Bestämning av verkningsgrad och förluster i en asynkronmaskin enligt IEC 60034-2-1

Andersson, Samuel Åkerström, Anders

2010-06-02

Abstract

With the introduction of IEC 60034-2-1:2007 as the new standard for determining efficiency and losses in rotating electric machines some old calculation methods are no longer considered accurate enough. This is especially clear in the case of the much debated determination of stray load losses, which no longer can be specified as 0.5% of input power, but now instead should be determined from the so called residual losses. The residual losses are what is left when the resistive, iron and friction and windage losses have been subtracted from the difference between input and output power.

This master thesis work has focused on working out a new routine for testing induction machines according to IEC 60034-2-1:2007, based on the equipment and possibilities available at Myrén & Co. The routine has been tested on site but determination of the quality of the whole test has been difficult due to a malfunctioning torque transducer which has caused quite a lot of uncertainty regarding the generated output power. The torque transducer should be tested before the results from the new routine can finally be evaluated. Results not dependent on torque measurement, however, have been looking as expected in terms of both size and behavior.

Sammanfattning

När standarden IEC 60034-2-1:2007 introducerades som den nya standarden för att bestämma verkningsgrad och förluster i roterande elektriska maskiner medförde detta att vissa äldre metoder inte längre anses som tillräckligt exakta. Detta gäller speciellt för bestämmandet av tillsatsförluster vilka inte längre kan sägas vara 0,5% av ineffekten utan skall framöver bestämmas utifrån residualförlusterna. Residualförlusterna är de förluster som är kvar när de resistiva förlusterna, järnförlusterna och mekaniska förluster har subtraherats från skillnaden mellan in- och uteffekt.

Detta examensarbete har fokuserat på att utarbeta en ny rutin för tester av asynkronmaskiner enligt IEC 60034-2-1:2007, baserad på utrustning och testmöjligheter hos Myrén & Co. Testgången har genomförts på företaget, men tyvärr är en bedömning av tillförlitligheten för testet begränsad pga. att den momentgivare som användes inte gav helt entydiga värden, vilket påverkade uteffektsberäkningarna. Momentgivaren bör kontrolleras innan resultaten från rutinen kan utvärderas slutgiltigt. Resultaten som inte härrör från momentmätaren har dock sett ut som förväntat både vad gäller storlek och beteende.

Innehållsförteckning

A	bstrac	:t		1
Sa	amma	nfattni	ng	1
1	Int	trodukt	tion	4
2	As	ynkron	maskinen	5
	2.1	Asyr	nkronmaskinens uppbyggnad	5
	2.2	Asyr	nkronmaskinens ekvivalenta schema	8
3	Fö	rluster	i asynkronmaskinen1	0
	3.1	Resi	stiva förluster1	0
	3.2	Järn	förluster1	1
	3.2	2.1	Hysteresförluster1	1
	3.2	2.2	Virvelströmsförluster1	2
	3.3	Mek	aniska förluster1	3
	3.4	Tills	atsförluster1	3
	3.5	Verk	ningsgrad1	4
4	Má	ätning	och beräkning av förluster1	5
	4.1	Resi	stiva förluster i stator och rotor1	5
	4.1	1.1	Statorförluster1	5
	4.1	1.2	Rotorförluster1	5
	4.2	Mek	aniska förluster och järnförluster1	6
	4.3	Tills	atsförluster1	8
	4.3	3.1	Beräkning utifrån lasttester1	8
	4.3	3.2	Tillsatsförluster utifrån schablonvärden2	0
	4.4	Alte	rnativa mätmetoder2	0
	4.4	4.1	Kalorimetrimetoden2	0
	4.4	4.2	Eh-star-metoden	1
5	Pra	aktiskt	test på en 110kW asynkronmaskin2	3
	5.1	Mät	uppställning2	3
	5.1	1.1	Mätobjekt2	4
	5.1	1.2	Utrustning2	4
	5.2	Utfö	rda tester2	5
	5.2	2.1	Kallresistansmätning2	5

	5.2.2	Tomgångsprov	25
	5.2.3	Avsvalningskurva	26
	5.2.4	Lasttester	26
5	.3 Erhå	ållna förluster och verkningsgrad	26
	5.3.1	Konstanta förluster	26
	5.3.2	Stator- och rotorförluster	29
	5.3.3	Tillsatsförluster	31
6	Diskussio	on	34
7	Ny testru	ıtin	36
8	Slutsatse	r	38
9	Referens	er	39
Арр	endix A - f	förkortningar	41
Арр	endix B - r	nätdata	43

1 Introduktion

För en tillverkare och/eller försäljare av elektriska maskiner är det av största vikt att känna till de olika produkternas effekt och förluster och därigenom deras verkningsgrad. Ju större förluster desto sämre verkningsgrad och därmed även en större kostnad för kunderna som i så fall kommer att betala för energi de inte använder. Det ligger alltså i tillverkarens intresse att förlusterna är både så låga och så exakt angivna som möjligt.

Den vanligaste typen av växelströmsmotor är asynkronmaskinen. Den finns i alla möjliga storlekar och har ett stort spann av olika användningsområden.

Effektförlusterna i en asynkronmaskin kan delas upp i fyra komponenter:

- Resistiva förluster i stator och rotor
- Järnförluster i kärnan
- Mekaniska förluster
- Tillsatsförluster

När det gäller de tre första punkterna råder det ingen större oenighet om hur de ska bestämmas men när det gäller tillsatsförlusterna är det annorlunda.

Ända sedan IEC (International Electrotechnical Commission) satte ihop sin första standard för provningsmetoder för bestämning av förluster och verkningsgrad hos elektriska maskiner, IEC 34-2, 1972 så har den kritiserats för sättet som används för att ange tillsatsförluster i asynkronmaskiner. Under lång tid så angavs dessa enbart med ett schablonvärde på 0,5 % av den tillförda effekten - helt oavsett uteffekt, hastighet, spänning eller någon annan maskinparameter [1]. Många studier har utförts inom detta område över de senaste 60 åren och resultatet kan inte tolkas på annat sätt än att dessa 0,5 % saknat stabil vetenskaplig grund redan när IEC 34-2 publicerades första gången [1][2].

Det dröjde dock 35 år innan avsnittet om tillsatsförluster ändrades, i och med den uppdaterade IEC 60034-2-1:2007 gick man ifrån metoden med ett schablonvärde. I den nya standarden har man ersatt detta med en metod som liknar den som finns i den motsvarande amerikanska standarden, IEEE 112. När standarden ändrats så behöver även testmetoderna uppdateras för att vara enligt standard och det är det som det här arbetet har handlat om.

Alla tester har utförts hos Myrén & Co på deras testrigg och enligt IEC 60034-2-1:2007. Företaget Myrén & Co handlar med renoverad elutrustning men framförallt elmotorer, växelmotorer, generatorer, omformare, och transformatorer. De agerar globalt och i deras verkstad har de kapacitet att renovera och modifiera efter önskemål från kunder. Myrén & Co levererar även helhetslösningar inom alla typer av roterande drifter med tillhörande elektrisk matning, styrning och mekaniska kopplingar mot befintlig apparatur. De utför konstruktion av testriggar för bland annat elmotorer och transformatorer. De provkör även elmotorer i sitt eget provrum där de kan köra med full spänning upp till 690V, 11kV, 3MVA och 50/60Hz. Objektet kan belastas med ca 200kW men i vissa fall ända upp till 1MW.

Rapporten kommer att börja med att gå igenom asynkronmaskinen och de olika förlusterna som förekommer i en sådan, gå vidare till bästa sättet att mäta dessa enligt IEC 60034-2-1:2007 för att sedan redovisa praktiska försök och utvärdering av metod och mätutrustning.

2 Asynkronmaskinen

Asynkronmaskinen är den vanligaste typen av elektrisk maskin. Asynkronmaskiner finns i alla möjliga storlekar från enfasmaskiner på några enstaka watt upp till stora trefasmaskiner på flera megawatt. De vanligaste användningsområdena är att driva pumpar, fläktar, kompressorer och transportband. Det är även den vanligaste typen av generator i vindkraftverk och förekommer även som motor i elbilar. Asynkronmaskiner har länge dominerat applikationer där jämn hastighet är ett krav men har också slagit sig in i varvtalsstyrda applikationer i takt med att kraftelektroniken utvecklats. De är billigare än likströmsmaskiner fastän det går åt ungefär lika mycket koppar för att producera samma effekt och de kommer att vara av samma storlek och vikt [3]. En annan sak som gjort asynkronmaskiner så populära är deras höga verkningsgrad, nuförtiden är det inte ovanligt med en verkningsgrad kring 95% för nya motorer med en märkeffekt på något hundratal kW eller mer.

2.1 Asynkronmaskinens uppbyggnad

För en enklare trefas asynkronmaskin ser statorn ut enligt figur 2.1. Varje fas är kopplad till två lindningar vilka bildar en magnetisk nord- och sydpol och benämns som ett polpar. De tre polparen är förskjutna 120°.



Figur 2.1a: Principskiss av statorn i en asynkronmaskin med 6 st poler.



Figur 2.1b: Exempel på hur en riktig stator kan se ut.

5

När maskinen ansluts till nätet uppkommer ett roterande magnetfält i statorn, vilket är ett konstant, roterande magnetfält med konstant storlek. Då magnetfältets rotationshastighet är konstant kommer en ideal maskin utan friktion att rotera med detta varvtal vilket kallas det synkrona varvtalet. Asynkronmaskiner kan konstrueras för olika varvtal enligt ekvation 2.1 där n_s är rotationshastigheten i varv per minut, f är nätfrekvensen och p är polpartalet. Polpartalet i för statorn i figur 2.1a är 3.

$$n_s = 120 * f/p$$
 (2.1)

Asynkronmaskinens rotor har ofta inga lindningar i ordets sanna bemärkelse utan har en så kallad burlindning med koppar eller aluminiumstavar vilka är kortslutna i bägge ändarna, vilket kan ses i figur 2.2. Stavarna ligger i spår i den laminerade järnkärnan. Oftast är burlindningen lätt skruvad för att minska risken för ett pulserande moment och oljud.



Figur 2.2a: Rotorburlindningen till en asynkronmaskin.



Figur 2.2b: Ett exempel på en verklig rotor. Lägg märke till skruvningen av rotorn.

Nyckeln till att förstå hur en asynkronmaskin fungerar är att förstå sambandet mellan hastighet och kraft. Magnetfältet i luftgapet roterar med ett konstant varvtal, det synkrona varvtalet, som beror av frekvensen i elnätet och antalet poler i maskinen, se ekvation 2.1. Om rotorn inte roterar med exakt samma varvtal kommer skillnaden i varvtal göra att strömmar induceras i rotorn, ju större skillnad i

varvtal desto större strömmar. Dessa strömmar ger upphov till ett magnetfält i rotorn och det är detta som tillsammans med det synkrona magnetfältet ger upphov till den vridande kraften i motorn. Förhållandet mellan det synkrona magnetfältets rotationshastighet och rotorns hastighet är den så kallade eftersläpningen:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \tag{2.2}$$

där ω_s är den synkrona hastigheten och ω_r är den faktiska hastigheten på rotorn.

Då magnetiseringen kommer ifrån statorn är behovet av ett litet luftgap mellan rotor och stator stort. Detta för att det inte skall krävas alltför höga strömmar i statorn för att magnetisera rotorn då höga strömmar i statorn ger höga förluster och därmed lägre verkningsgrad. Asynkronmaskiner med märkeffekt upp till 100 kW har luftgap på mindre än en millimeter [4].

Inkoppling av en trefas asynkronmaskin kan normalt ske vid två olika spänningar beroende på om inkopplingen sker med Δ -koppling eller Y-koppling. Hur man kopplar in motorn gör ingen skillnad i prestanda utan påverkar endast matningsström och –spänning. För en Y-koppling krävs att matningsspänningen är $\sqrt{3}$ gånger större än för en Δ -koppling, som i sin tur drar en fasström som är $\sqrt{3}$ gånger större än för Y-kopplingen. Den totala inmatade effekten är alltså lika stor i båda fallen. I figur 2.3 visas hur inkoppling sker i de två fallen och figur 2.4 visar ett exempel på märkplåt. På märkplåten kan man se synkront varvtal, märkeffekt, effektfaktor, samt matningsström och -spänning för Y- och Δ -koppling. Siffrorna på respektive sida av "/"-tecknet gäller vid inkoppling för 50 eller 60 Hz.



Figur 2.3: Delta- och Y-koppling

Motor 3~		Тур: ххххх
50/6 4/4.1	0 Hz 3 kW	2860/3460 rpm cos(φ)=0.90
Y	400/460 V	8.1/8.1 A
Δ	230/260 V	14.0/14.0 A
No: xxxxxx		30 kg

Figur 2.4: Exempel på märkplåt för en asynkronmaskin.

2.2 Asynkronmaskinens ekvivalenta schema

Uppbyggnaden av det ekvivalenta schemat kommer här nedan att härledas utgående ifrån statorkretsen. Resistansen R_s i statorlindningarna är lika stor i alla faserna. All pålagd spänning som inte förbrukas i statorresistansen kommer att ge upphov till flöde i statorlindningarna. Detta kan skrivas som

$$v_s^s - R_s i_s^s - \frac{d\Psi_s^s}{dt} = 0$$
(2.3)

där i_s^s och Ψ_s^s är rymdvektorer som representerar statorströmmen och statorflödet. Rotorkretsen kan beskrivas på ett liknande sätt med resistansen R_r . Dock behövs det ett nytt koordinatsystem som är fixerat vid rotorn och snurrar lika fort och har hastigheten ω_r . Variablerna i det roterande koordinatsystemet noteras med ett indexerat r. Detta medför att samma förhållande som för statorn gäller även för rotorn

$$\nu_r^r - R_r i_r^r - \frac{d\Psi_r^r}{dt} = 0$$
(2.4)

där i_r^r , v_r^r och Ψ_r^r är rotorströmmen, spänningen och flödesrymdvektorerna. Då rotorlindningarna är kortslutna är $v_r^r = 0$. För att transformera rotorkoordinater till statorkoordinater används en $\alpha\beta$ -transformering utgående ifrån rotorpositionen

$$\theta_r = \int \omega_r dt \tag{2.5}$$

$$i_r^s = e^{j\theta_r} i_r^r, \Psi_r^s = e^{j\theta_r} \Psi_r^r$$
(2.6)

Transformera ekvation 2.4

$$0 - R_r e^{-j\theta_r} i_r^s - \frac{d(e^{j\theta_r} \Psi_r^s)}{dt} =$$

$$R_r e^{-j\theta_r} i_r^s - \left(-j\omega_r e^{-j\theta_r} \Psi_r^s + e^{-j\theta_r} \frac{d\Psi_r^s}{dt}\right) = 0 \Rightarrow$$

$$j\omega_r \Psi_r^s - R_r i_r^s - \frac{d\Psi_r^s}{dt} = 0$$
(2.7)

Asynkronmaskinen kan med hjälp av ovanstående beskrivas av följande ekvationer.

$$\frac{d\Psi_s^s}{dt} = v_s^s - R_s i_s^s \ (stator) \tag{2.8}$$

$$\frac{d\Psi_r^s}{dt} = j\omega_r \Psi_r^s - R_r i_r^s \ (rotor) \tag{2.9}$$

För att lösa dessa ekvationer behöver relationen mellan rotor- och statorflödet vara känd. För att förenkla modellen antas linjära magnetiska förhållanden råda och då kan luftgapsflödet beskrivas som

$$\Psi_a^s = L_m i_m^s, \ i_m^s = i_s^s + i_r^s \tag{2.10}$$

där L_m är en gemensam induktans för rotorn och statorn som kallas magnetiseringsinduktans och i_m som flyter genom L_m kallas magnetiseringsström. Detta är inte helt korrekt eftersom L_m varierar med spänningen då den blir mättad, vilket medför att strömmen inte ökar linjärt med spänningen och strömmen blir därför inte heller helt sinusformig. Mättningen bildas framförallt i tänderna i rotor och stator vilket medför ett lägre flöde. I strömmen bildas övertoner vilket medför ökade förluster bland annat pga. skin effect.

Statorflödet är summan av luftgapsflödet och statorläckflödet. Statorläckflödet är under linjära magnetiska förhållanden proportionellt mot statorströmmen. Med samma resonemang kan en ekvation för rotorflödet ställas upp.

$$\Psi_s^s = L_m i_m^s + L_{sl} i_s^s \tag{2.11}$$

$$\Psi_r^s = L_m i_m^s + L_{rl} i_r^s \tag{2.12}$$

 L_{sl} och L_{rl} är läckinduktanserna vilka är runt en tiondel av rotor- eller statorinduktanserna. Kombinera 2.8, 2.9, 2.11 och 2,12 samt förutsätt att induktanserna är konstanta enligt ovan.

$$v_{s}^{s} - R_{s}i_{s}^{s} - L_{sl}\frac{di_{s}^{s}}{dt} - L_{m}\frac{di_{m}^{s}}{dt} = 0$$
(2.13)

$$j\omega_r \Psi_r^s - R_r i_r^s - L_{rl} \frac{di_r^s}{dt} - L_m \frac{di_m^s}{dt} = 0$$
(2.14)

Dessa ekvationer visar hur det ekvivalenta schemat kan se ut, vilket illustreras i figur 2.5. Denna konfiguration kallas T-ekvivalent då de tre induktanserna bildar ett "T" [4].



Figur 2.5: Asynkronmaskinens kompletta ekvivalenta schema.

9

3 Förluster i asynkronmaskinen

I detta stycke följer beskrivningar av de olika förluster som förekommer i en asynkronmaskin. Förlusterna kan delas in i resistiva förluster ($P_{resistiv}$), järnförluster (P_{Fe}) som i sin tur utgörs av hysteresförluster och virvelströmsförluster, mekaniska förluster (P_{fw}) och tillsatsförluster (P_{Lr}). En ungefärlig fördelning av deras inbördes storlek kan ses i figur 3.1.



Figur 3.1: Diagram över de olika förlusterna i en asynkronmaskin

3.1 Resistiva förluster

De resistiva förlusterna (P_s och P_r) orsakas i kopparlindningarna i statorn respektive rotorn. Dessa förluster utgör den största delen av förlusterna i en asynkronmaskin och utgör vid märkdrift ungefär 50-60% av de totala förlusterna, varav huvuddelen i statorn [5]. De resistiva förlusternas storlek beror delvis på vilket material lindningarna är tillverkade av. Resistansen kan beräknas enligt ekvation 3.1 där l är längden på ledaren, A är ledarens area och ρ är resistiviteten som är 1,72x10⁻⁸ Ω m för koppar och 2,65x10⁻⁸ Ω m för aluminium.

$$R = \rho * l/A \tag{3.1}$$

För att minimera resistansen gäller det att hålla längden på lindningarna nere, ett vedertaget sätt att uppnå detta är att hålla ändlindningarna så korta som möjligt. Statorlindningarna tillverkas av koppar pga. att lindningarna är långa och det skulle öka förlusterna markant att byta till något annat material med sämre resistivitet. Anledningen till att burlindningarna i rotorn på flertalet maskintyper tillverkas i aluminium istället för koppar är att tillverkningskostnaderna är mycket högre för kopparburlindningar samtidigt som effektiviteten inte försämras tillräckligt mycket för att uppväga kostnaden för kopparburlindningar i asynkronmaskiner under 200kW [14].

Vid växelspänning i ledare kommer resistansen att öka ytterligare då ledaren kommer att utsättas för skin effect (eller strömförträngning) vilket innebär att strömtätheten i ledaren kommer att vara större vid ytan än i mitten av ledaren. Lindningarna utsätts också för proximity effect när ledningarna som leder växelspänning ligger nära varandra. Strömtätheten för den del av en ledning som ligger mot en

10

annan ledning kommer att minska medan på de motstående sidorna kommer strömtätheten att öka, detta medför att växelströmsresistansen kommer att öka. Proximity- och skineffekterna är inte separabla ifrån varandra och är heller inte helt kumulativa även om de ofta är behandlade som om de vore det [13].

3.2 Järnförluster

Järnförlusterna (P_{Fe}) orsakas av virvelströmmar och hysteresförluster i statorn. Anledningen till att järnförlusterna i rotorn kan försummas är att frekvensen där är låg. Virvelströmsförluster kan även förekomma i änddelen av maskinen, i t.ex lamineringen, skyddsplåtar, pressfingrar och pressplåtar [14].

3.2.1 Hysteresförluster

Hysteresförluster uppkommer när järnet i statorn magnetiseras av ett tidsvarierande magnetiskt fält, vilket sker under första fjärdedelen av en period vid sinusformig tidsvariation. När detta fält minskar, under andra fjärdedelen av en period, så kommer en viss magnetisering att ligga kvar i järnet. När magnetfältet sedan reverseras i den tredje fjärdedelen av en period så går det åt mer energi för att magnetisera järnet till motsatt polaritet och hysteresförluster har uppstått, se figur 3.2. Detta upprepas sedan för varje period [6].



Figur 3.2. Här visas en s.k. hysteresloop, vid (1) magnetiseras järnet första gången. Vid (2) har järnet magnetiserats, fältet sjunker under andra kvartsperioden och magnetiseringen avtar ner till (3). När fältet reverseras magnetiseras järnet igen med motsatt polaritet ned till (4) innan fältet återigen avtar och magnetiseringen går ner till (5) för att sedan börja om i nästa period med (2).

Arean mellan B-H kurvan och B-axeln representerar arbetet uträttat per volymenhet, se ekvation 3.2

$$W = \int_0^B H \, dB \, Jm^{-3} \tag{3.2}$$

Energin för att gå mellan punkt 1 och 2 i figur 3.2 är större än vad som ges tillbaka vid förflyttning från punkt 2 till 3, alltså uppkommer förluster. De totala förlusterna är proportionella mot arean inom den

s.k. hysteresloopen. Då förlusterna är proportionella mot en area är hysteresförlusterna grovt sett proportionella mot kvadraten av flödestätheten. För transformatorstål minskar detta till runt B^{1,6}. Det faktiska värdet för ett material kallas Steinmetzexponenten vilken benämns n. Dock finns det få tabellverk över Steinmetzexponenterna men grafer i logaritmisk skala över flödestäthet och förluster förekommer där n kan estimeras.

Dessa förluster uppkommer varje gång kärnan går ifrån ett positivt till ett negativt flöde. Förlusteffekten för detta är proportionell mot frekvensen f i hertz. Denna formel kallas Steinmetz formel.

$$P_h = K_h f B^n \text{ watt } m^{-3} \tag{3.3}$$

 K_h i formeln beror på materialegenskaper hos materialet i kärnan, där t.ex kiselstål har runt 190 J/m³ medan exempelvis gjutjärn har ca 3000 [7]. Huvudsakligen är hysteresförluster oberoende av strömmen utan beror enbart på flödet och är därigenom, förutom frekvensen, endast beroende av spänningen [7].

3.2.2 Virvelströmsförluster

Förluster i form av virvelströmmar fås när en elektrisk ledare utsätts för ett varierande magnetiskt fält. Detta magnetiska fält kommer då att inducera små cirkulerande strömmar i ledaren som i sin tur ger upphov till, i förhållande till det ursprungliga fältet, motriktade magnetiska fält enligt Lenz lag. För att minska virvelströmsförlusterna är den vanligaste metoden att laminera kärnmaterialet. Vid halvering av lamineringstjockleken blir längden av virvelströmskretsen endast lite kortare men på samma yta som innan fås då två virvelströmskretsar, se figur 3.3. Detta medför att resistansen per ytenhet i praktiken blir dubbelt så hög vilket halverar strömmen. Virvelströmsförluster är omvänt proportionella mot kvadraten av antalet lamineringar och kan beräknas, för *en* lamineringsskiva, enligt:

$$P_{eddy} = \frac{\pi^2 f^2 B_{max}^2 d^2}{6\rho} Watt \, m^{-3}$$
(3.4)

där *d* är tjockleken på skivan, ρ materialets resistivitet och B_{max} den maximala flödestätheten [7].

Som man kan se i ekvation 3.4 så minskar alltså förlusterna med tjockleken på lamineringsskivorna så att tunnare skivor ger mindre förluster. Nackdelen är att tillverkningskostnaderna höjs med tunnare plattor.

Även materialet i kärnan spelar roll för storleken på förlusterna. Ofta används kiselstål som är en järnlegering med 1-3 % kisel. Kiselstål är därmed ganska likt gjutjärn, som också används, med den skillnaden att de 2-4% kol som finns i gjutjärn tagits bort för att minska magnetiskt åldrande och därmed förlänga materialets livslängd [16]. Kislet i kiselstål har den funktionen att det ökar resistiviteten i materialet vilket minskar virvelströmmarna och därigenom sänker järnförlusterna.

Även om man försöker begränsa förlusterna genom användande av en laminerad statorkärna så står järnförlusterna för ca 15-25% av förlusterna vid märkdrift [5].



Figur 3.3: Inverkan av laminering vid virvelströmmar. Pilarna indikerar ett flöde ut ur pappret så att de cirkulerande strömmarna bildas vinkelrätt mot detta, dvs i papprets plan.

3.3 Mekaniska förluster

De mekaniska förlusterna består av friktionsförluster i de roterande delarna samt av luftmotståndsförluster i axelmonterade fläktar. Tillsammans utgör de vid märkdrift ungefär 5-10% av de totala förlusterna [5]. Vilken typ av motorkylning som behövs kan beräknas genom att titta på var motorn kommer att stå, hur varm den omgivande luften är, vilken höjd ovanför havet motorn skall placeras (då tunnare luft transporterar värme sämre), vilket varvtal motorn skall köras på samt vilken isolationsklass motorn har. Isolationsklassen anger en maxtemperatur vilken maskinen inte skall överstiga för att den förväntade livslängden för maskinen skall gälla. Den temperatur som anges av isolationsklassen skall inte överstigas av den omgivningstemperaturen plus temperaturökningen uppkommen av arbetet maskinen utför. I de flesta moderna isolationssystemen motsvarar en ökning av motortemperaturen med 10 °C över isolationsgränsen en minskning av maskinens livstid med 50%. Avvägningen blir att en bättre fläkt kommer att generera mer förluster än en motor med bara kylflänsar men detta skall vägas emot en längre livstid på maskinen [12].

3.4 Tillsatsförluster

Tillsatsförluster (eng. stray load losses) är förluster som inte omfattas av de ovan nämnda beräkningarna av förluster i form av friktion, luftmotstånd, resistiva förluster i stator och rotor eller järnförluster. De står totalt för 10-20% av de totala förlusterna vid märkdrift [5]. Tillsatsförlusterna utgörs av ett flertal olika komponenter som i sig skiljer sig en del åt. Det finns exempelvis extra järnförluster som kommer sig av högfrekventa virvelströmmar som i sin tur uppkommer av läckflöden eller skillnader i permeans i huvudflödet.

Andra förluster är läckflöden som uppkommer när rotor- och statortänder rör sig relativt varandra och mycket flöde då ska ledas genom en liten gemensam yta, vilken blir mättad. Samma fenomen kan också leda till inducerade överlagrade strömmar i burlindningen vilket orsakar impedansförluster. Den här sortens förluster beror till stor del av skillnad i antal stator- och rotorspår där många rotorspår i förhållande till statordito kommer att öka förlusterna. Eftersom det handlar om impedansförluster

spelar även impedansen i burlindningen in, och speciellt impedansen relativt det omgivande järnet. Här är därför isoleringen av burlindningen av största vikt för att få ned förlusterna.

3.5 Verkningsgrad

Verkningsgraden i en elektrisk maskin är förhållandet mellan ineffekt och uteffekt, se ekvation 3.5.

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{in}} \tag{3.5}$$

Eftersom en höjning i verkningsgrad medför en minskning i driftskostnader kan det vara lönsamt att välja en maskin med högre verkningsgrad. Dock blir en maskin som är optimerad för hög verkningsgrad mycket dyrare i inköp så det kommer alltid att vara en avvägning där initialkostnad måste vägas emot driftskostnaderna och dess livslängd.

För att få en så hög verkningsgrad som möjligt kan följande tilltag göras:

- Ser man till ekvation 3.1 så är det med avseende på de resistiva förlusterna fördelaktigt att välja ett material med lägsta möjliga resistivitet i både stator- och rotorlindningar. Arean på lindningsledarna skall vara så stor som möjligt för att minska förlusterna men detta blir dyrt då materialåtgången ökar.
- För att minska järnförlusterna kan man minska lamineringsskivornas tjocklek och öka isolationen mellan dem. Materialvalet i kärnan spelar också roll för att sänka järnförlusterna.
- De mekaniska förlusterna dämpas genom att välja kul-/rull-/glidlager med så liten inre friktion som möjligt. Fläktar skall undvikas och om behovet av en fläkt skulle finnas gäller det att den har ett minimalt luftmotstånd men ändå kyler tillräckligt.
- Då tillsatsförlusterna består av ett antal olika komponenter och de var för sig utgör en liten del av förlusterna är det svårt att minska dessa med någon betydande mängd. Vissa vinster kan dock göras genom materialval och noggrann design av rotor och stator.

4 Mätning och beräkning av förluster

I detta kapitel avhandlas hur de olika sorterna av förluster ska mätas och/eller beräknas för att vara i enlighet med rekommendationen i den nya standarden. Detta gör att mätmetoder som inte inkluderas däri - såsom FEM-beräkning, värmekamera etc – inte kommer att tas upp. Att förlusterna beräknas korrekt är inte bara viktigt för att en del av förlustberäkningarna bygger på andra förluster utan även för att beräkna verkningsgraden för maskinen. Dessutom kan det för exempelvis tillverkare vara intressant att se var de största förlusterna sker, eftersom det är där det finns mest energi att spara in genom förbättringar i designen.

4.1 Resistiva förluster i stator och rotor

En stor del av förlusterna i en asynkronmaskin är rena kopparförluster där energi går förlorad som värme i maskinens lindningar. Dessa kan delas upp i två delar, stator- och rotorförluster.

4.1.1 Statorförluster

För att beräkna de resistiva förlusterna i statorn behöver man känna till två saker:

- Statorns line-to-line-resistans, $R_{s,\parallel}$
- Strömmen in i maskinen, *I*.

Att tänka på är även att den ekvivalenta line-to-line-resistansen beräknas på olika sätt för Y-kopplade och Δ -kopplade maskiner:

$$R_{s,\parallel} = \frac{2}{3} * R_{fas,\Delta} \tag{4.1a}$$

$$R_{s,\parallel} = 2 * R_{fas,Y} \tag{4.1b}$$

Själva förlusterna kan då, oberoende av Y- eller ∆-koppling, beräknas enligt

$$P_s = 1.5 * R_{s,\parallel} * I^2 \tag{4.2}$$

Strömmen mäts under drift. Man måste också ta med i beräkningen att lindningarna blir olika varma beroende på hur mycket ström som går igenom dem. Därför skall man i samband med att man gör mätningar för olika lastpunkter, vilket förklaras närmare under avsnittet om tillsatsförluster, även mäta resistansen igen. Först en gång innan mätningarna börjar men efter att temperaturen stabiliserat sig, och sedan en gång efter att den sista lastpunkten mätts. För de lastpunkter som är på 100% eller mer av märklast skall den först uppmätta resistansen användas, medan den för övriga lastpunkter antas avta linjärt med lasten mellan de två värdena som uppmätts i början och slutet av mätningen [10].

4.1.2 Rotorförluster

Den föredragna metoden för bestämmande av de resistiva förlusterna i rotorn är enligt IEC 60034-2-1:2007 att använda sig av maskinens eftersläpning samt redan kända förluster. Detta utgår från att den effekt som går in i maskinen och som inte förloras i statorns koppar- respektive järnförluster passerar luftgapet in i rotorn, dvs

$$P_{\delta} = P_{in} - P_s - P_{fe} \tag{4.3}$$

Den effekt som går in i rotorn utgör summan av den effekt som går ut på axeln och de resistiva förlusterna i rotorn (rotorns järnförluster försummas p.g.a. låg frekvens);

$$P_{\delta} = P_{ut} + P_r \tag{4.4}$$

Alla roterande system kan beskrivas enligt

$$P = T * \omega \tag{4.5}$$

och eftersom magnetfältet i luftgapet roterar med det synkrona varvtalet kan då luftgapseffekten skrivas

$$P_{\delta} = T_{magnetfält} * \omega_s \tag{4.6}$$

och uteffekten

$$P_{ut} = T_{axel} * \omega \tag{4.7}$$

Tillsammans med det faktum att allt vridmoment på axeln skapas av magnetfältet, dvs

$$T_{axel} = T_{magnetf\"alt} \tag{4.8}$$

och uttrycket för eftersläpningen, ekvation 2.2, så fås att [11]

$$\frac{P_{\delta}}{\omega_s} = \frac{P_{ut}}{\omega} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow P_{\delta} * \omega = P_{\delta} * \omega_s - P_r * \omega_s \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow P_r = P_{\delta} * s = s * (P_{in} - P_s - P_{fe})$$
(4.9)

Som synes är värdet för rotorförlusterna beroende av att de andra förlustkomponenterna P_{in} , P_s , och P_{fe} beräknas korrekt.

4.2 Mekaniska förluster och järnförluster

De så kallade konstanta förlusterna kan delas upp i två delar där den ena delen är spänningsberoende järnförluster (P_{fe}) i form av virvelströmmar och hysteresförluster, och den andra delen utgörs av konstanta mekaniska förluster (P_{fw}). De mekaniska förlusterna är egentligen inte helt konstanta utan beror på varvtalet, men i de aktuella fallen kommer detta att variera såpass lite att förlusterna kan betraktas som konstanta.

För att separera dessa två delar från varandra behöver man göra ett antal så kallade tomgångstest, dvs test där man kör maskinen utan någon last. Totalt ska man köra test vid åtminstone sju olika matningsspänningar – minst tre stycken ska ligga med jämnt avstånd mellan 20 % och 50 % av märkspänningen och minst fyra stycken ska vara jämnt fördelade i intervallet 60-125 % av märkspänning. Eftersom maskinen är olastad så kommer axeln att snurra med i princip det synkrona varvtalet och därmed blir eftersläpningen minimal. Detta får till följd att det inte induceras någon ström i rotorn utan all ström endast går genom statorkretsen. Detta i sin tur innebär att all förlust av aktiv effekt vid ett tomgångtest sker i statorlindningarna eller som konstanta förluster:

$$P_k = P_{in} - P_s \tag{4.10}$$

Statorförlusterna kan räknas ut enligt (4.2) och det som återstår är alltså de konstanta förlusterna. Dessa skall då användas för att ta fram en linjär graf med konstanta förluster (P_k) mot U^2 och det är där denna graf skär $U^2 = 0$ som man har de mekaniska förlusterna, se figur 4.1.



Figur 4.1: Exempel på bestämning av konstanta förluster.

För att få fram järnförlusterna ska man använda de punkter som ligger mellan 60 och 125 % av märkspänning [10]. För dessa värden plottas en kurva $P_{fe} = P_k - P_{fw}$ mot spänningen U_0 , se exempel i figur 4.2. Därur kan järnförlusterna för en viss spänning avläsas vid U_r som tar hänsyn till spänningsfallet i statorlindningarna.

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} * I * R \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * I * R \sin \varphi\right)^2}$$
(4.11)

där R är statorresistansen och U och I matningsspänning resp matningsström. $\cos \varphi$ beräknas enligt

$$\cos\varphi = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} * U * I} \tag{4.12}$$

och då fås med hjälp av trigonometriska ettan att

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi} \tag{4.13}$$



Figur 4.2: Kurva för beräkning av de faktiska järnförlusterna

4.3 Tillsatsförluster

Tillsatsförlusterna kan beräknas på ett par olika sätt varav det här har valts ut två som anses lämpliga på grund av precision och/eller tillämpbarhet. Det är dels den föredragna metoden som går ut på beräkning utifrån ett antal utförda lasttester vid olika spänningar, samt även en uppdaterad variant av schablonvärde som kan användas när lasttester inte är lämpligt – exempelvis om motorn har högre effekt än 150 kW eller lasttesterna inte ger ett godtagbart resultat.

4.3.1 Beräkning utifrån lasttester

Den metod som är att föredra enligt IEC-standarden använder sig av mätningar gjorda vid ett antal lastpunkter. Dessa lastpunkter ska vara minst sex stycken, minst fyra stycken på jämnt avstånd mellan 100% och 25% av märklast, inklusive 100%, samt ytterligare två stycken som skall vara placerade med jämnt avstånd mellan 100-150% av märklast. Man skall börja med högsta lasten och arbeta sig ned mot lägre effekter. Mätningarna skall ske så fort som möjligt för att minimera temperaturskillnad i lindningarna. Frekvensvariationen skall vara mindre än 0,1% (0,05 Hz i ett 50 Hz-system) mellan alla mätpunkter. Resistansen skall mätas före första mätningen och efter sista mätningen. Resistansen för 100% samt de två mätpunkterna över det skall vara den först uppmätta resistansen medan resistansen för punkterna under 100% skall beräknas utifrån de två uppmätta resistanserna (dvs före och efter) där den antas ha en linjär utveckling med lasten, så att när lasten sänks kommer även resistansen att sjunka. För varje lastpunkt ska man anteckna spänning, ström, ineffekt, varvtal, frekvens samt vridmoment.

Innan dessa mätningar börjar skall temperaturen i lindningarna vara inom 5 K från θ_n som är temperaturen vid märkdrift. θ_n är uppnådd när temperaturen i lindningarna inte varierar med mer än 2 K över en timmas tid [10].

Temperaturskiftningar kan mätas med exempelvis en Pt-100-givare medan själva temperaturen bäst beräknas med en avsvalningskurva. En avsvalningskurva fungerar som så att så fort som möjligt efter att maskinen stängts av så skall resistansen i lindningarna mätas och den skall sedan fortsätta att mätas med jämna intervall, 30 sekunder är lämpligt, under åtminstone 10 minuter. Dessa värden kan sedan användas för att extrapolera resistansen vid tidpunkten precis när maskinen stängdes av och utifrån detta kan man sedan räkna fram temperaturen ur

$$\Delta T = (R_{varm}/R_{kall}) * (K+20) - K - T_{rum}$$
(4.14)

där K är en konstant som är 235 ifall det är kopparlindningar eller 225 om de är av aluminium. Vad gäller extrapoleringen så är det oftast både bäst och enklast att använda en linjär extrapolering utgående ifrån de första mätvärdena även om avsvalningskurvan i sin helhet är påtagligt olinjär¹. För exempel på hur avsvalningskurvan kan se ut se kapitel 5.3.2.

När de ovan nämnda lasttesterna gjorts skall man för dessa beräkna koppar-, järn- och mekaniska förluster som vanligt och med hjälp av dessa räkna ut de så kallade residualförlusterna:

$$P_{L,r} = P_{in} - P_{ut} - P_r - P_s - P_{fe} - P_{fw}$$
(4.15)

där

$$P_{ut} = 2\pi * T * n \tag{4.16}$$

Nästa steg är att beskriva förlusterna som en funktion av lastmomentet i kvadrat, enligt

$$P_{L,r} = A * T^2 + B \tag{4.17}$$

där T mätts upp vid lastpunkterna och A och B är konstanter som bestäms från

$$A = \frac{i * \sum ((P_{L,r}) * (T^2)) - \sum P_{L,r} * \sum T^2}{i * \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2}$$
(4.18)

$$B = \frac{\sum P_{L,r}}{i} - A * \frac{\sum T^2}{i}$$
(4.19)

där *i* är antalet lastpunkter.

För att se hur väl värdena stämmer överens med varandra skall man ta fram en korrelationskoefficient

$$\gamma = \frac{i * \sum (P_{L,r} * T^2) - (\sum P_{L,r}) * \sum T^2}{\sqrt{(i * \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2) * (i * \sum P_{L,r}^2 - (\sum P_{L,r})^2)}}$$
(4.20)

Om γ < 0,95 skall den mest avvikande punkten tas bort från beräkningarna och dessa skall då göras om. Om γ då fortfarande är mindre än 0,95 är testet otillfredsställande och bör göras om.

¹ Claes Hugoson, Myrén & Co, 2010-03-02

När γ är tillfredsställande beräknat kan tillsatsförlusterna kalkyleras med hjälp av formeln

$$P_{strav} = A * T^2 \tag{4.21}$$

[10]

4.3.2 Tillsatsförluster utifrån schablonvärden.

Tillsatsförluster kan även i fortsättningen anges som ett procentuellt värde av ineffekten. Skillnaden mot tidigare utgåvor av IEC 60034 är att det nu inte är ett fast värde som är detsamma för alla maskiner utan det är uppdaterat med hänsyn till forskning på området [1][2] och därför både ligger högre i storlek samt varierar med effekten på maskinen:

$$P_{stray,100} = P_{in} * (0.025 - 0.005 \log_{10}(\frac{P_{ut}}{1000}))$$
(4.22)

Ovanstående ekvation gäller vid märkdrift för maskiner i intervallet 1 kW – 10 MW. För mindre maskiner än detta antas 2,5% och för större 0,5% tillsatsförluster. För driftfall som inte är märkdrift antas tillsatsförlusterna variera med primärströmmen i kvadrat minus tomgångströmmen i kvadrat:

$$P_{stray} = P_{stray,100} * \frac{I^2 - I_{tomgång}^2}{I_{100}^2 - I_{tomgång,100}^2}$$
(4.23)

där $P_{stray,100}$ är tillsatsförlusterna vid märklast enligt ekvation 4.22 och $I_{tomgång}$ är strömmen från det tomgångstest som gjordes med en spänning på samma procentuella värde av märkspänningen som uteffekten är av märkeffekt i den aktuella lastpunkten med strömmen *I*. Det vill säga att om man vill ha tillsatsförlusterna för exempelvis 70% av märkeffekt så är $I_{tomgång}$ strömmen från det tomgångtest som gjordes med 70% av märkspänningen. I_{100} är strömmen vid märkdrift och $I_{tomgång,100}$ strömmen vid tomgångstest med 100% av märkspänning [10].

4.4 Alternativa mätmetoder

De ovan beskrivna metoderna är inte de enda som beskrivs i den nya IEC-standarden men det är de som är rekommenderade i första hand ur noggrannhetssynpunkt. Nedan presenteras ett par andra metoder som kan användas för att ersätta hela eller delar av ovanstående metoder.

4.4.1 Kalorimetrimetoden

En annan metod för att bestämma förluster i en elektrisk maskin är kalorimetrimetoden. Kalorimetrimetoden är ofta mer exakt än in-ut-metoden där två storheter av liknande magnitud subtraheras. Motorn placeras i en perfekt isolerad låda eller i en kalorimeter. All värme som genereras kommer ifrån de olika förlusterna i motorn. Värmen i lådan extraheras med ett kylmedium, där hela kylsystemet har utvärderats separat för att få kännedom om systemets egna förluster samt förbättra mätosäkerheten. Vid stationärt tillstånd är den extraherade värmen från lådan lika med den genererade värmen i lådan (ingen temperaturförändring i lådan då lika mycket värme som uppkommer blir extraherad). Vanligast är att extrahera värmen med antingen vatten eller luft. Det konstruktionsmässigt enklaste sättet är att använda luft som kylmedium då luften kan ledas direkt genom lådan. Mäts

temperaturen på in-luften och ut-luften samt mängden luft som passerar fås skillnaden i energi vilken motsvarar förlusterna i motorn.

När vatten är använt som kylmedium måste luften i lådan roteras med en fläkt och värmeutbytet ske genom en värmeväxlare i toppen på lådan. Både värmeväxlaren och fläkten bidrar dock till mätosäkerheter. Systemet måste också vara helt slutet och det får heller inte förekomma luftbubblor i vattnet då dessa kommer ge upphov till mätfel.

Med kalorimetrimetoden kan man bestämma följande förluster: mekaniska förluster (med rotorn omagnetiserad), järnförluster vid tomgång, statorlindnings- och tillsatsförluster (med statorlindningarna kortslutna) och de totala förlusterna. De största felkällorna i denna metod är att värme läcker ut genom väggar, axeln och genom motorns infästningspunkter. Testerna och utrustningen skall dock utformas så att dessa felkällor inte är mer än 2,5% av de totala förlusterna inuti kalorimetern.

4.4.2 Eh-star-metoden

Eh-star-metoden (Einphasig Hilfswiderstand, sv. Enfas Hjälpmotstånd) är en alternativ metod för att bestämma tillsatsförluster i asynkronmaskiner. Jämfört med residualförlustmetoden så har den fördelen av att inte kräva en momentgivare eller last vilket gör den billigare, dock så är noggrannheten lägre och den har samma begränsningar vad gäller vilka effekter den rekommenderas för. En förutsättning för att den ska kunna användas är att lindningarna kan Y-kopplas.

Själva metoden går ut på att maskinen matas asymmetriskt vilket fås genom att ett motstånd R_{eh} kopplas in enligt figur 4.3. R_{eh} skall dimensioneras så att den positiva sekvensströmmen [17] hålls under 30% av den negativa sekvensströmmen [17] och så att motorhastigheten ligger ungefär vid märkhastighet [10].



Figur 4.3: Schematisk bild över uppkopplingen för eh-star-mätning.

Själva testandet ska göras vid sex matningsspänningar som ska ge fasströmmar i fas V som ligger ungefär jämnt fördelade mellan 75% och 150% av märkfasström. Line-to-line-resistansen R_{VW} beräknas på ett liknande sett som vid ovan nämnda lastprov med en mätning före och en efter testerna genomförs. Skillnaden är att i detta fall så antas testerna med strömmar \leq 100% ha samma resistans (den som mäts efter att testerna genomförts) medan de > 100% extrapoleras, med hjälp av de två mätningarna, som en funktion linjärt proportionerlig med strömmen.

Vid varje testpunkt ska I_U , I_V , I_W , U_{UV} , U_{VW} , U_{WU} , P_{UW} , P_{WV} samt varvtalet noteras.

När dessa test gjorts kan man ur detta räkna fram de reella och imaginära delarna för spänningar och strömmar. Från detta kan de "inre" (dvs efter spänningsfallet i lindningarna) line-to-line-spänningarna beräknas och sedan delas upp i positiva och negativa sekvenskomponenter [17]. Detta i sin tur ger sekvenskomponenterna för de inre fasspänningarna varur de asymmetriska inre fasspänningarna fås. Nu kan man, om man känner till järnförlusterna, räkna fram de inre fasströmmarna och deras sekvenskomponenter. Dessa används tillsammans med sekvenskomponenterna för de inre fasspänningarna för att räkna fram luftgapseffekten som, eftersom motorn är olastad, bara utgörs av mekaniska förluster och tillsatsförluster och eftersom de mekaniska förlusterna är kända sedan tomgångstestet så har man nu tillsatsförlusterna.

Dessa ska nu behandlas på samma sätt som residualförlusterna i 4.3.1 med den skillnaden att de istället för att vara en funktion av vridmomentet i kvadrat nu antas vara en funktion av kvadraten på kvoten av den negativa sekvenskomponenten av de inre fasströmmarna och testströmmen [10].

5 Praktiskt test på en 110kW asynkronmaskin

I detta avsnitt beskrivs hur de praktiska mätningarna utfördes, vilken maskin som mättes på samt vilken utrustning som användes. Även de erhållna resultaten presenteras.

5.1 Mätuppställning

Maskinen som mättes upp kopplas med en kardanaxel via momentgivaren ihop med bromsmotorn. En principskiss över uppställningen kan ses i figur 5.1. I figur 5.2 visas den uppställda maskinen på mätbänken.



Figur 5.1: En schematisk bild över mätuppställningen



Figur 5.2: Maskinen som användes vid de praktiska mätningarna.

5.1.1 Mätobjekt

Maskinen som användes vid mätningarna har maskinparametrarna på märkplåten enligt tabell 5.1. Motorn var inkopplad i Δ .

Tabell 5.1

Modell	ABB HXR 315 MB 6 B3
U	500 V
Ν	985 rpm
Р	110 kW
1	164 A
Cos(φ)	0,82
F	50 Hz
Isolationsklass	В

5.1.2 Utrustning

Alla mätningar utfördes med mätutrustningen presenterad i tabell 5.2

Tabell 5.2

Тур	Modell	Mätområde	Noggrannhet
Multimeter	MetraHit X-tra	0-10 V	0,05 + 3
Effektmätare	Norma 3000	0,3-1000 V	0,15%
Momentgivare	Smart torque stator T-12	0-16000 rpm	0,03%
Strömmätare	Ultrastab 867-200I	0-200 A	N/A
DC strömkälla	Delta Elektronika SM1540-D	0-15 V 0-40A	0,5%
Varvtalsmätare	Seeka GR02 + Synelec counter 3253	N/A	N/A

5.2 Utförda tester

Här nedan följer en sammanställning av de tester som gjorts på testobjektet. De presenteras i samma ordning som de utfördes och med den utrustning som använts.

5.2.1 Kallresistansmätning

För att mätningarna skall bli mer tillförlitliga skall såväl resistansen som temperaturen i lindningarna mätas. Oftast är det dock inte möjligt att mäta temperaturen i lindningarna direkt eftersom detta, för att få en godtagbar noggrannhet, kräver att temperatursensorer installeras i lindningarna redan när maskinen monteras och detta är ovanligt. En mätning av temperaturskillnaden med hjälp av Pt-100-givare som stoppas in lindningarna är också möjlig men ger dålig precision. Istället får man förlita sig på avsvalningskurvor enligt 4.3.1. För både temperaturbestämning och i samband med tomgångsprovet krävs att man vet lindningarnas resistans vid rumstemperatur.

Själva mätningen utfördes genom att en känd ström kördes från strömgeneratorn (Delta Elektronika SM1540-D) genom statorlindningarna varpå spänningsfallet över varje lindning uppmättes med hjälp av MetraHit Xtra och ett medeltal beräknades, 0,072 Ω , vilket i sin tur omräknades till en line-to-line-resistans, 0,048 Ω .

5.2.2 Tomgångsprov

Tomgångsprovet utförs innan kardanaxeln har monterats för att minimera felkällor så som friktion hos bromsmotorn och kardanens tröghet et. Uppställningen visas i figur 5.3. Tomgångsprovet utfördes med början på den högsta spänningen för att sedan gå stegvis nedåt. Vid varje mätning antecknades samtliga fasspänningar, fasströmmar, pålagd skenbar effekt samt förbrukad aktiv effekt med hjälp av Norma 3000 och Ultrastab 867-2001.



Figur 5.3: Maskinen inkopplad för tomgångsprov

5.2.3 Avsvalningskurva

Maskinen kopplades ihop med bromsmotorn och fick gå med 110 % av märklast inledningsvis och senare 100 % för att inte överbelasta maskinen men ändå påskynda uppvärmningen. Maskinen lastades på detta sätt i ca 1,5 timme för att uppnå arbetstemperatur. När uppvärmningen bedömdes tillräcklig mättes en avsvalningskurva upp enligt 4.3.1. Resistansmätningarna gjordes på samma sätt som i 5.2.1.

5.2.4 Lasttester

Efter ett uppehåll på ca 1 timme från det att avsvalningskurvan var färdig kördes maskinen återigen ett tag med märklast för att än en gång få upp temperaturen i lindningarna. Därpå utfördes lasttester enligt 4.3.1.

När sista lasttestet var utfört mättes återigen lindningsresistansen för att sedan kunna temperaturkorrigera resistansen under mätningens gång.

5.3 Erhållna förluster och verkningsgrad

I detta kapitel presenteras de resultat som genererats genom de olika mätningar som genomförts och som beräknats enligt de metoder som beskrivits i kapitel 4. De presenteras här mestadels grafiskt men finns även i tabellform i Appendix B.

5.3.1 Konstanta förluster

De konstanta förlusterna i form av mekaniska förluster och järnförluster kan beräknas utifrån värdena man får fram från tomgångsprovet.

I figur 5.4 visas ett diagram över den förbrukade effekten för tomgångsprovet, där statorförlusterna dragits bort (dessa mätdata kan ses i Appendix B), plottat mot den pålagda spänningen i kvadrat



Figur 5.4: De konstanta förlusterna plottade mot spänningen i kvadrat



Ur detta extrapoleras en rät linje med hjälp av minsta kvadrat-metoden, vilken lagts till i figur 5.5

Figur 5.5: De konstanta förlusterna med tillagd trendlinje.

Följer man den extrapolerade kurvan ned till $U^2 = 0$ så får man där de mekaniska förlusterna, vilket i fallet ovan blir 649 W.

När de mekaniska förlusterna dragits bort från de konstanta förlusterna får man då enbart järnförlusterna kvar, vilka ser ut enligt figur 5.6.



Figur 5.6: De kvarvarande järnförlusterna vid tomgångstest efter att statorförluster och mekaniska förluster räknats bort.

De faktiska järnförlusterna är som tidigare nämnts beroende på spänningen som ligger över kärnan, vilken inte är densamma som den som läggs över terminalerna utan den beräknas enligt ekvation 4.11 och presenteras i figur 5.7.



Figur 5.7: Spänningen över kärnan vid olika lastpunkter.

Kombinerar man så järnförlusterna enligt figur 5.6 med den faktiska spänningen över kärnan enligt figur 5.7 så fås de faktiska järnförlusterna, vilka visas i figur 5.8.



Figur 5.8: Järnförlusterna för de olika lastpunkterna från lastprovet.

En uppförstorad bild över förlusterna kan ses i figur 5.9.



Figur 5.9: En närmare titt på järnförlusterna från figur 5.8

Här kan man då konstatera att järnförlusterna faktiskt minskar med ökad uteffekt, detta beror på att lastproven gjordes med konstant spänning över maskinen medan effekten kontrollerades med hjälp av strömmen. Detta innebär att för de lägre effekterna så går det en lägre ström genom maskinen och det blir då ett mindre spänningsfall i lindningarna, vilket ger en högre spänning över kärnan och därför högre järnförluster. Man ska dock komma ihåg att, som man kan se i figur 5.7 och 5.8, skillnaden i förluster är procentuellt liten och mycket liten om man jämför med maskinens märkeffekt.

De konstanta förlusterna (dvs järnförlusterna och de mekaniska förlusterna) utgör vid märkdrift ca 20-30% av de totala förlusterna, vilket är som förväntat.

5.3.2 Stator- och rotorförluster

För att beräkna de resistiva förlusterna under drift måste man känna till resistansen under drift och den beräknas utifrån en avsvalningskurva som beskrivs i 4.3.1 och den ser i det här fallet ut som i figur 5.10. Hela avsvalningskurvan används dock inte utan det är endast de tidigaste mätpunkterna som ska användas för att göra en linjär approximation av resistansen i avstängningsögonblicket, en sådan visas i figur 5.11



Figur 5.10: Avsvalningskurva



Figur 5.11: Approximation av statorresistansen vid avstängningsögonblicket

De resulterande stator- och rotorförlusterna från de utförda lastproven presenteras i figur 5.12



Figur 5.12: Stator- och rotorförluster för den testade asynkronmaskinen

Graferna i figur 5.12 beter sig som förväntat, den lätt exponentiella ökningen beror på att dessa resistiva förluster är proportionella mot strömmen i kvadrat och det är strömmen som använts för att reglera den avgivna effekten. Vad gäller storlek så utgör dessa förluster totalt ca 50-60% av de totala förlusterna när maskinen lastades med 80% eller mer av märkeffekt.

5.3.3 Tillsatsförluster

Tillsatsförlusterna beräknas enligt avsnitt 4.3.1 utifrån residualförlusterna, dvs den skillnad mellan inoch uteffekt som inte utgörs av resistiva eller konstanta förluster. Resultatet från mätningarna presenterade tidigare i kapitlet visas i figur 5.13.



Figur 5.13: Residualförlusterna för de utförda testerna samt schablonvärden enligt den ursprungliga IECstandarden och den senaste upplagan .

31

Som synes så är det stor spridning på de uppmätta resultaten. Variationen är absolut för stor för att man ska kunna dra några slutsatser angående tillsatsförlusterna enligt den föredragna metoden beskriven i 4.3.1. Korrelationskoefficienten γ blir för de här värdena 0,83, det vill säga markant under de 0,95 som krävs för att mätningarna ska anses fullgoda. Även om den mest avvikande punkten, vid ca 80% av märkeffekt, tas bort ur beräkningarna så når γ inte högre än 0,89 – vilket alltså inte är bra nog.

I det här fallet hade man alltså fått använda ett värde enligt avsnitt 4.3.2, representerat med linjen som kallas "Schablonvärde, 2007" i figur 5.13. I storleksordning har residualförlusterna ett medelvärde på ungefär 0,7% av ineffekten, vilket alltså som väntat är större än de 0,5% som var siffran för den gamla IEC-standarden.

Anledningen till de små residualförlusterna vid 80-90% uteffekt är inte helt säker. Studerar man skillnaden mellan inmatad och uttagen effekt (figur 5.14), och därmed också verkningsgraden (figur 5.15), så kan man konstatera att ökningen av förluster är relativt liten jämfört med ökningen av uttagen effekt vid dessa lastpunkter. En del av detta kan förklaras med att det är vanligt att asynkronmaskiner har en något högre verkningsgrad strax under märkeffekt men det är troligen inte hela sanningen.



Fördelningen av de olika förlusterna vid märkdrift visas i figur 5.16.

Figur 5.14: Differensen mellan inmatad och uttagen effekt för de olika lastpunkterna



Figur 5.15: Verkningsgraden för de olika lastpunkterna



Figur 5.16: Den faktiska fördelningen av förlusterna.

6 Diskussion

Det första man kan konstatera är att endast en genomkörning av testproceduren inte ger ett särkilt stort underlag att dra några slutsatser ifrån men några indikationer ger det i alla fall. Vad gäller de resistiva och de konstanta förlusterna så ser de ungefär ut som förväntat, både vad gäller utveckling för olika laster samt i storlek som andel av de totala förlusterna.

Residual- och tillsatsförluster däremot ser inte ut som förväntat, speciellt vid 80-90% av märklast. Eftersom övriga förluster beter sig som väntat medan residualförlusterna inte gör det så borde det vara så att felet finns i P_{in} och/eller P_{ut} enligt ekvation 4.15. Detta är troligen framför allt P_{ut} , se nedan. Det man också kan lägga märke till är att verkningsgraden ökar markant vid de nämnda punkterna. Detta i sig är inte ovanligt men att ökningen är så stor som nästan 2 procentenheter är anmärkningsvärt, vanligtvis ligger den inom 0,5-1 procentenheter². Så även om en höjd verkningsgrad kan vara en del av förklaringen så är det fortfarande en förhållandevis stor avvikelse från trenden som övriga mätpunkter påvisar. Även de andra värdena på residualförlusterna varierar relativt mycket sett till den totala trenden. En gemensam förklaring till dessa avvikelser är med största sannolikhet att den momentigvare som användes inte kunde ge ett stabilt värde utan fluktuerade ett antal Nm, vilket har resulterat i en markant ökad osäkerhet vid avläsning. En Nm vid de aktuella hastigheterna motsvarar ca 100W i uteffekt, så då kan en felaktig uppskattning av det faktiska vridmomentet ge upphov till differenser i residualförlusterna som kan förklara avvikelserna.

Något som kan ha en mindre inverkan på resultaten är det faktum att temperaturen i lindningarna inte kunde kontrolleras, så det är inte helt klart att en stabil temperatur hade uppnåtts när lasttesten gjordes. Detta medför i så fall att resistansförlusterna är något mindre än vad de skulle vara om arbetstemperatur uppnåtts. Troligen är detta dock en marginell förändring.

Vad gäller temperaturen i lindningarna kan man också notera att det troligen hade varit tidseffektivare att göra lastproven innan avsvalningskurvan. Detta eftersom lindningarna svalnat av mindre under lastproven än under tiden för avsvalningskurvan, så då hade det tagit kortare tid att få upp temperaturen igen.

När det gäller beräkning av tillsatsförluster med den föredragna metoden med lasttester och residualförluster så är den inte rekommenderad för maskiner med en märkeffekt på >150kW. För sådana maskiner får alltså ett schablonvärde enligt den nya formen användas. Eftersom den maskin som testats i det här arbetet ligger relativt nära detta övre gränsvärde (110 kW) kan det vara av intresse att även göra tester på andra maskiner i andra storlekar.

Ett annat problem som uppkommit i arbetet med den här rapporten är bristen på källor rörande vad IEC-standarden är grundad på. Många anger den som källa men vad den själv är grundad på är väldigt svårt att få reda på. Detta har gjort att de härledningar som presenteras inte kan garanteras vara exakt samma som standarden är byggd på, men skillnaderna är troligen små. Ett konkret exempel på detta är härledningen av uttrycket för rotorförlusterna där tillsatsförlusterna inte omnämns när man talar om

² Claes Hugoson, Myrén & Co, 2010-03-11

luftgapseffekt och var förluster ska placeras. Resultatet av härledningen blir dock det uttryck som anges i standarden.

Angående de mätmetoder som nämnts i rapporten så måste rekommendationen bli att använda de som beskrivs i 4.1, 4.2 och 4.3.1. Kalorimetrimetoden (4.4.1) kan inte anses vara ett realistiskt alternativ när man ser till den utrustning och de möjligheter som finns tillgängliga i dagsläget på Myrén & Co, att ställa i ordning ett värmeisolerat rum när man redan har mer konventionell mätutrustning av hög klass vore både dyrt och onödigt. Eh-star-testet för tillsatsförluster är inte heller ett förstahandsval, precisionen är sämre än för residualförlustmetoden och den har samma begränsning i vilka märkeffekter den rekommenderas för, dvs 1-150 kW. Möjligtvis kan den ses som ett alternativ ifall momentmätaren fortsätter krångla.

7 Ny testrutin

Det här arbetet har utmynnat i ett delvis nytt testprotokoll som till stora delar bygger på det protokoll som redan används på Myrén & Co, men med en hel del modifikationer. Orsaken till att utgå från det befintliga protokollet är att en del saker har ändrats mycket lite och dessa finns alltså redan i protokollet samt att det förhoppningsvis minskar eller kanske rentav helt tar bort den inskolningstid som annars skulle finnas.

Gällande den ordning som mätningarna bör utföras i så rekommenderas:

- 1. Mätning av lindningsresistanserna.
- 2. Tomgångstest. Ta mätvärden för de spänningsnivåer enligt 5.2.2, med start på den högsta, som finns i protokollet och anteckna spänningar, strömmar samt inmatad skenbar och aktiv effekt. Protokollet som skall fyllas i syns i tabell 7.1.

Tomgångsp	prov:								Ρμ=	########	W				
% av U _n	U	Ur-s	Us-t	Ur-t	Ir	ls	lt	P ₀	Stot	Cos φ	f	U ²	Time	Pk	Pk-Pfw
20															
30															
40															
50															
60															
70															
80															
90															
100															
110															
120															
130															

Tabell 7.1: Protokoll för tomgångsprovet.

- 3. Kör maskinen med minst märklast tills det att arbetstemperatur uppnåtts i lindningarna, då inte temperaturen i lindningarna varierar mer än 2 K per timma eller då temperaturen ligger maximalt 5 K ifrån arbetstemperaturen.
- 4. Mät resistansen i lindningarna.
- 5. Genomför lasttester. Börja återigen med den högsta lasten och sänk lasten efterhand. Anteckna spänningar, strömmar, inmatad skenbar och aktiv effekt, frekvens, vridmoment och varvtal. Mät lindningsresistanserna efter sista lasttestet enligt 5.2.4. Protokollet som skall fyllas i syns i tabell 7.2.

set T to	Ur-s	Us-t	Ur-t	Ir	ls	lt	Ptot	Stot	Cos φ	f	Т	n	P_{fw}	η	time
									•						

Tabell 7.2: Protokoll för lasttestet.

- 6. Lasta maskinen igen tills arbetstemperatur uppnås enligt steg 3.
- 7. Stäng av maskinen och mät resistansen upprepade gånger för att göra en avsvalningskurva enligt 5.2.3.

8 Slutsatser

Som redan konstaterats så är det mycket svårt att utvärdera den nya testgången efter bara en testning men en del saker kan ändå konstateras;

För att få tillräcklig noggrannhet i mätningarna krävs att momentgivaren kontrolleras och åtgärdas så att den inte pendlar mellan flertalet värden. Alternativt att det fastställs hur värdena om möjligt skall avläsas för att få större noggrannhet då de utförda mätningarna inte håller tillräcklig noggrannhet. Detta påverkar givetvis även övriga mätningar och beräkningar, men att dessa ändå beter sig i princip som förväntat måste ses som ett gott tecken.

Den utarbetade mätgången är enligt vad som rekommenderas i [10] och tanken är att den skall vara uppställd efter att vara så tidseffektiv som möjligt, även om detta förfarande troligen är något mer tidskrävande än den tidigare processen.

9 Referenser

[1] P. Van Roy, B. Slaets, R. Belmans, "Induction Motor Efficiency: a number with many meanings", 1998

[2] C. N. Glew, "Stray load losses in induction motors: a challenge to academia", Power Engineering Journal, February 1998

[3] A. Hughes, "Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications" 3rd Edition, 2005, ISBN 0750647183

[4] L. Harnefors, "Control of Variable-Speed Drives", 2002

[5] S. Corino, E. Romero, L. F. Mantilla, "How the efficiency of induction motor is measured", ICREPQ 2008

[6] http://www.ne.se/lang/hystereskurva, 2010-03-15

[7] R. K. Rajput, "A Textbook of Electrical Engineering", 2nd Edition, 2005, ISBN 8170086094

[8] K. K. Schwarz, "Survey of basic stray losses in squirrel-cage induction motors", Proceedings IEE, Vol. 111, No. 9, September 1964

[9] A. A. Jimoh, R. D. Findlay, M. Poloujadoff, "Stray Losses in Induction machines: Part I, Definition, Origin and Measurement", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 6, June 1985

[10] IEC 60034-2-1:2007

[11] A. Grauers, "Elteknik", department of Electric Power Engineering, 1999

[12] http://www.reliance.com/prodserv/motgen/b7093.htm, 2010-04-13

[13] G. J. Anders, "Rating of electric power cables: ampacity computations for transmission, distribution, and industrial applications" 1997, ISBN 0780311779

[14] E. F. Brush, Jr, J. G Cowie, D. T. Peters, D. J. Van Son, "Die-cast copper motor rotors: Motor test results, copper compared to aluminium", International Conference on Electric Machines, 2002

[15] R. Lin, A. Haavisto, A. Arkkio "Analysis of eddy-current loss in end shield and frame of a large induction machine", IEEE Transactions on magnetics, Mars 2010

[16] L. V. Mironov et al., "Magnetic aging of low-carbon electric sheet", Metal Science and Heat Treatment, No. 8, 1973

[17] D. Reimert, "Protective Relaying for Power Generation Systems", 1st Edition, 2005, ISBN 0824707001

Appendix A - förkortningar

В	magnetisk flödestäthet	(T)
d	tjocklek på lamineringsskiva	(m)
f	frekvens	(Hz)
Н	magnetisk fältstyrka	(A/m)
I	matningsströmmen	(A)
i _m	magnetiseringsströmmen	(A)
i _r	rotorström	(A)
i _s	statorström	(A)
l _{tomgång}	tomgångsström	(A)
l _{tomgång,100}	tomgångsströmmen vid märkspänning	(A)
L _m	magnetiseringsinduktans	(H)
L _r	rotorinduktans	(H)
L _s	statorinduktans	(H)
n	varvtal	(rps)
P_{eddy}	virvelströmsförluster	(W)
P_{fe}	järnförluster i statorn	(W)
P_{fw}	mekaniska förluster	(W)
P _h	hysteresförluster	(W)
P _{in}	ineffekt	(W)
P _k	konstanta förluster	(W)
P _{l,r}	residualförluster	(W)
P _r	resistiva rotorförluster	(W)
Ps	resistiva statorförluster	(W)
P_{stray}	tillsatsförluster	(W)
P _{stray,100}	tillsatsförluster vid märkeffekt	(W)
P _{ut}	av motorn avgiven effekt	(W)
Ψ_r	rotorflöde	(Wb)
Ψ_{s}	statorflöde	(Wb)
R_{fas}	lidningsresistans per fas	(Ω)
R _{kall}	lindningsresistansen vid rumstemperatur	(Ω)
R _r	rotorresistans	(Ω)
R _s	statorresistans	(Ω)
R	line-to-line-resistans	(Ω)
R_{varm}	lindningsresistansen vid märkdrift	(Ω)
ρ	resistivitet	(Ωm)
S	eftersläpning	
Т	vridmoment	(Nm)
θ_n	lindningstemperatur vid märkdrift	(°C)
U	matningsspänning	(V)
Vr	rotorspänning	(V)
Vs	statorspänning	(V)

W	arbete	(W)
ω _s	den synkrona hastigheten	(rad/s)
ω _r	rotorhastighet	(rad/s)

Allmänt gäller för indexering, om inte annat indikeras:

- 0 indikerar no-load
- 1 indikerar input
- 2 indikerar output

Appendix B - mätdata

	Load te	est													
%	Ur-s	Us-t	Ur-t	lr	ls	lt	Ptot	Stot	Cos φ	f	т	n	P _{mek}	η	time
29,31%	498,5	498,2	498,3	69,93	69,21	69,34	34750	59990	0,58	50,044	309	997	32245	92,79%	13:47
38,10%	497,9	497,9	498,2	78,82	78,15	78,96	44700	67840	0,66	50,042	402	996	41908	93,75%	13:45
50,13%	498,0	497,9	497,3	93,88	93,60	93,05	58980	80620	0,73	50,034	530	994	55140	93,49%	13:44
63,40%	497,2	498,2	497,2	110,22	111,27	110,37	74000	95330	0,78	50,057	671	993	69740	94,24%	13:42
81,86%	497,0	497,7	496,6	135,65	136,48	135,33	94490	116950	0,81	50,046	869	990	90046	95,30%	13:40
89,21%	496,8	497,5	497,6	146,95	147,20	148,01	103510	126950	0,82	50,03	948	989	98133	94,80%	13:38
100,58%	495,4	495,3	495,5	168,20	167,32	168,00	118430	144020	0,82	50,06	1071	987	110641	93,42%	13:36
111,70%	495,6	496,0	495,0	186,18	186,53	185,25	131540	159630	0,82	50,03	1193	984	122869	93,41%	13:34
116,92%	495,4	496,6	495,9	195,26	196,58	196,32	138650	168430	0,82	50,06	1250	983	128609	92,76%	13:32

Rkall,linetoline0,0480Rvarm0,0577

Rslut 0,0559

No load test:									Pμ=	649	W			
% av U _n		Ur-s	Us-t	Ur-t	lr	ls	lt	Po	Stot	Cos φ	f	U ²	Pk-Pfw	Pk
20,00	100,0	100,0	100,2	100,1	12,5	12,5	12,5	657,0	2171,0	0,00	0,0	10021	0,48	649,47
30	150,0	150,7	151,0	150,9	17,2	17,2	17,2	861,0	4492,0	0,00	0,0	22763	197,82	846,81
40	200,0	200,7	200,7	200,5	22,0	22,0	22,0	896,0	7643,0	0,00	0,0	40246	223,78	872,78
50	250,0	250,1	250,7	250,4	27,1	27,1	27,2	1037,0	11761,0	0,00	0,0	62700	352,70	1001,70
60	300,0	300,6	300,6	300,3	32,5	32,5	32,4	1290,0	16902,0	0,00	0,0	90298	590,38	1239,38
70	350,0	350,7	350,9	351,0	37,8	37,7	37,8	1520,0	22931,0	0,00	0,0	123110	802,66	1451,66
80	400,0	400,7	401,0	401,1	43,1	42,9	43,0	1690,0	29860,0	0,00	0,0	160745	952,25	1601,25
90	450,0	450,5	450,6	454,9	49,2	49,3	49,1	2040,0	38370,0	0,00	0,0	204307	1274,83	1923,83
100	500,0	501,5	501,1	501,1	55,9	55,6	55,6	2300,0	48350,0	0,00	50,0	251221	1502,10	2151,10
110	550,0	521,3	520,9	520,8	59,0	58,8	58,7	2470,0	53090,0	0,00	50,0	271455	1654,89	2303,89
120	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0	0	0
130	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0	0	0

Ps	Pfr+wind	Pfe	Pr	k_theta	Pir	Plr2	Pstray	Pstrayschablon	Rvarm	Ur
407,69	649	1492,0	99,19	1,007	-142,89	-158,76	130,39	316,58	0,0559	496,58
524,21	649	1486,1	171,87	1,007	-38,91	-68,46	220,69	398,09	0,0561	495,34
745,19	649	1482,8	342,73	1,007	619,82	94,46	383,61	559,23	0,0564	494,64
1049,10	649	1475,1	503,59	1,007	583,48	325,72	614,87	780,83	0,0568	493,04
1594,64	649	1468,0	920,24	1,007	-187,67	742,13	1031,29	1159,00	0,0573	491,56
1883,96	649	1464,8	1108,96	1,007	270,72	938,16	1227,32	1347,85	0,0574	490,90
2455,46	649	1453,5	1498,48	1,007	1732,80	1277,30	1566,46	1750,45	0,0577	488,54
3015,12	649	1450,7	2046,45	1,007	1509,27	1654,51	1943,66		0,0577	487,95
3350,35	649	1448,1	2290,32	1,007	2303,11	1844,68	2133,83		0,0577	487,39

Pin-Put	Ps/(Pin-Put)	Pr/(Pin-Put)	Pk/(Pin-Put)	Plr/(Pin-Put)	Plr/Pin
2505	16,3%	4,0%	85,5%	-5,7%	-0,411%
2792	18,8%	6,2%	76,5%	-1,4%	-0,087%
3840	19,4%	8,9%	55,5%	16,1%	1,051%
4260	24,6%	11,8%	49,9%	13,7%	0,788%
4444	35,9%	20,7%	47,6%	-4,2%	-0,199%
5377	35,0%	20,6%	39,3%	5,0%	0,262%
7789	31,5%	19,2%	27,0%	22,2%	1,463%
8671	34,8%	23,6%	24,2%	17,4%	1,147%
10041	33,4%	22,8%	20,9%	22,9%	1,661%