.6	2.4	4	3.1	2.2	3.6	3000	0.97	12.6	9.3	15.4	2.35	4.9	6
8C1.3.60...	3.6	4.3	7.9	2.3	2.9	5.4	6000	1.45	12.6	16.7	30.8	2.35	4.9	6
8C1.4.30...	4.5	2.8	4.9	3.8	2.5	4.4	3000	1.19	15.8	10.8	19.2	3.00	5.8	6
8C1.4.60...	4.5	4.9	9.2	2.5	3	6	6000	1.57	15.8	19.2	35.6	3.00	5.8	6
8C4.0.15...	3.9	1.5	2.9	3.8	1.5	2.9	1500	0.60	14.0	5.8	11.7	5.00	6.9	6
8C4.0.30...	3.9	2.8	4.8	3.4	2.4	4.3	3000	1.07	14.0	10.8	19.0	5.00	6.9	6
8C4.1.15...	7.3	2.5	4.4	6.9	2.5	4.3	1500	1.08	26.3	10.3	17.3	9.40	9.2	6
8C4.1.30...	7.3	4.6	7.5	5.8	3.8	6.2	3000	1.82	26.3	18.3	29.9	9.40	9.2	6
8C4.2.15...	9.6	3.3	4.8	8.8	3.2	4.6	1500	1.38	35.0	13.4	19.5	12.80	10.8	6
8C4.2.23...	9.6	-	7	8.1	-	6.7	2300	1.95	35.0	-	30.6	12.80	10.8	6
8C4.2.30...	9.6	5.8	9.3	7.2	4.6	7.3	3000	2.26	35.0	23.8	37.8	12.80	10.8	6
8C4.3.15...	11.6	3.9	6.8	10.6	3.7	6.5	1500	1.67	42.7	15.9	28.1	16.00	12.4	6
8C4.3.30...	11.6	7.2	12.6	8.2	5.4	9.4	3000	2.58	42.7	29.5	51.6	16.00	12.4	6
8C4.4.15...	14.1	4.6	7.5	12.7	4.3	7	1500	1.99	52.9	19.2	31.3	20.50	14.8	6
8C4.4.30...	14.1	7.9	14.3	9.4	5.6	10	3000	2.95	52.9	33.0	59.5	20.50	14.8	6
8C5.0.15...	12.2	4.2	8	11.6	4.1	7.7	1500	1.82	42.7	16.3	31.0	21.00	15.0	6
8C5.0.30...	12.2	8	13	10	6.8	11.3	3000	3.14	42.7	31.0	52.0	21.00	15.0	6
8C5.1.15...	16.9	5.3	10	16	5.1	9.7	1500	2.51	59.2	20.5	39.0	30.20	18.3	6
8C5.1.30...	16.9	11	17	13	8.8	13.6	3000	4.08	59.2	43.0	66.0	30.20	18.3	6
8C5.2.15...	21.5	7.5	13.2	20	7.1	12.5	1500	3.14	75.3	29.3	51.2	40.00	21.9	6
8C5.2.30...	21.5	14.1	21.1	16	10.9	16.3	3000	5.03	75.3	54.6	82.0	40.00	21.9	6
8C5.3.15...	25.8	8.4	16.9	23.5	7.8	11.6	1500	3.69	90.3	32.8	65.6	49.20	25.3	6
8C5.3.30...	25.8	15.6	25.3	18.5	11.6	18.9	3000	5.81	90.3	60.5	98.4	49.20	25.3	6
8C5.4.15...	30	9.8	16.3	27	9	15	1500	4.24	105.0	38.1	63.5	59.00	28.6	6
8C5.4.30...	30	17.8	32.7	21	13	24	3000	6.60	105.0	69.3	127.1	59.00	28.6	6
8C5.6.15...	38.2	12.5	18.7	33	11	16.6	1500	5.18	134.0	48.5	73.0	78.00	35.4	6
8C5.6.30...	38.2	23.4	37.4	24	15.5	24.7	3000	7.54	134.0	91.0	146.0	78.00	35.4	6
8C6.1.20...	45	21.7	-	23.4	11.9	-	2000	4.90	158.0	84.6	-	97.50	34.1	8
8C6.2.15...	76*	27.5	-	49.5	18.8	-	1500	7.77	266.0	106.8	-1	88.00	49.6	8
8C6.3.10...	105*	28.1	-	82	23.1	-	1000	8.59	368.0	159.4	-	278.00	65.0	8

3.6. Asünkroonmasin

Kuidas tekitatakse rootoris vool?

- Vahetult, läbi liikuvate kontaktide.
- Induktsiooni teel

Asünkroonmasina ehitus on näidatud joonisel 3.23. Mootori põhiosadeks on paigalseisev staator ja pöörlev rootor. Staatoril asub pöördväljamähis. Tavaliselt on selleks kolmefaasiline täht- või kolmnurklülituses mähis, mille ühendusjuhid või -klemmid asuvad klemmikarbis. Masinad valmistatakse erineva paigaldusviisi jaoks kas äärik- või käppkinnitusega. Sõltuvalt masina ehitusviisist võib masina võll normaalasendis olla kas horisontaalne või vertikaalne.



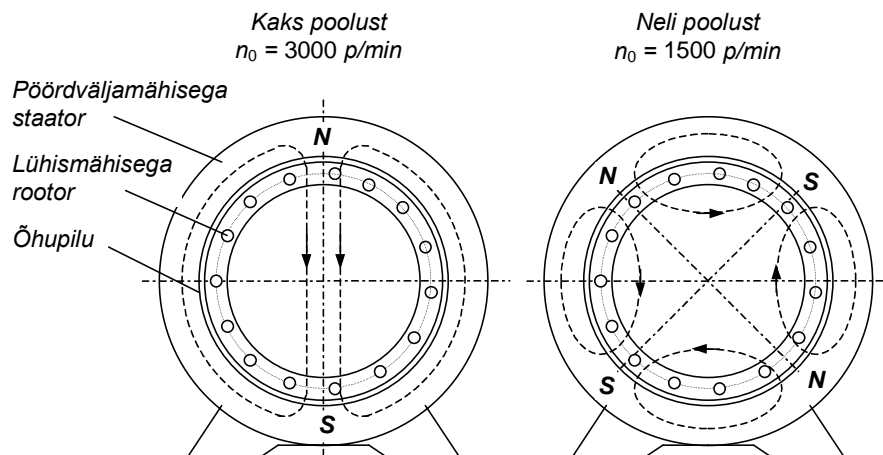
Joonis 3.23. Asünkroonmootori ehitus

Masin võib töötada nii mootorina kui ka generaatorina. Asünkroonmootor on maailmas enimkasutatav elektrimootor. Mootori puhul on staatorimähise ülesandeks pöörleva magnetvälja tekitamine. Mootori kiirus sõltub magnetvälja pöörlemise kiirusest ja viimane omakorda staatorimähise pooluste arvust ja toitevoolu sagedusest. Magnetvälja pöörlemiskiirust nimetatakse mootori sünkroonnurkkiiruseks ω_0 ehk ka lihtsalt sünkroonkiiruseks n_0 . Nende vahel kehtib alljärgnev seos

$$\omega_0 = \frac{2 \pi f}{p} = \frac{2 \pi n_0}{60} \quad (3.31)$$

kus ω_0 – mootori sünkroonnurkkiirus (rad/s), f – toitevoolu sagedus, p – mootori pooluste arv ja n_0 – mootori sünkroonkiirus (p/min).

Kahepooluselises ehk ühe pooluspaariga mootoris luuakse joonisel 3.24, a näidatud magnetväli, mille pöörlemiskiirus toitevõrgu vahelduvvoolu 50 Hz sageduse korral on 3000 p/min ehk 314 rad/s. Neljapooluselises ehk kahe pooluspaariga masina sünkroonkiirus on kaks korda väiksem, s.o. 1500 p/min ehk 157 rad/s. Kuuepooluselise masina sünkroonkiirus on vastavalt 1000 p/min ehk 105 rad/s.



Joonis 3.24. Asünkroonmootori staatori magnetväli sõltuvalt staatorimähise pooluste arvust.

Rootori pöörlemapanemiseks on vaja peale staatorimähiste poolt tekitatud pöörleva magnetvälja tekitada vool rootorimähises. Asünkroonmootori puhul tekitatakse see vool elektromagnetilise induktsiooni põhimõttel. Nimetatud põhimõttest tuleneb ka asünkroonmootori ingliskeelne nimetus - *induction motor*, s.t. induktsioonmootor. Staatori ja rootori mähised on omavahel magnetahela kaudu elektromagnetilises sidestuses. Elektromagnetilise induktsiooni põhimõtte kohaselt indutseeritakse juhtmes elektromotoorjõud kui juhe magnetväljas liigub või kui juhete ümbritsev magnetväli muutub. Järelikult, elektromotoorjõu ja voolu tekitamiseks rootorimähises, peavad staatori magnetvälja ja rootori pöörlemiskiirused teineteisest erinema. Seda kiiruste erinevust nimetatakse rootori **libistuseks** (*slip*) ja tähistatakse tähega s . Libistus arvutatakse sünkroonkiiruse ω_0 ja rootori tegeliku pöörlemiskiiruse ω suhtelise vahena.

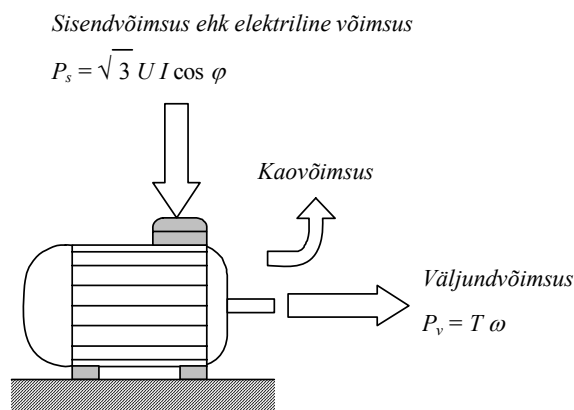
$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (3.32)$$

Kuna rootori pöörlemiskiirus erineb magnetvälja pöörlemiskiirusest, s.t. sünkroonkiirusest, nimetatakse seda tüüpi mootorit asünkroonmootoriks. Standardse asünkroonmootori nimilibistus on mõni protsent, kusjuures suurema nimilibistusega on väiksemad mootorid.

Asünkroonmootori rootorimähiseid valmistatakse kahel eri viisil. **Lühismähis** kujutab endast rootori magnetahela uuretesse valatud ning rootori otstes on omavahel lühistatud vardaid. Niisugune mähis on oma kujult võrreldav oravaratta taolise puuriga, millest tuleneb ka selle teine nimetus oravikmähis (*squirrel cage*). **Faasimähis** on staatorimähisega sarnane rootori uuretesse paigutatud keritud mähis, mille klemmid on ühendatud rootoril asetsevate kontaktrõngastega (*slip ring*). Kontaktrõngaste ning neil libisevate harjade kaudu saab rootorimähisega ühendada lisatoiteallikaid või passiivelemente, muuta sellega masina omadusi ning paindlikumalt juhtida masina energiavoogu. Kontaktrõngaste ja harjade sõlm

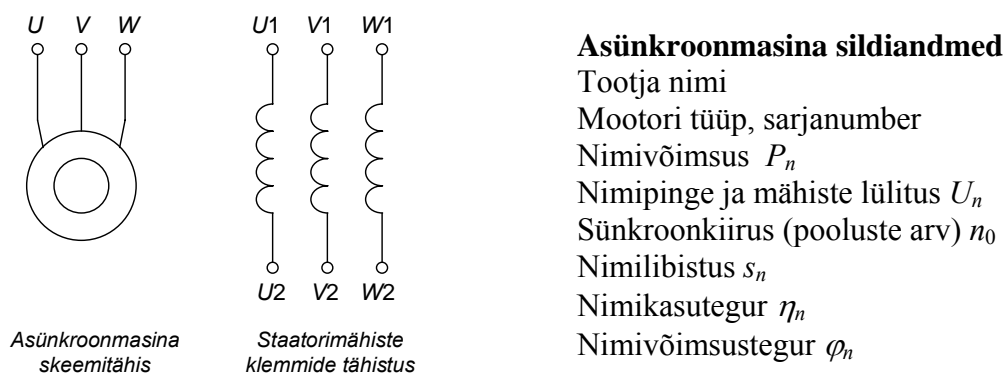
muuda faasirootoriga masina lühisrootoriga masinast oluliselt kallimaks, vähendab töökindlust ning suurendab masina käidukulusid. Seepärast valmistatakse faasirootoriga masinaid peamiselt suuremate võimsustega, kus energiavoo paindlikumast juhtimisest tuleneb kasu korvab eelnimetatud puudused.

Masina energiavood on näidatud joonisel 3.25. Võrgust tarbitav elektriline võimsus muundatakse pöörleva võlli mehaaniliseks võimsuseks, kusjuures muundamise käigus eraldub soojus ehk kaovõimsus.



Joonis 3.25. Elektrimasina energiavood vahelduvvooluvõrgust toitmisel

Lühisrootoriga asünkroonmootori skeemitähis ja mähiste tähistamine on näidatud joonisel 3.26. Samas on loetletud ka nimesildile kantavad olulisemad andmed.



Joonis 3.26. Lühisrootoriga asünkroonmootori skeemitähis ja mähiste tähistamine

Firma ABB ühekiiruselised lühisrootoriga standardsed suletud ehitusega alumiiniumkerega asünkroonmootorite kataloogiandmed on esitatud tabelis 3.2. Mootorite võimsus on vahemikus 0,06...55 kW, toitepinge 3 x 400 V; kere kaitseaste on IP55 ning mähiste isolatsiooniklass F.

Asünkroonmotorite kataloogiandmed

2-pooluselised, $n_0 = 3000$ p/min.

Tabel 3.4

P_n kW	Tüüp ja suurusaste	n_n p/min	η_n %	$\cos\varphi_n$	I_n A	I_{st}/I_n	T_n Nm	T_{st}/T_n	T_{max}/T_n	J kgm ²	m kg
0.09	M2VA 56 A	2820	59.8	0.69	0.32	3.9	0.31	2.9	2.7	0.00011	3.2
0.12	M2VA 56 B	2840	67.2	0.64	0.41	4.1	0.41	3.2	2.8	0.00012	3.4
0.18	M2VA 63 A	2820	73.7	0.64	0.56	4.2	0.62	3.5	3.1	0.00013	3.9
0.25	M2VA 63 B	2810	77.5	0.71	0.66	4.5	0.87	3.6	3.3	0.00016	4.4
0.37	M2VA 71 A	2840	77.1	0.72	1.0	5.5	1.25	3.8	3.9	0.0004	5.5
0.55	M2VA 71 B	2830	79.2	0.76	1.35	5.7	1.86	3.6	3.7	0.00045	6.5
0.75	M2VA 80 A	2870	81.2	0.75	1.8	6.2	2.49	2.9	3.6	0.000722	9
1.1	M2VA 80 B	2850	81.4	0.78	2.5	6.1	3.69	2.3	3.5	0.000763	11
1.5	M2AA 90 S	2870	80.1	0.82	3.35	5.5	5	2.4	3.0	0.0019	13
2.2	M2AA 90 L	2880	83.6	0.87	4.37	7.0	7.5	2.7	3.0	0.0024	16
3	M2AA 100 L	2900	86.0	0.88	5.95	7.5	10	2.7	3.6	0.0041	21
4	M2AA 112 M	2850	86.0	0.91	7.4	7.5	13.4	2.8	3.0	0.01	25
5.5	M2AA 132 SA	2855	86.0	0.88	10.5	6.8	18.3	2.7	3.6	0.014	37
7.5	M2AA 132 SB	2855	87.0	0.90	13.9	7.2	25	3.2	3.8	0.016	42
11	M2AA 160 MA	2915	88.4	0.89	20.5	6.1	36	2.1	2.5	0.039	73
15	M2AA 160 M	2900	89.5	0.90	27	6.1	49.4	2.4	2.6	0.047	84
18.5	M2AA 160 L	2915	90.2	0.91	32.5	6.8	61	2.6	3.0	0.053	94
22	M2AA 180 M	2925	91.2	0.89	39	7.9	72	2.7	3.4	0.06	111
30	M2AA 200 LA	2945	92.0	0.88	53	7.9	97	3.0	3.7	0.094	139
37	M2AA 200 L	2945	92.8	0.89	65	8.2	120	3.1	3.6	0.115	170
45	M2AA 225 M	2940	93.0	0.88	80	7.7	146	2.8	3.0	0.21	209
55	M2AA 250 M	2960	93.5	0.90	95	7.3	177	2.8	3.0	0.31	277

4-pooluselised, $n_0 = 1500$ p/min

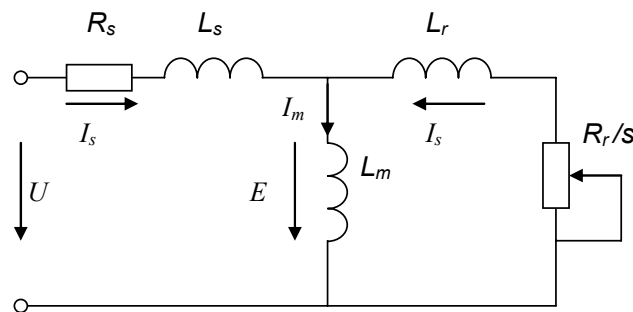
Tabeli 3.4 järg

P_n kW	Tüüp ja suurusaste	n_n p/min	η_n %	$\cos\varphi_n$	I_n A	I_{st}/I_n	T_n Nm	T_{st}/T_n	T_{max}/T_n	J kgm ²	m kg
0.06	M2VA 56 A	1340	51.1	0.67	0.26	2.5	0.43	2.2	2.2	0.00017	3.2
0.09	M2VA 56 B	1370	55.5	0.62	0.38	2.8	0.63	2.9	2.9	0.00018	3.4
0.12	M2VA 63 A	1400	63.7	0.59	0.46	3.1	0.82	2.6	2.6	0.00019	4
0.18	M2VA 63 B	1380	65.6	0.64	0.63	3.1	1.25	2.5	2.6	0.00026	4.5
0.25	M2VA 71 A	1410	70.4	0.71	0.74	4.3	1.71	2.7	2.9	0.00066	5.5
0.37	M2VA 71 B	1420	74.6	0.69	1.05	4.4	2.51	2.6	2.8	0.00089	6.5
0.55	M2VA 80 A	1390	75.3	0.76	1.4	4.6	3.75	2.6	2.9	0.001257	9
0.75	M2VA 80 B	1410	78.2	0.74	1.9	4.7	5.08	3.5	3.9	0.001565	10.5
1.1	M2AA 90 S	1410	77.5	0.81	2.59	5.0	7.5	2.2	2.7	0.0032	13
1.5	M2AA 90 L	1420	80.3	0.79	3.45	5.0	10	2.4	2.9	0.0043	16
2.2	M2AA 100 LA	1430	83.0	0.81	4.8	5.5	15	2.4	2.9	0.0069	21
3	M2AA 100 LB	1430	85.0	0.81	6.48	5.5	20	2.5	2.9	0.0082	24
4	M2AA 112 M	1435	84.5	0.80	8.6	7.0	27	2.8	3.0	0.015	27
5.5	M2AA 132 S	1450	87.0	0.83	11.1	7.3	36	2.2	3.0	0.031	40
7.5	M2AA 132 M	1450	88.0	0.83	14.8	7.9	49	2.5	3.2	0.038	48
11	M2AA 160 M	1460	89.1	0.81	22	6.5	72	2.7	2.6	0.067	75
15	M2AA 160 L	1460	90.4	0.82	29	7.1	98	2.7	3.3	0.088	92
18.5	M2AA 180 M	1460	91.1	0.81	36.5	7.6	121	3.1	3.5	0.102	110
22	M2AA 180 L	1460	91.8	0.82	42	7.9	143	3.0	3.8	0.127	128
30	M2AA 200 L	1470	92.0	0.80	59	7.8	195	3.0	3.4	0.225	177
37	M2AA 225 S	1475	92.8	0.85	68	6.8	240	3.0	3.1	0.35	216
45	M2AA 225 M	1475	93.0	0.84	84	8.1	291	3.5	3.2	0.41	237
55	M2AA 250 M	1475	93.7	0.84	98	6.8	356	2.5	2.6	0.5	286

Asünkroonmasina staatikamudel koostatakse mootori ühefaasilise aseskeemi alusel. Kasutusel on mitmed erinevad aseskeemid, millest kõige enam kasutatakse T-kujulisi aseskeeme (joonis 3.27). Aseskeem võimaldab arvutada mootori staatori- ja rootorivoolud, mille põhja omakorda saab arvutada masina elektrilise võimsuse ning mootori pöördemomendi. Joonisel on näidatud mootori elektrihaela järgmised parameetrid: R_s – staatorimähise aktiivtakistus, L_s – staatorimähise puistevoost tingitud puisteinduktiivsus, L_m – mootori põhiinduktiivsus, L_r – rootorimähise puistevoost tingitud puisteinduktiivsus, R_r – rootorimähise aktiivtakistus, L_r', R_r' – rootoriahela ekvivalentne induktiivsus ja takistus, L_{sr} – staatori- ja rootoriahela summaarne ekvivalentne puisteinduktiivsus, E – õhupilu elektromotoorjõud, s – rootori libistus staatorivälja suhtes.

Aseskeemi (joonis 3.27) põhjal kirjutatakse välja järgmised asünkroonmasina staatikavõrrandid:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_s \cdot R_s + j\omega_1(I_s \cdot L_s + I_m \cdot L_m), \\ 0 &= I_r \cdot \frac{R_r}{s} + j\omega_1(I_r \cdot L_r + I_m \cdot L_m) \\ I_m &= I_s + I_r \end{aligned} \quad (3.33)$$



Joonis 3.27. Asünkroonmootori lihtsustatud ühefaasiline (T-kujuline) aseskeem

Rootorivoolu arvutatakse õhupilu elektromotoorjõu E kaudu

$$I_r = \frac{E}{(R_r / s) + j\omega_1 L_r}. \quad (3.34)$$

Aseskeemi kohaselt on rootoris eralduv energia võrdeline võimsusega takistusel R_r/s . Tegelik rootori energiakadu võrdub aga võimsusega takistil R_r . Nende kahe suuruse vahe iseloomustab mootori ekvivalentset mehaanilist võimsust.

$$P_{meh} = mI_r^2 \left(\frac{R_r}{s} - R_r \right) = mI_r^2 R_r \left(\frac{1-s}{s} \right), \quad (3.35)$$

kus m on staatorimähise faaside arv (tavaliselt $m = 3$).

Kui oletada, et ω on rootori nurkkiirus, siis saab mootori pöördemomendi arvutada valemiga:

$$T = \frac{P_{meh}}{\omega} = mI_r^2 R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) / \omega. \quad (3.36)$$

Kuna rootori nurkkiirus on arvatav valemiga:

$$\omega = \omega_s(1 - s) = 2\pi \cdot f(1 - s) / p, \quad (3.37)$$

kus ω_s on rootori sünkroonkiirus ja p pooluste arv, võib mootori pöördemomendi avaldada kujul:

$$T = \frac{pm}{2\pi f} \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s}. \quad (3.38)$$

Mootori kiiruse saab arvutada ajami põhivõrrandist

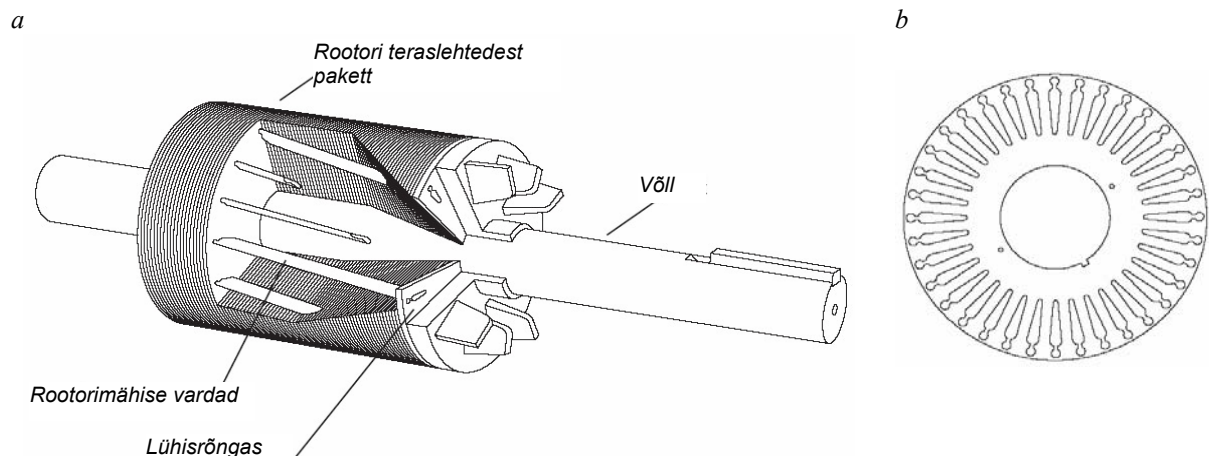
$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_s, \quad (3.39)$$

kus J on ajami taandatud inertsimoment ja T_s koormusmoment. Märkigem, et mootori võllile taandatud inertsimomendi kineetiline energia on võrdne kõigi pöörlevate osade summaarse kineetilise energiaga.

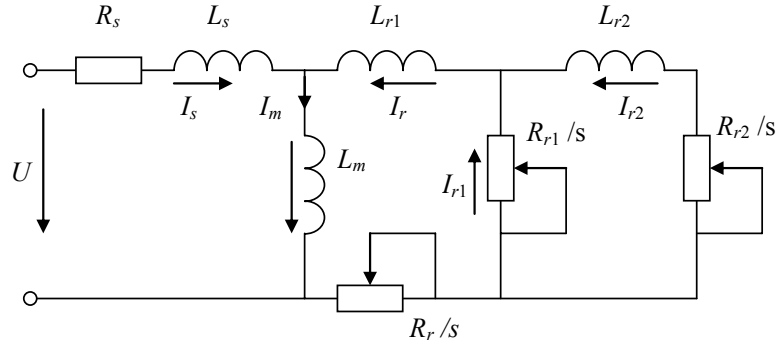
Võrrandite 3.33 kuni 3.38 põhjal saab arvutada mootori mehaanilise tunnusjoone (kiiruse ja momendi sõltuvuse). Ühefaasiliste aseskeemide puuduseks on asjaolu, et need põhinevad pingete ja voolude keskväärtustel ja ei võimalda kirjeldada magnetvälja pöörlemist ning sellest tulenevalt ka kõiki mootori dünaamikaga seotud protsesse.

Rootorimähise pinnaefekti arvestamine. Joonisel näidatud aseskeemi puuduseks see, et aseskeem ei kajasta lühisrootori mähises toimuvat voolude pinnaefekti, mis mõjutab oluliselt asünkroonmootori tööd suurematel libistustel. Pinnaefektist sõltub suurel määral asünkroonmasina mehaanilise tunnusjoone kuju.

Rootorimähiste varraste vahelduvvoolusagedus on võrdeline toitesageduse ja libistuse korrutisega. Suurema libistuse puhul, nt. mootori käivituse algetapil, on rootorivoolu sagedus võrdne toitepinge sagedusega $s = 1$, s.t. tunduvalt suurem kui nimilibistuse puhul. Käivitusprotsessi jooksul muutub libistus alates $s = 1$ kuni nimilibistuse s_n . Pinnaefekt avaldub massiivses vahelduvvoolu juhil nii, et juhi pinnal on voolutihedus suurem kui juhi sees. Voolu ebahürtlase jagunemise tõttu juhi efektiivne ristlõikepind väheneb ja aktiivtakistus suureneb. Rootoriahela aktiivtakistuse muutumine kajastub aga otseselt mootori elektromehaaniliste omaduste ja mehaanilise tunnusjoone kuju muutumises.



Joonis 3.28. Rootori ehitus (a) ja rootori sügavuured (b)



Joonis 3.29. Asünkroonmootori aseskeem, mis arvestab rootorimähise pinnaefekti

Aseskeemi ahelate voolu leitakse võrrandisüsteemist

$$\begin{aligned}
 U_1 &= I_s \cdot R_s + j\omega_1(I_s \cdot L_s + I_m \cdot L_m), \\
 0 &= I_r \cdot R_r + I_{r1} \frac{R_{r1}}{s} + j\omega_1(I_{r1} \cdot L_{r1} + I_m \cdot L_m), \\
 0 &= I_{r1} \frac{R_{r1}}{s} + I_{r2} \frac{R_{r2}}{s} + j\omega_1(I_{r1} \cdot L_{r1}) \\
 I_r &= I_{r1} + I_{r2} \\
 I_m &= I_s + I_r
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

Masina elektromagnetiline väljundvõimsus leitakse järgneva avaldis põhjal

$$P_{em} = m \cdot (I_r^2 R_r + I_{r1}^2 R_{r1} + I_{r2}^2 R_{r2}) \left(\frac{1-s}{s} \right) \tag{3.41}$$

Rootori nurkkiirus on arvatav valemiga:

$$\omega = \omega_s (1-s) = 2\pi \cdot f (1-s) / p, \tag{3.42}$$

kus ω_s on rootori sünkroonkiirus ja p pooluste arv. Mootori pöördemomendi saab arvutada kujul:

$$T = \frac{P_{em}}{\omega}. \tag{3.43}$$

Mootori kiiruse saab arvutada ajami põhivõrrandist

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_s, \tag{3.44}$$

Asünkroonmasina aseskeemi parameetrid saab määrata masina kataloogandmete või katsetustulemuste põhjal. Iga uue masina tüübiga viiakse läbi tüübikatsetused, mille kohta koostatakse katsetuste aruanne. Niisugused aruanded on elektrimasina ostjale saadaval tootja firmast.

Firma ABB elektrimasina tüübikatsetuste aruanne

Tabel 3.5

Tüübikatsetuste aruanne						Cert. No. OAD127-88/98-1			
Tellijä:						Masina tüüp: M2QA			
Customer ref.:						Sarjanumber: M2QA 132M4A			
Nimiandmed:						Tellimuse number.:			
Nimipinge, V	Nimisafedus, Hz	Nimivõimsus, kW	Nimivool, A	Nimikiirus, r/min	cosφ				
400 Y	50	7.5	14.4	1440	0.85				
Mähise isolatsiooniklass F									
Test	Pole	Liini U (V)	f (Hz)	Sisend I (A)	P1 (kW)	Väljund P2 (kW)	n (r/min)	cos φ	η (%)
Koormatud/soojenenud talitus	4	400	50	14.51	8.558	7.5	1438.5	0.8612	88.10
Tühijooksukatse	4	400	50	5.89	0.3088				
Seisva rootori ehk lühisekatse	4	400	50	96.48					
	4	100	50	17.24	1.542				
Takistus	Ohm/TE	Ümbrustemperatuur 31.5 °C		Isolatsioonitakistus		Liigpingekatse		Ülekoormuskatse	
Liin 1	1.215			>200MΩ		2320 V/min		Volts 400	
Liin 2	1.22							Amps 17.79	
Liin 3	1.215							p/min 1411	
Ületemperatuur	K	Meetod	Temperatuur		°C	Meetod	Mõõtemetod		
Mähis	78.6	1	Ümbrustemperatuur		35	2	1 Takistusmeetod		
			Kere		79	2	2 Termomeeter		
			Laagrid		81	3	3 Termopaar		
Toodetud ja katsetatud vastavalt standardile IEC 60034-1.									
On behalf of customer						Müra 58.4 LP dB (A)			
On behalf of manufacturer						Vibratsioon 1.1 (mm/s)			
Kuupäev 2000.12.22									

Alljärgnevalt on esitatud lihtsustatud aseskeemi (joonis 3.27) parameetrite arvutus mootori nimiandmete, alalisvoolukatse, lühisekatse ja tühijooksukatse tulemuste põhjal. Rootori pinnaefekti arvestava aseskeemi (joonis 3.29) parameetrid saab määrata eelnevalt loetletud katsete tulemuste ning katseliselt määratud mootori mehaanilise tunnusjoone põhjal.

Asünkroonmootori põhiandmete ja aseskeemi parameetrite arvutus

Asünkroonmasina nimiaandmed on järgmised:

Nimipinge, V	Nimisafedus, Hz	Nimivõimsus, kW	Nimivool, A	Nimikiirus, r/min	cosφ
400 Y	50	7.5	14.4	1440	0.85

Olulisemad katseandmed on koondatud tabelisse 3.6

Tabel 3.6

	Alalisvoolukatse	Lühisekatse	Tühijooksukatse
Pinge	35 V	100 V	400 V
Vool	15 A	17,24 A	5,89 A
Võimsus		1542 W	309 W
Sagedus		50 Hz	50 Hz
Kiirus		0	1495

Mootori nimilibistus

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04$$

Mootori nimikiirus

$$\omega_n = \frac{2\pi f_n}{p} (1 - s_n) = \frac{2\pi \cdot 50}{2} (1 - 0,04) = 150,7 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{60} 1440 = 150,7 \text{ s}^{-1}$$

Nimimoment

$$T_n = P_n / \omega_n = 7500 / 150,7 = 49,8 \text{ Nm}$$

Staatori nimivool on tavaliselt antud mootori sildil $I_n = 14,4 \text{ A}$. Staatori nimivoolu saab arvutada ka muude nimiaandmete kaudu, näiteks:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{7500}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,88 \cdot 0,86} = 14,3 \text{ A}$$

Rootoriahela aktiivtakistuse saab määrata mootori nimivõimsuse kaudu või masina lühisekatse tulemustest:

$$R_r = \frac{P_n \cdot s_n}{3(1 - s_n) I_n^2} = \frac{7500 \cdot 0,04}{3 \cdot (1 - 0,04) \cdot 14,4^2} = 0,502 \Omega$$

$$R_{\text{lühis}} = \frac{P_{\text{lühis}}}{I_{\text{lühis}}^2} = \frac{1542 / 3}{17,24^2} = 1,73 \Omega$$

$$R_r' = R_{\text{lühis}} - R_s = 1,73 - 1,22 = 0,51$$

Staatori aktiivtakistuse saab määrata alalisvoolukatsega $R_s = U_{DC} / I_{DC}$ (vt. tüübikatsetuste tabel) või arvutada mootori nimiaandmetest

$$R_s = \frac{P_n (1 - \eta)}{3 \eta I_n^2} - R_r = \frac{7500 (1 - 0,88)}{3 \cdot 0,88 \cdot 14,4^2} - 0,502 = 1,644 - 0,502 = 1,14 \Omega$$

$$Z_{\text{lühis}} = \frac{U_{\text{lühis}}}{I_{\text{lühis}}} = \frac{100 / \sqrt{3}}{17,24} = 3,35 \Omega$$

$$L_{\text{lühis}} = \frac{\sqrt{Z_{\text{lühis}}^2 - R_{\text{lühis}}^2}}{\omega_s} = \frac{\sqrt{3,35^2 - 1,73^2}}{2\pi \cdot 50} = 0,0091 \text{ H}$$

Aseskeemi ekvivalentne induktiivsus jaguneb staatori ja rootori vahel suhtearvudes 2/5 staatoris ja 3/5 rootoris (NEMA design B)

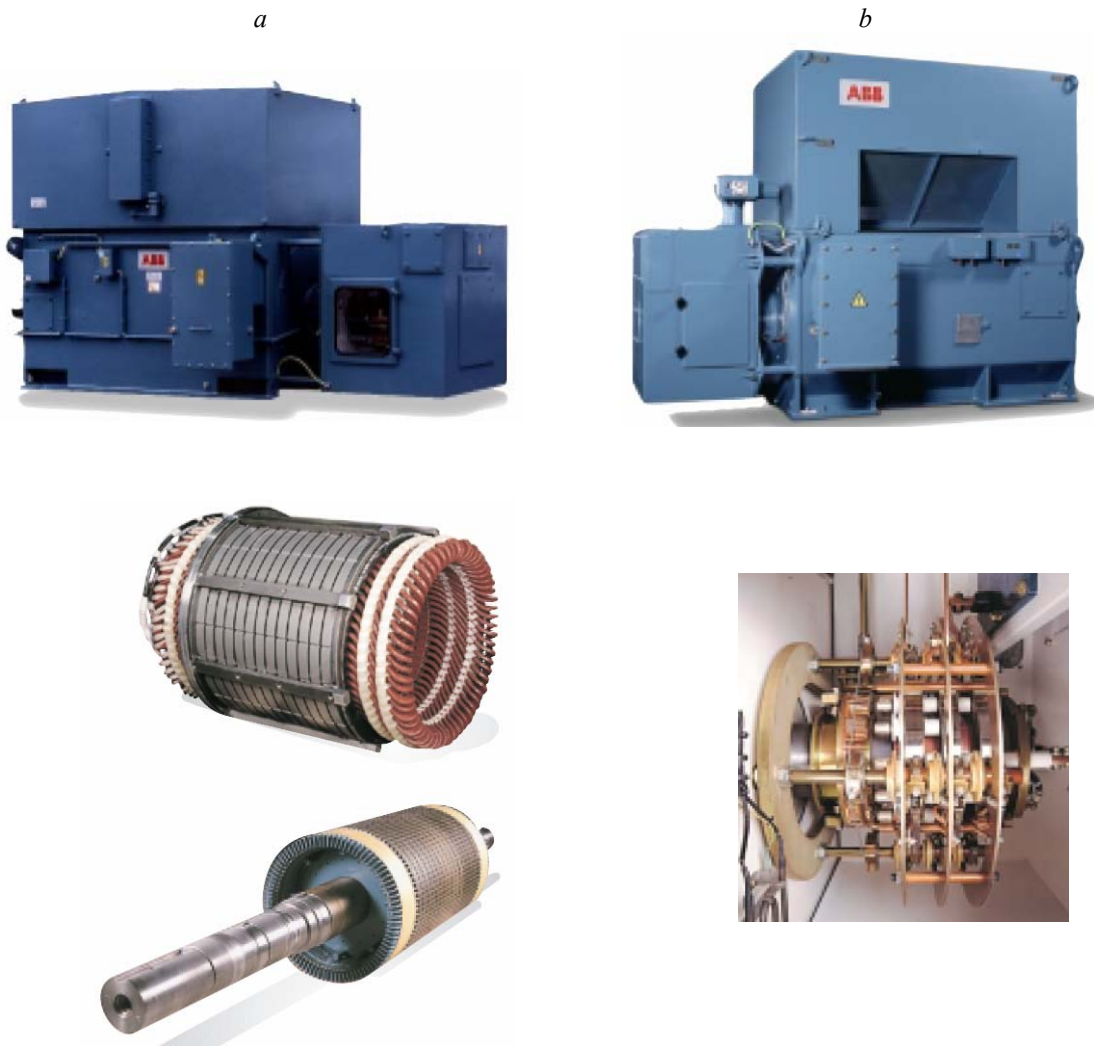
$$L_s = \frac{2}{5} L_{\text{lühis}} = 0,00364 \text{ H}$$

$$L_r = \frac{3}{5} L_{\text{lühis}} = 0,00546 \text{ H}$$

Mootori põhiinduktiivsuse saab määrata tühijooksukatse tulemuste põhjal

$$L_m = \frac{U_{\text{tüh}}}{2 \cdot 2\pi f_{\text{tüh}} \cdot I_{\text{tüh}}} = \frac{400}{2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 5,89} = 0,108 \text{ H}$$

Asünkroonmasina lihtsustatud aseskeem kehtib piisava täpsusega faasirootoriga asünkroonmasina jaoks, milles rootori pinnaefekt puudub. Faasirootoriga asünkroonmootori staator ja rootor (ABB) on näidatud joonisel 3.30.



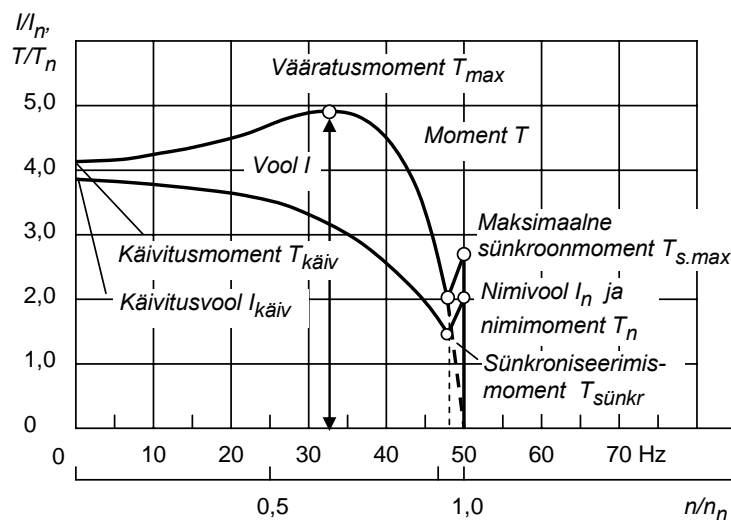
Joonis 3.30. ABB võimsad kõrgepingelised faasirootoriga asünkroonmootorid vesijahutusega AML tüüpi mootor (*a*) ja õhkjahutusega AMK tüüpi mootor (*b*). Mootorite võimsus on 0,14...8,5 MW ja võlli kõrgus 400...710 mm. Faasirootoriga asünkroonmootori staator ja rootor ning kontaktrõngaste sõlm.

3.7. Reluktantsmootori ehitus ja omadused

Reluktantsmootorid on ergutusmähiseta väljepoolustega sünkroonmasinad, mida aktiivse ergutusega sünkroonmasinatele nimetatakse ka reaktiivseteks sünkroonmasinateks. Ühendavad endas nii asünkroonmootorite kui ka sünkroonmootorite omadusi. Käivitusprotsessis ja liigkoormuse puhul töötab reluktantsmootor nii nagu asünkroonmootor, püsitalitluses, s. o. pärast käivitust ja juhul kui koormusmoment pole liiga suur $T < 1,2 T_n$, aga samuti kui sünkroonmootor. Viimasel juhul võrdub mootori libistus nulliga $s = 0$. Need duaalsed omadused on jälgitavad ka reluktantsmootori kiiruse – momendi tunnusjoontelt (joonis 3.31). Joonisel esitatud kõverat tuleb käsitleda kui reluktantsmootori üldist mehaanilist tunnusjoont, mis konkreetse masina puhul võib esitatust oluliselt erineda.

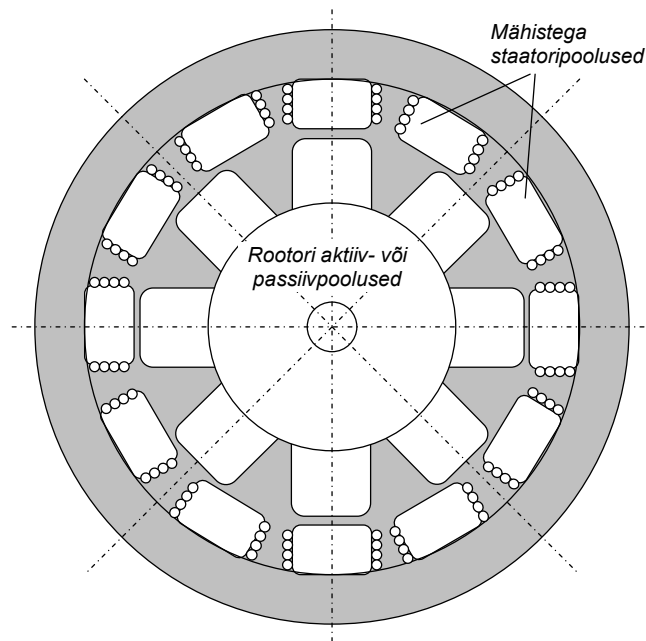
Reluktantsmootori staator on ehitatud samuti nagu asünkroonmootori staator, kuid rootoril on selgelt määratletud asetusega poolused. Rootori radiaalsuunaline magnetiline takistus (reluktants) muutub suurtes piirides. Magnetväli on kontsentreeritud pooluste piirkondadesse. Sarnaselt asünkroonmootorile asuvad uuretes valualumiiniumist lühismähised. Need mähised toimivad ainult asünkroontalitluse puhul. Sünkroontalitluse korral lühismähistes voolu ei indutseerita ja masin ei ergutu. Staatorimähis peab arendama rootori magneetamiseks reaktiivvõimsust. See on rootori õhupilu tõttu väga suur, sest õhupilu määrab nii masina võimsusteguri kui ka kasuteguri väärtused.

Reluktantsmootoril on rida olulisi puudusi ja kasutuspiiranguid. Esiteks, suur reaktiivenergia tarve, mis sõltub pooluste arvust ja masina võimsusest. Otsevõrkulülituses on reluktantsmootori võimsustegur $\cos \varphi = 0,4 \dots 0,5$ ja kasutegur $\eta = 0,55 \dots 0,8$. Järelikult tuleb reluktantsmootorit toitva sagedusmuunduri võimsus valida vähemalt 60 % suurem kui sama väljundvõimsusega asünkroonmootori puhul. Teiseks, reluktantsmootori lubatav ülekoormusmoment on ainult $1,2 T_n$. Kui tegelik moment on suurem, siis mootor väärtub sünkroontalitlusest asünkroontalitluse (vt. joonis 3.31). Mootorit saab viia tagasi sünkroontalitlusele ainult koormusmomenti vähendamise alla sünkroonseerimismomendi $T_{sünkr}$ (pull-in moment), mille puhul mootor siirdub asünkroontalitlusest tagasi sünkroontalitlusele.



Joonis 3.31. Reluktantsmootori kiiruse-momendi-tunnusjoon

Samm-mootorid erinevad sünkroonmootoritest vaid selle poolest, et pöörlev magnetväli tekitatakse neis mitte kolmefaasilise siinuspingega, vaid järjestikuliste impulsside jaotamisega masina mähistele. Seetõttu võib impulsside väikese sageduse puhul samm-mootori liikumine olla katkendlik. Samm-mootorid sobivad kasutamiseks väikese võimsusega positsioonjuhtimisega ajamites, mil mootorile antud impulsside arv on võrdeline rootori pöördenurga (ehk asendi) muutusega ning ajami positsioonimiseks pole vaja kasutada täiendavat asendiandurit. Sammu vähendamiseks ja positsioonimistäpsuse suurendamiseks valmistatakse samm-mootorid suure pooluste arvuga. Suurema võimsuse korral pole samm-mootorite kasutamine otstarbekas nende väikese kasuteguri tõttu. Oma tööpõhimõttelt jagunevad samm-mootorid püsिमagnetergutusega mootoriteks, väljepoolustega mootoriteks ning nende mõlema kombinatsiooniga hübriidmootoriteks.



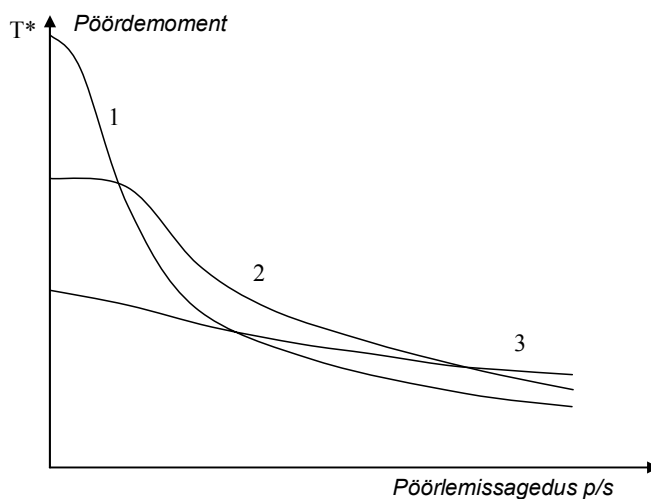
Joonis 3.32. Samm-mootori ristlõikepind

Samm-mootorid kujutavad endast mitmepooluselisi elektrimasinaid, mille staatorimähist kommuteeritakse pooljuhtkommutaatoriga. Rotooril mähis puudub ning poolused tekitatakse seal ebaühtlase radiaalsuunalise magnetilise takistusega (passiivrootor), püsिमagnetitega (aktiivrootor) või mõlema põhimõtte kombineerimisega. Passiivrootoriga samm-mootori tööpõhimõte vastab reluktantsmootori talitlusele. Aktiivrootoriga samm-mootor töötab aga sarnaselt püsिमagnetergutusega sünkroonmootoriga.

Joonisel kujutatud samm-mootoril on 12 staatoripoolust. Kolmefaasilise toitesüsteemi puhul on igasse faasi lülitatud 4 staatorimähist. Rotooril on 8 poolust. Samm-mootorit kommuteeritakse täissammu, poolsammu või väiksemate osade nn mikrosammude kaupa. Täissammu suuruseks on antud juhul 15° . Poolsammu kaupa kommuteerimisel pöörduv rootor ühes lülitustsükli $7,5^\circ$ võrra. Sammu jagamine osadeks saavutatakse pooluste mähiste voolude jagamisega. Sõltuvalt staatoripooluste kommuteerimise järjekorrast pöörleb rootor kas päri- või vastupäeva.

Samm-mootori poolt arendatav moment sõltub lülitussagedusest ja järelkult ka mootori pöörlemiskiirusest. Suurema lülitussageduse puhul moment väheneb.

Samm-mootori staatorimähiseid saab ühendada faasidesse ühendada kas rööbiti või jadamisi. Vastavalt ühendusele kujuneb välja mähise induktiivsus ja induktiivtakistus ning sellest tulenevalt ka moment. Mähiste erinevaid ühendusviise võrreldes võib väita, et mähiste jadaühendusega mootorid arendavad suuremat momenti väikestel kiirustel, rööpühendusega mootorid aga suurematel kiirustel



Joonis 3.33. Samm-mootori momendi tunnusjoon

3.8 Elektrimasina vektorkirjeldus

Elektrimasina talitluse dünaamika täpne kirjeldamine on elektriagamite teooria üks keerukamaid probleeme. Vastavaid uuringuid alustati juba pool sajandit tagasi. Laiem huvi nende probleemide vastu tekkis pärast ungari teadlaste *P.K. Kovaci* ja *J. Raczi* 1959. aastal avaldatud ulatuslikku monograafiat, mis käsitles vahelduvvoolumasinate siirdeprotsesse. Tänapäevaks on üle 30 aasta möödunud sellest, kui hakati mõtlema asünkroonmootorite dünaamika juhtimisele ning võeti kasutusele nende vektormudelid. Vektorjuhtimise põhiideed sündisid ja arenesid 70. aastate algul. Selle ala pioneeriks võib lugeda *F. Blaschket*. Tehniliste raskuste tõttu need ideed esialgu laiemat kõlapinda ei leidnud. Vektorjuhtimise idee hakkas realiseeruma 80. aastatel, mil ajamite juhtimiseks võeti kasutusele piisava jõudlusega mikroprotsessorseadmed.

Kolmefaasilise asünkroonmootori staatori faasipingete hetkväärtused arvutatakse üldtuntud valemitega:

$$\begin{aligned}u_{s1}(t) &= U_s \cdot \sin(\omega_1 t), \\u_{s2}(t) &= U_s \cdot \sin(\omega_1 t + 2\pi/3), \\u_{s3}(t) &= U_s \cdot \sin(\omega_1 t + 4\pi/3),\end{aligned}\tag{3.45}$$

kus U_s on staatoripinge amplituudväärtus ning ω_1 selle nurksagedus.

Kolmefaasilise pinge ruumivektor elektrimasinas leitakse faasipingete summeerimisega eeldusel, et pingevektorid on ruumis 120° võrra nihutatud.

$$u_s(t) = u_{s1}(t) \cdot \cos \alpha + u_{s2}(t) \cdot \cos(\alpha - 2\pi/3) + u_{s3}(t) \cdot \cos(\alpha - 4\pi/3),\tag{3.46}$$

kus $u_s(t)$ on vektori moodul ajahetkel t ning α selle nurk pöörlemistasandil.

Sama võrrandi saab esitada komplekskujul järgmiselt:

$$u_s(t) \cdot e^{j\alpha} = u_{s1}(t) + u_{s2}(t) \cdot e^{j2\pi/3} + u_{s3}(t) \cdot e^{j4\pi/3}\tag{3.47}$$

Analoogiliselt võib kirjutada ka staatorivoolu vektori

$$i_s(t) \cdot e^{j\alpha} = i_{s1}(t) + i_{s2}(t) \cdot e^{j2\pi/3} + i_{s3}(t) \cdot e^{j4\pi/3}\tag{3.48}$$

polaarkoordinaadistikus või kahe ristuva, reaali- ja imaginaarkomponendi abil ristkoordinaadistikus. Lisaks sellele saab vektori esitada ka kombineeritult, mooduli ning kahe suunda määrava ristsuunalise suunavektori abil. Nendeks võivad olla näiteks ühikvektori siinus- ja koosinuskomponendid. Kaks teineteisega ristuvat, siinus- ja koosinuskõvera järgi ajas muutuvat vektori komponenti kirjeldavad ruumis teatud nurkkiirusega pöörlevat vektorit. Märkimine, et pöörleva välja tekitavad ka kolm üksteisega ruumis 120° nurga all paiknevad ning ajas $1/3$ perioodi võrra nihutatud siinuslainet, nagu see toimub enamikus kolmefaasilistes mootorites. Pöörleva välja tekitamiseks võib leida veel teisigi mähiste ruumilise ning nende voolude ajalise nihutamise kombinatsioone. Kõikidest nendest lihtsaim on aga 90° võrra ruumis nihutatud mähistega ning siinus-koosinuslainetega, s. o. kahefaasiline mootor. Osutub, et suvalise mähiste arvuga ning nende voolude ajalise nihutusega pöörleva väljaga elektrimasina võib suhteliselt lihtsate võtetega taandada ekvivalentseks kahefaasiliseks

masinaks. Selle teisenduse põhiideeks on see, et kõigepealt leitakse pöörleva välja kompleksvektor polaarkoordinaadistikus, mis seejärel lahutatakse ristsuunalisteks komponentideks. Võimalik on ka vastupidine teisendus. Tänu teisendustele saab suvalise faaside arvuga pöörleva väljaga elektrimasinaid ning nendes toimuvaid füüsikalisi protsesse uurida ekvivalentse **kahefaasilise elektrimasina mudeli** abil.

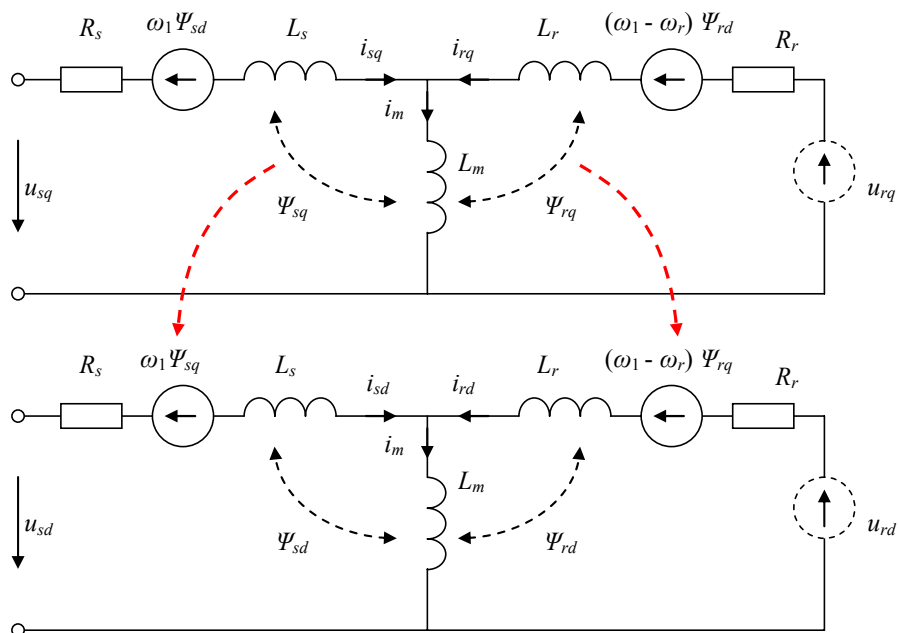
Elektrimasina dünaamika kirjeldamist alustatakse kahest omavahel seotud ühefaasilisest aseskeemist, mida toidetakse kahefaasilise vastavalt siinus-koosinuspingega. Neid võib eraldi nimetada ka põikivälja ja pikivälja aseskeemideks. Primaarväli pöörleb nurkkiirusega ω_1 , rootori nurkkiirus on ω_r .

Staatori põiki ja pikivälja aheldusvood

$$\begin{aligned}\psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m (i_{sq} + i_{rq}) \\ \psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m (i_{sd} + i_{rd}) \\ \psi_s &= \sqrt{(\psi_{sq}^2 + \psi_{sd}^2)}\end{aligned}\tag{3.50}$$

Rootori põiki- ja pikivälja aheldusvood

$$\begin{aligned}\psi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m (i_{sq} + i_{rq}) \\ \psi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m (i_{sd} + i_{rd}) \\ \psi_r &= \sqrt{(\psi_{rq}^2 + \psi_{rd}^2)}\end{aligned}\tag{3.51}$$



Joonis 3.34. Elektrimasina kahefaasiline aseskeem

Pingete diferentsiaalvõrrandite süsteem:

$$\begin{aligned}
u_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_1 [L_s \cdot i_{sd} + L_m(i_{sd} + i_{rd})] + L_m \left(\frac{di_{sq}}{dt} + \frac{di_{rq}}{dt} \right) \\
u_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \omega_1 [L_s \cdot i_{sq} + L_m(i_{sq} + i_{rq})] + L_m \left(\frac{di_{sd}}{dt} + \frac{di_{rd}}{dt} \right) \\
u_{rq} &= 0 = L_m \left(\frac{di_{sq}}{dt} + \frac{di_{rq}}{dt} \right) + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + (\omega_1 - \omega_r) [L_r \cdot i_{rd} + L_m(i_{sd} + i_{rd})] + R_r \cdot i_{rq} \\
u_{rd} &= 0 = L_m \left(\frac{di_{sd}}{dt} + \frac{di_{rd}}{dt} \right) + L_r \frac{di_{rd}}{dt} + (\omega_1 - \omega_r) [L_r \cdot i_{rq} + L_m(i_{sq} + i_{rq})] + R_r \cdot i_{rd}
\end{aligned} \tag{3.52}$$

Elektrimasina moment, rootori pöörlemiskiirus ja pöördenurk arvutatakse võrranditest

$$\begin{aligned}
T &= \frac{3p}{2} [\psi_{sd} i_{sq} + \psi_{sq} i_{sd}] = \frac{3p}{2} \frac{L_m}{L_m + L_{rp}} [\psi_{rd} i_{sq} + \psi_{rq} i_{sd}] \cong T_{m0} [i_{sq} i_{rd} + i_{sd} i_{rq}] \\
J \frac{d\omega_r}{dt} &= T - T_k \\
\frac{d\varepsilon_r}{dt} &= \omega_r
\end{aligned} \tag{3.53}$$

Kaks esimest võrrandit on staatoriahela põiki- ja pikivälja pingevõrrandid, kaks järgnevat rootoriahela põiki- ja pikivälja pingevõrrandid. Staatori pingevõrrandites on esimene liige pingelang aktiivtakistusel, seejärel omainduktsiooni elektromotoorjõud puisteinduktiivsusel, ristuva telje vastastikusest aheldusvoost tingitud elektromotoorjõud ning viimasena põhiinduktiivsuse elektromotoorjõud. Rootori pingevõrrandites on esimene liige Põhiinduktiivsuse elektromotoorjõud, seejärel rootori puisteinduktiivsuse omainduktsiooni elektromotoorjõud, ristuva telje vastastikusest aheldusvoost tingitud elektromotoorjõud ning viimasena rootori aktiivtakistuse pingelang.

Võrrandid 3.52 ja 3.53 on asünkroonmootori dünaamikavõrrandid, mida võib vaadelda kui mootori dünaamikamudelit ja esitada pärast mitmeid teisendusi ja muutujate asendusi (mida siinkohal ei näidata) arvutusteks sobival kujul järgmiselt:

$$\begin{aligned}
\tau_s' \frac{dx_s}{dt} &= -x_s + \frac{1}{s_{ms}} \frac{\omega_1}{\omega_0} y_s + \frac{1}{1 + \sigma_r} x_r + \frac{1}{s_{ms}} \frac{U_s(t)}{U_{s0}}; \\
\tau_s' \frac{dy_s}{dt} &= -\frac{1}{s_{ms}} \frac{\omega_1}{\omega_0} x_s - y_s + \frac{1}{1 + \sigma_r} y_r; \\
\tau_r' \frac{dx_r}{dt} &= \frac{1}{1 + \sigma_s} x_s - x_r + \frac{1}{s_{mr}} \frac{\omega_2}{\omega_0} y_r; \\
\tau_r' \frac{dy_r}{dt} &= \frac{1}{1 + \sigma_s} y_s - \frac{1}{s_{mr}} \frac{\omega_2}{\omega_0} x_r - y_r; \\
\tau_m \frac{d(\omega/\omega_0)}{dt} &= 2(1 + \sigma_s)(y_s \cdot x_r - x_s \cdot y_r) - \frac{T_k}{T_{m0}}; \\
\frac{\varepsilon_0}{\omega_0} \frac{d(\varepsilon/\varepsilon_0)}{dt} &= \frac{\omega}{\omega_0}.
\end{aligned} \tag{3.54}$$

Kus x_s, x_r, y_s ja y_r on staatori ja rootori põiki- ja pikivälja volukomponentidega võrdelised muutujad, σ_s ja σ_r on staatori- ja rootormähise puistetegurid ning $\sigma = 1 - 1/(1 + \sigma_s)(1 + \sigma_r)$ on summaarne puisteveo tegur. Tegurid

$$s_{ms} = \frac{R_s}{\omega_0 \sigma L_s} = \frac{1}{\omega_0 \tau'_s};$$

$$s_{mr} = \frac{R_r}{\omega_0 \sigma L_r} = \frac{1}{\omega_0 \tau'_r}$$
(3.55)

Staatori ja rootoriahela ajakonstandid ja mootori mehaaniline ajakonstant,

$$\tau'_s = \frac{\sigma \cdot L_s}{R_s};$$

$$\tau'_r = \frac{\sigma \cdot L_r}{R_r},$$

$$\tau_m = \frac{J \cdot \omega_0}{T_{m0}}$$
(3.56)

Maksimaalmoment T_{m0} arvutatakse valemiga:

$$T_{m0} = \frac{3(1-\sigma)}{2\sigma} \cdot \frac{U_{s0}^2}{\omega_0^2 \cdot L_s}.$$
(3.57)

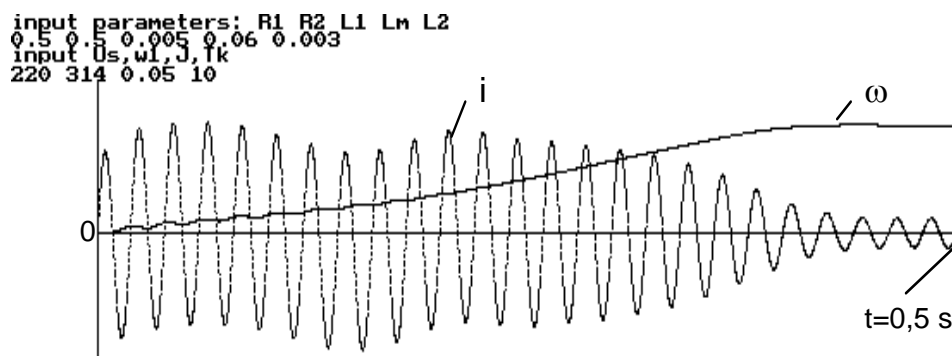
Staatorivool

$$i_s(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{s0}}{\omega_0 \sigma L_s} \left[\left(x_s - \frac{1}{1 + \sigma_r} x_r \right) \cos \omega_1 t - \left(y_s - \frac{1}{1 + \sigma_r} y_r \right) \sin \omega_1 t \right].$$
(3.58)

Mootori moment

$$T = 2(1 + \sigma_s) T_{m0} (y_s \cdot x_r + x_s \cdot y_r).$$
(3.59)

Võrrandite 3.54...3.59 järgi arvutatud asünkroonmootori käivitusprotsess on näidatud joonisel 3.33. Lisagem, et kirjeldatud mudeli järgi võib arvutada ka voolu ja kiiruse siirdeprotsessid koormuse järsul suurenemisel või vähenemisel. Mootori vektorkirjeldust ehk vektormudelit kasutatakse ajami juhtimiseks

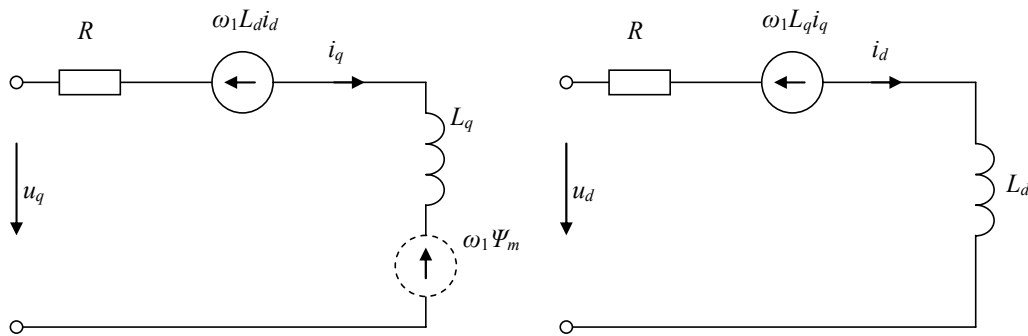


Joonis 3.35. Asünkroonmootori dünaamikamudeli järgi arvutatud käivitusprotsess

Proovida Simploreri programmi

Sünkroonmasina vektormudel.

Sünkroonmasina puhul on ergutusvoog rootori asendiga seotud ning vektormudel on märksa lihtsam kui asünkroonmasina puhul. Sünkroonmasina kahefaasiline aseskeem on näidatud joonisel 3.36.



Joonis 3.36. Sünkroonmasina vektorkirjelduse aseskeem

$$\begin{aligned}
 u_q &= R \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_1 L_d i_d + \omega_1 \Psi_m \\
 u_d &= R \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_1 L_q i_q \\
 T &= \frac{3p}{2} [\Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]
 \end{aligned}
 \tag{3.60}$$

Reluktantsmootori puhul magneetimisergutus puudub ja

$$\begin{aligned}
 u_q &= R \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_1 L_d i_d \\
 u_d &= R \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_1 L_q i_q \\
 T &= \frac{3p}{2} (L_d - L_q) i_d i_q
 \end{aligned}$$