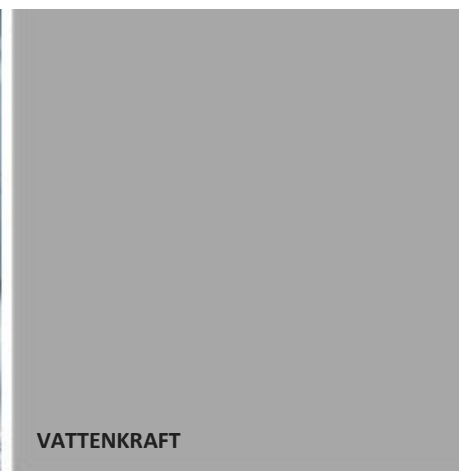


VÄGLEDNING FÖR RELATIV VERKNINGSGRADSMÄTNING MED WINTER-KENNEDYMETODEN

RAPPORT 2015:123



Vägledning för relativ verkningsgradsmätning med Winter- Kennedymetoden

MARIA LINDEGREN (NORCONSULT AB)

DANIEL LITSTRÖM (ÅF AB)

ANDERS PETTERSSON (SWECO AB)

MIKAEL SENDELIUS (SWECO AB)

MICHEL J. CERVANTES (LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET)

ISBN 978-91-7673-123-9 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Rapporten är en vägledning för utförande, analys och rapportering av relativa verkningsgradsmätningar med Winter-Kennedymetoden. Vägledningen bygger på författarnas samlade erfarenheter från s.k. indexprov. I rapporten sammanfattar också författarna sina förslag på vad som behöver utredas vidare för att förbättra Winter-Kennedymetoden.

Winter-Kennedymetoden används bl.a. tillsammans med modellprov när anläggningsägaren vill verifiera om en förväntad prestandaökning erhållits efter en förnyelse. Den används också för att ta fram kombinerings för dubbelreglerade turbiner.

Uppdraget har utförts som en del av Elforsks och sedemera Energiforsks program "Anläggningsteknik Vattenkraft 2013-2014". Rapporten har skrivits av Maria Lindegren, Norconsult AB, Daniel Litström, ÅF AB (tidigare på Pöyry SwedPower AB), Anders Pettersson, SWECO Energuide AB, Mikael Sendelius, SWECO Energuide AB och Michel Cervantes, Luleå tekniska universitet. Magnus Lövgren, Vattenfall Vattenkraft AB, har medverkat vid en del av projektmötena och bidragit med synpunkter från en anläggningsägares perspektiv. Under arbetet har rapporten också remitterats till anläggningsägare.

Följande företag har medverkat i "Anläggningsteknik vattenkraft 2013-2014":
Vattenfall Vattenkraft, Fortum Generation, E.ON Vattenkraft Sverige, Statkraft Sverige, Skellefteå Kraft, Jämtkraft, Umeå Energi, Sollefteåforsens, Karlstads Energi och Jönköping Energi.

Stockholm april 2015



Cristian Andersson

Energiforsk

Sammanfattning

I denna rapport beskrivs utförandet av relativa verkningsgradsmätningar med Winter-Kennedymetoden. Vägledningen bygger på författarnas erfarenheter.

Huvudsyftena med denna vägledning är att harmonisera arbetssätten för hur relativa verkningsgradsmätningar med Winter-Kennedymetoden utförs och ge anvisningar till innehållet i provrapporterna.

Vägledningen riktar sig även till beställare/anläggningsägare i syfte att ge ökad kunskap kring provets genomförande och vilka förberedelser som behöver göras inför ett prov.

Vägledningen har delats upp i fyra olika delar: förberedelser, mätning, analys och rapportering.

I inledningen beskrivs teorin bakom Winter-Kennedymetoden. I samma avsnitt ges även en generell beskrivning av hur verkningsgraden mäts tillsammans med definitioner på brutto- och nettofallhöjd.

Den följande delen behandlar viktiga förberedelser inför ett prov. Dessa anvisningar och rekommendationer riktar sig både till beställare och utförare. Ett av syftena är att vägleda beställare till vad som ska göras inför ett prov för att öka kvalitén och minska tidsåtgången för ett prov.

I avsnittet avseende själva mätningen ges rekommendationer hur ett prov ska genomföras. Rekommendationerna avser bland annat mättid, antalet provpunkter, placering av givare samt möjliga orsaker till mätfel.

Avsnittet "Analys" beskriver hur mätdata ska behandlas och likställas. Detta måste göras bland annat för att mätningar/prov sällan sker vid samma fallhöjd eller temperatur.

Det sista avsnittet, rapportering, innehåller minimikrav på vad som ska ingå i en provrapport.

Rapporten avslutas med ett avsnitt som ger förslag på vad som behöver utredas eller undersökas för att förbättra Winter-Kennedymetoden.

Summary

This report describes the execution of relative efficiency measurements with the Winter-Kennedy method. The guideline is based on the authors' experience.

The main objectives of the guideline are to standardize the working method of the tests and give guidelines for the content of the report.

The guideline is also addressed to clients/plant owners in order to increase knowledge about index tests and what preparations need to be made.

The guideline has been divided into four parts; preparation, measurement, analysis and reporting.

The introduction presents the theory behind the Winter-Kennedy method. The same section also gives a general description of how the efficiency is measured and calculated and how the net head is defined.

The first part deals with the preparations that are important to implement before a test. These instructions and recommendations are aimed for both plant owners as well for the measurement staff. One of the purposes is to guide the clients to the needed preoperational work in order to increase the quality and decrease the amount of time for an index test.

The section regarding measurements provides practical recommendations how to perform a measurement. Some of the recommendations included in the report are measurement time, the number of measurement points, placement of the sensors and possible causes of measurement errors.

The chapter analysis describes how measurement data are analysed and adjusted for a specific head. A particular reason for this is that the tests rarely occur at the same head and water temperature.

The last section, reporting, contains guidelines on the minimum content of a test report.

The report concludes with suggestions for further investigations needed to improve the Winter-Kennedy method.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Introduktion indexprov	1
1.3	Syfte	2
1.4	Avgränsningar	2
1.5	Medverkande	3
2	Teori - verkningsgrad	4
2.1	Allmänt	4
2.2	Turbineffekt	4
2.3	Flödesmätning med Winter-Kennedymetoden	6
2.4	Fallhöjd	8
3	Förberedelser	11
3.1	Allmänt	11
3.2	Beställarens ansvar	11
3.2.1	Generellt	11
3.2.2	Driftpersonal	11
3.2.3	Tryckuttag	11
3.2.4	Effektmätning	12
3.2.5	Övre och nedre vattenytor	12
3.2.6	Övrigt	12
3.3	Provledarens ansvar	13
3.3.1	Mätutrustning och mätsystem	13
3.3.2	Effektmätning	14
3.3.3	Övrigt	14
4	Mätningar	15
4.1	Beställarens ansvar	15
4.2	Provledarens ansvar	15
4.3	Vad som ska mätas eller noteras	15
4.4	Mättid	16
4.5	Provpunkter	17
4.5.1	Francisaggregat	17
4.5.2	Kaplan- och bulbaggregat	17
4.6	Inkoppling och kontroll av mätutrustning	18
4.6.1	Allmänt	18
4.6.2	Differenstryckmätning	18
4.6.3	Mätning av vattenytor	18
4.6.4	Effektmätning	21
4.6.5	Ledskeneöppning	22
4.6.6	Löpskovelvinkel	22
4.7	Felkällor under mätning	22
4.7.1	Luft i slangar	22
4.7.2	Nedkylning av differenstryckmätare	23
4.7.3	Olika störningar på signalen	23
4.7.4	Variation i fallhöjd	23
4.7.5	Intilliggande aggregat och utskovsluckor	24
5	Analys	25
5.1	Generellt	25
5.2	Beräkning av turbinverkningsgrad	25
5.2.1	Vattnets densitet	25

5.2.2	Vattnets viskositet	25
5.2.3	Tyngdaccelerationen	26
5.2.4	Nettofallhöjd	26
5.2.5	Turbineffekt	28
5.3	Nivåsättning och uppskalning från modelldata	29
5.3.1	Relativt turbinflöde och bestämning av k	29
5.3.2	Relativ turbinverkningsgrad	30
5.4	Normering av provpunkter till gemensam fallhöjd	30
5.5	Kombinering för dubbelreglerande aggregat	31
5.5.1	Bakgrund.....	31
5.5.2	Inverkan av fallhöjdsvariation	32
5.6	Felanalys	33
5.7	Ändrad flödeskonstant	33
6	Rapportering	34
6.1	Allmänt	34
6.2	Innehåll	34
6.2.1	Provobjekt	34
6.2.2	Provets syfte och omfattning.....	34
6.2.3	Provdeltagare.....	34
6.2.4	Provdatum	34
6.2.5	Beskrivning av provobjektet.....	34
6.2.6	Beskrivning av mätutrustning.....	35
6.2.7	Beskrivning av provgenomförande och resultat.....	35
6.2.8	Mätta parametrar	36
6.2.9	Mätvärden, avläsningar och beräknade värden	37
7	Utvecklingsbehov	39
8	Referenser	41
Appendix A - Förluster	42	
Förluster i tunnlar eller kanaler	42	
Krökförluster	44	
Plötslig utvidgning - Borda-Carnot stöt.....	45	
Kontraktion	45	
Appendix B – Förberedelser inför prov	47	
Appendix C – Tryckkuttagens placering	49	
Appendix D – Vattnets densitet	50	
Appendix E – Likformighetslagarna	52	
Likformighetslagarna	52	
Enhetsvarvtal och enhetsflöde	52	
Appendix F - Felanalys	53	
Appendix G – Maskindata	55	
Generatordata	55	
Turbindata	55	
Appendix H – Redovisning av mätdata	57	

Nomenklatur

Följande nomenklatur används i texten:

Bokstav

A = tvärtsnittarea
d eller D = diameter
E = gH = specifik energi
f = friktionsfaktor
g = tyngdaccelerationen
h = höjd
H = fallhöjd
k = konstant
I = generatorström
 I_M = märkströmmen
l eller L = längd
M = Manningstal
p = våta perimetern
P = effekt eller tryck
Q = flöde
R = hydraulisk radie
Re = Reynoldstal
 Re_{ref} = Reynoldstal vid referens på $7 \cdot 10^6$
 Re_A = Reynoldstal vid driftpunkt A
 Re_B = Reynoldstal vid driftpunkt B
U = spänningen
v = hastighet
 V_{ref} = referensvärde för olika turbin typer vid beräkning av skalbara förluster
z = höjd
 P_t = turbineffekten
 P_a = generatoreffekten mätt vid generatoruttag
 P_b = mekaniska och elektriska förluster i generatorn inklusive ventilationsförluster
 P_c = generatorns andel av bär-/axiallagerförluster
 P_d = förluster i alla roterande delar utanför turbin och generator
 P_e = effektuttag från direktdrivna hjälpmaskiner
 P_f = effektuttag från hjälputrustning t.ex. turbinreglering om denna enligt kontrakt ska belasta turbinen

Grekisk bokstav

δ_{ref} = den del av turbinens förluster som är skalbar
 ε = råheten
 ΔP = differenstrycket
 $\Delta \eta_h$ = korrektion/uppräkning i verkningsgrad vid jämförelse
 ρ = densitet
 η = verkningsgrad
 η_{hoptM} = bästa verkningsgrad i modellen (modellprov)

Index

a = beteckning för uppmätt generatoreffekt

b till *f* = generella beteckningar på olika förluster

bel = belastningsförluster generator

bel-mag = belastningsförluster för magnetiseringen

gen = generator

gen-f = generatorförluster

f = förluster

fe = järnförluster

M = märk

n = netto i exempelvis nettofallhöjd

t = turbin

tom = tomgångsförluster

r = betecknar komponent i radiellt led

rel = relativ

1 = betecknar antingen inlopp, intag eller innerradie på spiral

2 = betecknar antingen sugrörsutlopp eller ytterradie på spiral

Ord

Mätpunkt: var någonstans på stationen som mätvärdet tas.

Provpunkt: avser en mätning av en av turbinens driftpunkter.

Provledare: Ansvarig mättekniker för indexprovet.

Relativ verkningsgrad: turbinverkningsgrad beräknad med data från ett indexprov.

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Den stora utbyggnaden av svensk vattenkraft skedde mellan 1940 och 1970. Från 1994 fram tills idag har vattenkraften stått för 40-50% av den årliga elproduktionen i Sverige. Sedan 1990 har den totala årliga elanvändningen inklusive distributionsförluster legat mellan 140 och 160 TWh [1].

Aggregaten som togs i drift under utbyggnaden genomgår nu en förnyelse där både löphjul och generatorer byts ut eller rustas upp. Ett nytt löphjul har oftast bättre verkningsgrad jämfört med det gamla och i en del fall har även turbinens kapacitet att sluka vatten ökats. Detta gör i de flesta fall att ett nytt löphjul står för den största delen av aggregatets ökade prestanda vid förnyelseprojekt.

Efter en förnyelse är anläggningsägaren angelägen om att få veta om den förväntade prestandaökning erhållits. Detta inte enbart för att veta om turbinleverantören uppfyllt sina garantier utan också för att gentemot Energimyndigheten kunna redovisa förbättringen och erhålla el-certifikat. Idag kan relativa verkningsgradsmätning, där flödet mäts med Winter-Kennedy-metoden, användas för detta ändamål.

1.2 Introduktion Winter-Kennedy-metoden

Winter-Kennedy-metoden kan användas för att ta fram en relativ verkningsgradskurva. Vid en jämförelse med garantier rekommenderas en absolut metod [2]. Absoluta metoder tar hänsyn till systematiska och slumpvisa fel medan relativa metoder enbart tar hänsyn till slumpvisa fel.

Enligt IEC 60041 kan relativ verkningsgradsmätning med Winter-Kennedy-metoden användas som en del av ett leveransprov då det relativa flödet kalibreras mot en flödesmätningssätt godkänd enligt denna standard. Metoden kan också vid en överenskommelse mellan parterna användas för att kontrollera effektgarantin.

För dubbelreglerade turbiner används metoden även för att ta fram kombineringskurvan. Kombineringskurvan är det optimala sambandet mellan löphjulsvinkeln och ledskenor.

I Sverige är den dominerande delen av vattenkraftstationerna lågfalloppslagsstationer där det är svårt och kostsamt att mäta flödet med en absolut metod med god noggrannhet. Relativ flödesmätning med Winter-Kennedy-metoden används därför ofta vid förnyelser.

Genom åren har resultaten från mätningarna inte alltid stämt med förväntat resultat. Den största osäkerheten ligger i den relativa mätningen av flödet med Winter-Kennedy-metoden samt olika sätt att hantera förluster uppströms och nedströms turbinen.

De parametrar som används för att bestämma verkningsgraden under ett indexprov är differenstrycket, generatoreffekt och fallhöjd. Turbineffekten

beräknas sedan genom att addera generatorförlusterna till den uppmätta generatoreffekten.

Winter-Kennedymetoden baseras på att flödet är proportionellt mot kvadratroten ur differenstrycket. Finns en spiral mäts differenstrycket mellan spiralens yttersida och innersida, se figur 2.

1.3 Syfte

Syftet med projektet är att sammanställa ett branschgemensamt dokument i form av en vägledning för relativ verkningsgradsmätning med Winter-Kennedymetoden. Vägledningen vänder sig till de som utför indexprov och till beställare/anläggningsägare.

Målet är att vägleda de som utför prov för att få ett enhetligt sätt att utföra prov, utvärdera och rapportera resultat samt att belysa de frågor som kan behöva utredas för vidare utveckling av metoden.

Målet är även att ge anläggningsägaren ökad kunskap om hur prov går till, vilka resultat som kan förväntas och hur anläggningsägaren kan förbereda sig och anläggningen inför ett prov. Detta i syfte att öka kvalitén och göra mätningen effektivare.

1.4 Avgränsningar

Vägledningen i denna rapport avser relativa mätningar och är i första hand tillämplig för Kaplan- och Francisturbiner med spiral samt bulbturbiner. Peltonturbiner och sumpuppställda aggregat omfattas inte av denna vägledning.

De uppgifter som erhålls från anläggningsägaren avseende generatorförluster antas vara korrekta. I denna vägledning diskuteras därför endast hur turbineffekten beräknas utifrån erhållna data.

Samma sak gäller uppgifter för att beräkna fallhöjden/justera provutförarens givare till rätt nivå (yta).

Vägledningen omfattar inte hur man avgör om erhållna data är korrekta eller inte. Däremot diskuteras hur felaktiga data påverkar resultatet.

Där spiral finns mäts differenstrycket med Winter-Kennedymetoden, mellan spiralens yttersida och innersida. Flödet beräknas genom att kvadratroten av differenstrycket multipliceras med en flödeskonstant.

I denna vägledning antas att flödeskonstanten inte ändras mellan prov före respektive efter renovering. Detta antagande har i vissa fall visat sig vara fel [3]. Det finns exempel på att flödesförhållandena påverkats av till exempel ett löphjulsbyte eller av förändrade intagsförhållanden och att flödeskonstanten därmed förändrats. För ökad noggrannhet bör homologa modellprov göras på det gamla och det nya löphjulet.

I vägledningen antas att gravitationen är densamma vid intaget som vid utloppet. Även lufttrycket och vattnets densitet antas vara desamma vid intaget som vid sugrörsutloppet. Dessa antaganden eller förenklingar kan göras då

vägledningen avser jämförande mätningar på aggregat med en fallhöjd under 100 m.

Korrektion med avseende på densitet och viskositet görs till garantivärden för det nya löphjulet. Hur korrektionen med avseende på viskositet görs, redovisas i avsnitt 5.2.2.

Storleken på generatorns förluster ifrågasätts nästan aldrig vid ett indexprov. Uppgifter på tomgångsförluster och belastningsförluster kan vara oklara. Osäkerhet kan också finnas ifall de data som erhålls är garantivärden eller om de är uppmätta värden vid prov. I denna riktlinje förutsätts att de uppgifter som ges avseende generatorns olika förluster är korrekta. Det ska understrykas att detta är en osäkerhet i mätningen som inte tas upp i denna vägledning.

1.5 Medverkande

Deltagare i arbetsgruppen:

Maria Lindegren, Norconsult AB
Daniel Litström, ÅF AB (tidigare på Pöyry SwedPower AB)
Anders Pettersson, SWECO Energuide AB
Mikael Sendelius, SWECO Energuide AB
Michel Cervantes, Luleå tekniska universitet

Magnus Lövgren, Vattenfall Vattenkraft AB, har medverkat vid en del av projektmötena och bidragit med synpunkter från en anläggningsägares synvinkel.

2 Teori - verkningsgrad

2.1 Allmänt

Målet med proven som utförs i samband med en förnyelse är att visa på vilken prestandaförändring förnyelsen har gett upphov till. Detta görs genom att en relativ verkningsgradskurva tas fram före respektive efter förnyelsen. Verkningsgradskurvorna jämförs och prestandaförändringen kan beräknas. Den relativa verkningsgraden η_{rel} beräknas med följande formel [4]:

$$\eta_{rel} = \frac{P_t}{Q_{rel} \cdot H \cdot \rho \cdot g} \quad (1)$$

där P_t är turbineffekten, Q_{rel} det relativa flödet, H fallhöjden, ρ vattnets densitet vid den sektion där flödet mäts och g tyngdaccelerationen.

Vid en relativ verkningsgradsmätning mäts inte flödet absolut utan relateras till hur mycket flödet förändras mellan olika provpunkter. För att kunna bestämma ett värde eller nivå på verkningsgraden måste flödet nivåsättas med hjälp av en flödeskonstant, se 2.3.

2.2 Turbineffekt

Turbineffekten beräknas enligt IEC 60041 som:

$$P_t = P_a + P_b + P_c + P_d + P_e - P_f \quad (2)$$

där P_a är generatoreffekten mätt vid generatoruttag. P_b är de mekaniska och elektriska förlusterna i generatoren inklusive ventilations-förlusterna. P_c är generatorns andel av bär-/axiallagerförlusterna. Då turbin och generator har ett gemensamt axiallager ska förlusterna fördelas mellan turbin och generator enligt IEC 60041. P_d är förlusterna i alla roterande delar utanför turbinen och generatoren så som t.ex. svänghjul, växel, extern fläkt. P_e är effektuttag från direktdrivna hjälpmaskiner. P_f är effektuttag från hjälputrustning t.ex. turbinreglering om denna enligt kontrakt ska belasta turbinen.

Om det inte är möjligt att mäta vid generatoruttaget ska mätt effekt P_{gen} korrigeras för förlusterna mellan uttaget och mätsektionen.

Vid prov beräknas turbineffekten, P_t , vanligen som:

$$P_t = P_{gen} + P_{gen-f} \quad (3)$$

där P_{gen-f} är generatorförluster.

P_{gen-f} består av tomgångsförluster P_{tom} samt belastningsförluster P_{bel} och beräknas som:

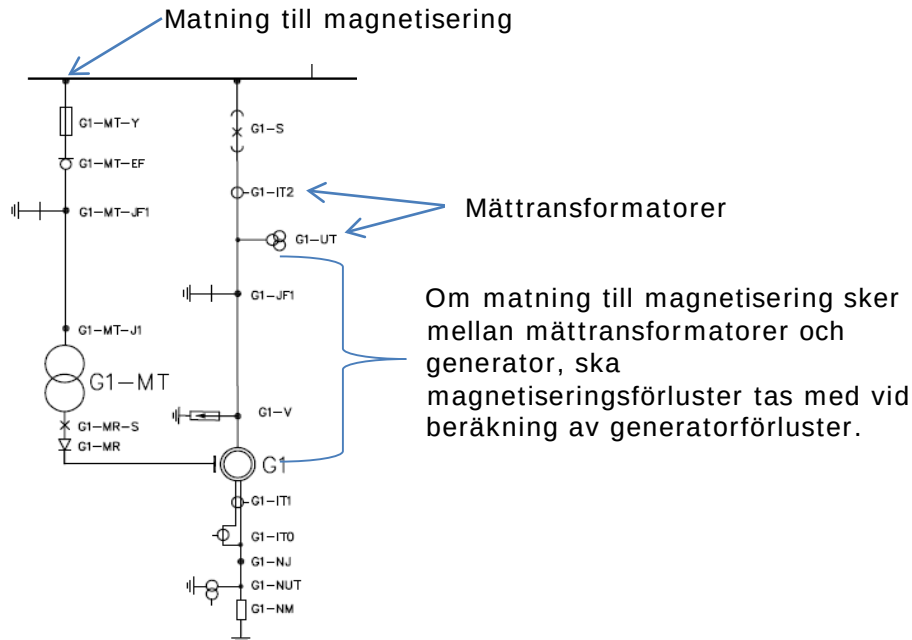
$$P_{gen-f} = P_{tom} + P_{bel} \cdot \left(\frac{I}{I_M} \right)^2 \quad (4)$$

Där I är uppmätt generatorström medan I_M är märkströmmen. Som alternativ till generatorströmmen kan man vid spänningen U lika med märkspänningen U_M använda uppmätt effekt delat med märkeffekten.

Tomgångsförlusterna P_{tom} , då ingen ström går i statorlindningen, kan uppdelas i lagerförluster, ventilationsförluster, järnförluster, polplattförluster (för maskiner med utpräglade poler) och rotorförluster (för maskiner med cylindrisk rotor).

Belastningsförlusterna P_{bel} , finns bara vid last och består av likströmsmätta kopparförluster, inre och yttre tillsatsförluster. Belastningsförlusterna varierar med strömmen i kvadrat.

Om det sitter en magnetiseringsgenerator på turbin- eller generatoraxeln så ska magnetiseringsförlusterna tas med i beräkningen av turbinverkningsgraden, enligt avsnitt nedan. Alternativet är att energin till magnetiseringen sker externt och då ska magnetiseringen inte ingå i beräkningen av turbinverkningsgraden.



Figur 1 – Exempel på statisk magnetisering med matning från skena.

Magnetiseringsförlusterna P_{mag-f} är en del av generatorförlusterna P_{gen-f} och består av en del som är konstant och en del som beror av effekten.

$$P_{gen-f} = P_{tom} + P_{tom-mag} + (P_{bel} + P_{bel-mag}) \cdot \left(\frac{I}{I_M} \right)^2 \quad (5)$$

Vid beräkningarna av generatorförlusterna används belastningsförlusterna vid märkeffekten/märkströmmen.

Friktionsförluster

Oftast ingår exempelvis generatorns ventilationsförluster i de specificerade tomgångsförlusterna. Ibland ingår också en andel av de lagerförluster (friktionsförluster som uppstår i lager) som bedöms härröra till generatoren.

Lagerförlusterna som uppstår i bärlagret på grund av den belastande roterande massan bör fördelas mellan generator och turbin (löphjul+axel till skiljegräns mellan turbin och generator) med hänsyn till vikt.

Tomgångsförluster

Vid beräkning av tomgångsförlusterna bör järnförlustdelen av dessa kompenseras för skillnader från märkspänningen enligt formel (6).

Om uppgifter om järnförlusternas storlek finns räknas de om för att gälla vid mätt spänning enligt nedanstående formel:

$$P_{FE-ny} = \left(\frac{U}{U_M} \right)^2 \cdot P_{Fe} \quad (6)$$

där U är uppmätt spänning, U_M märkspänning och P_{Fe} är järnförlusterna vid märkeffekten.

Magnetiseringsförluster

I de allra flesta fall anges inte magnetiseringens tomgångsförluster utan de antas vara 1/3 av de totala magnetiseringsförlusterna vid märkeffekt. Magnetiseringens belastningsförluster blir därmed 2/3 av de totala magnetiseringsförlusterna.

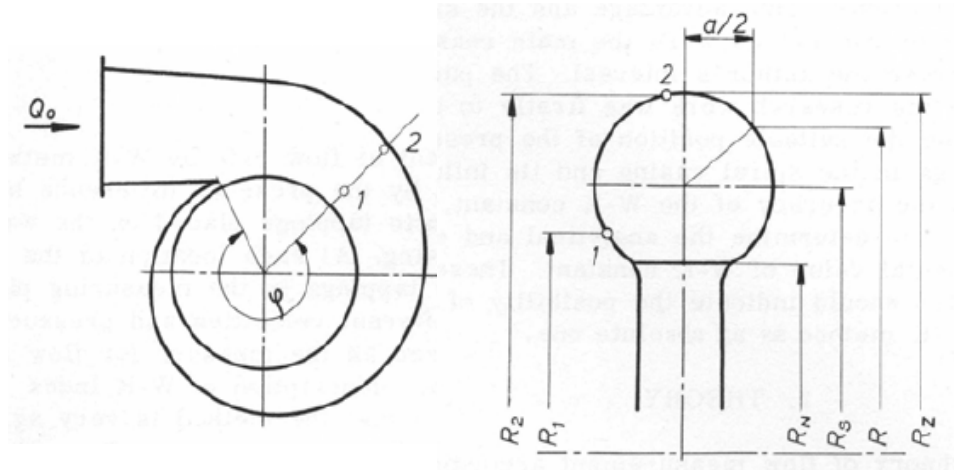
Om magnetiseringen ej belastar turbinaxeln utelämnas magnetiseringsförlusterna ur beräkningen och grundformel (4).

2.3 Flödesmätning med Winter-Kennedymetoden

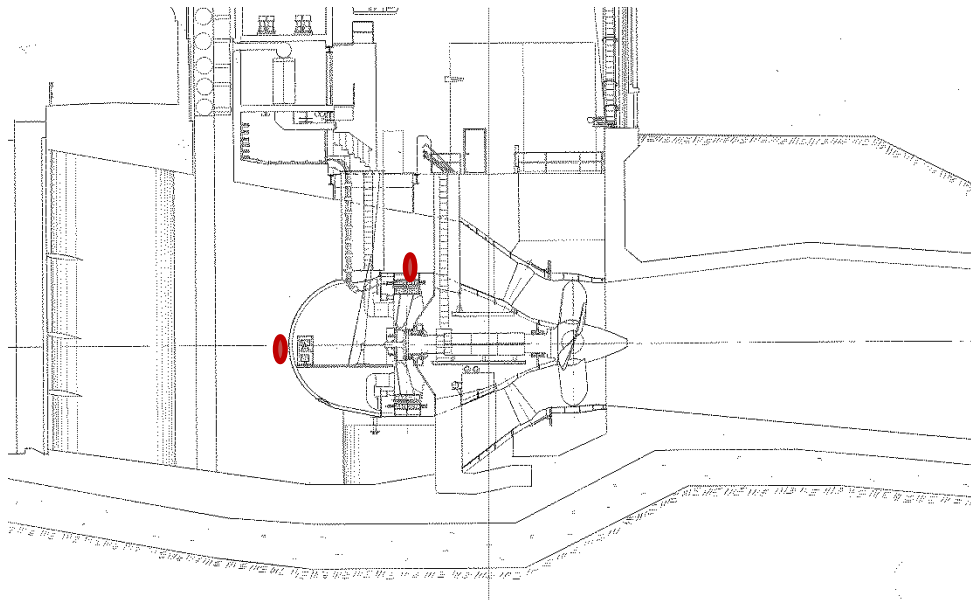
Winter-Kennedymetoden är en relativ metod för att mäta/uppskatta flödet genom en vattenturbin.

Flödet uppskattas genom att differenstrycket ΔP på kaplanaggregat mäts mellan spiralens yttre- och innerkurva, se Figur 2. För bulbturbiner mäts

differenstrycket mellan nosen och mantelytan på bulbturbinen. Trycket från mantelytan ska helst tas från minst två tryckuttag. Trycket från uttagen kopplas sedan samman till en gemensam slang eller rör. Detta tryck blir då det låga trycket och kopplas in till differenstryckgivaren. I Figur 3 visas ett exempel på placering av tryckuttagen för en bulbturbin. Se även figur 68 i IEC 60041[2]. Flödet beräknas/uppskattas sedan med hjälp av följande formel: $Q = k \cdot (\Delta P)^n$, där k är en konstant och ΔP är differenstrycket i ett tvärsnitt i spiralen [2].



Figur 2 - schematisk bild över spiralen [2].



Figur 3 - Exempel på placering av tryckuttag för en bulbturbin

Flödet genom spiralen påverkas av centrifugalkraften. Det är den radiella komponenten av Navier-Stokes ekvation som används:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_x \frac{\partial u_r}{\partial x} \right) - \frac{u_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) \quad (7)$$

Vid antagande om laminär, stationär och icke-viskös strömning samt försumbar radiell (mot löphjulet) och vertikal komponent ges den radiella komponenten av Navier-Stokes ekvation av:

$$\frac{u_\theta^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (8)$$

där u_θ , r , P och ρ är den tangentiella hastigheten (hastigheten vid varje sektion av spiralen), den radiella positionen relativt centrum på spiralen, tryck respektive densitet. Integrering med avseende på r och P med antagande om att $Q = u_\theta A$ (u_θ antas vara konstant genom den tänkta sektionen), ger ekvationen för flödet som funktion av trycket mellan två punkter i spiralen:

$$Q = A \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}} \quad (9)$$

Flödet genom en sektion kan då skrivas som:

$$Q = k \cdot \sqrt{\Delta P} \quad (10)$$

där

$$k = \frac{A}{\sqrt{\rho \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}} \quad (11)$$

Enligt IEC 60041 [2] ges ekvationen som:

$$Q = k \cdot (\Delta P)^n \quad (12)$$

där n är lika med 0,5. På grund av olika strömningsfenomen som exempelvis ej fullt utbildad strömning, inverkan av gränsskikt etc kan n variera. Den största variationen som ibland har stötts på är mellan 0,48 till 0,52 vanligen då vattnet har en låg hastighet i spiralen eller vid semispiral enligt IEC 60041. Denna variation beror på att antagandet om att icke-viskös strömning inte alltid gäller.

2.4 Fallhöjd

Enligt IEC 60041 definieras nettofallhöjden H_n som

$$H_n = \frac{E}{\bar{g}} \quad (13)$$

där $\bar{g} = \frac{g_1 + g_2}{2}$ är medeltyngdaccelerationen.

Tillgänglig specifik energi, E, mellan uppströmssidan och nerströmssidan för vattnet kan uttryckas med följande formel:

$$E = \frac{P_{abs1} - P_{abs2}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + \bar{g} \cdot (z_1 - z_2) \quad (14)$$

Där $\bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ är medeldensiteten vilket tar hänsyn till kompressabiliteten hos vattnet.

Vattnets hastighets betecknas med v och z är nivån vanligen över havsnivån. Index 1 och 2 står för inloppet respektive utloppet.

I denna vägledning antas densiteten och gravitationen vara konstanta. Ett medelvärde på p och g behöver därför inte beräknas.

P_{abs} står för atmosfärstrycket vid inloppet respektive vid utloppet, i denna vägledning antas att atmosfärstrycket är samma vid inloppet som vid utloppet och termen kan därmed strykas.

Beräkningen av tillgänglig specifik energi mellan turbininloppet och utloppet kan därför skrivas som

$$E = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \quad (15)$$

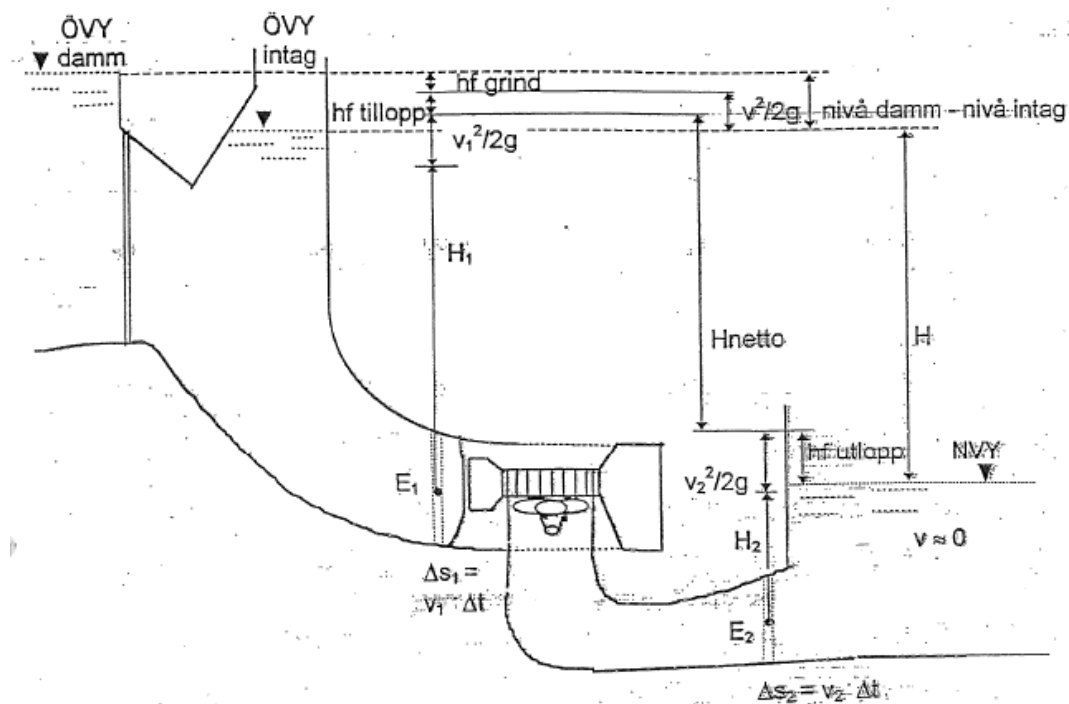
Enligt IEC ska z_1 =ÖVY (övre vattenytan) mätas vid spiralinloppet och z_2 =NVY (nedre vattenytan) vid sugrörsutloppet. I anläggningen saknas ofta dessa tryckuttag. I de fall där tryckuttag finns är de vanligen igensatta eller ur funktion. Vilket innebär att mätning måste ske på andra ställen än vad som är definierat enligt IEC. Resultaten måste därför korrigeras för olika förluster, h_{f-tot} , i vattenvägarna.

Med utgångspunkt från formel (15) kan nettofallhöjden, H_n , beräknas enligt följande generaliserade formel:

$$H_n = z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - z_2 - \frac{v_2^2}{2 \cdot g} - h_{f-tot} \quad (16)$$

där $z_1 = \text{ÖVY}$ är den övre vattenytan vilken vanligen mäts i intaget nedströms intagsgrind/-galler, $z_2 = \text{NVY}$ är den nedre vattenytan vid sugrörsutloppet, hastighetshöjden $\frac{v^2}{2 \cdot g}$ beräknas vid respektive mätsektion.

I detta fall blir v_1 hastigheten vid inloppet och v_2 vid utloppet. $h_{f\text{-tot}}$ är summa av förluster uppströms om spiralen och nedströms omsugrörutloppet uttryckt som mvp.



Figur 4 - Definition av olika fallhöjder.

I Appendix A redovisas hur olika strömningsförluster i vattenväggarna kan beräknas.

3 Förberedelser

3.1 Allmänt

Inför ett prov är det viktigt att utse en provledare som ansvarar för planering och utförandet av provet.

Provledaren planerar provet i samarbete med beställaren och utformar en provningsplan.

Alla parter ska vara överens om tillvägagångssätt, tolkning och användning av provets resultat.

3.2 Beställarens ansvar

3.2.1 Generellt

Beställaren ansvarar för att leverera alla ritningar av vikt för provet, all data, dokument, specifikationer, certifikat och att driftförhållanden meddelas/görs tillgängliga för provledaren om inte annat överenskommits.

Beställaren ansvarar också för att kontrollera och informera om prov kan genomföras. Hinder för utförande kan exempelvis vara vattendomar som inte medger att prov görs under vissa perioder eller sätter begränsningar avseende nivåer på vattenytan. Pågående arbete på stationen eller i vattenvägarna kan också utgöra hinder för prov. Låga eller höga flöden kan också vara begränsande för provet. Beställaren informerar också driftcentralen (DC) om provet.

Förberedelser finns sammanfattade i en checklista i Appendix B.

3.2.2 Driftpersonal

Innan mätning ska det vara klart var differenstryckgivaren och effektmätaren ska kopplas in samt var nivågivarna ska sänkas ned. Personal som ska vara med under provet ska ha underrättats om körningen och var inkopplingarna sker.

Under uppkopplingsdagen behöver beställaren tillhandahålla en person som ansvarar för kopplingar i stationen samt kan hjälpa till med anläggningskännedom och om eventuella problem tillstöter.

Under mätdagen krävs en person som är ansvarig för driften av aggregatet samt en person som läser av inställda pådragsvärden.

3.2.3 Tryckuttag

Det är beställarens ansvar att tryckuttagen, rördragning och ventiler är i bra skick.

Rören från tryckkuttagen bör vara dragna med en jämn lutning, utan höjdpunkter för att undvika luftfickor. Tryckkuttagen utformas enligt *ASME/ANSI Pressure Measurements, Instruments and Apparatus* [5]. Se vidare Appendix C.

Tryckuttag, rördragning och ventiler bör besiktas inför varje prov för att verifiera att rekommendationerna enligt ovan uppfylls. Besiktningsrapport levereras till provledaren. Viktigt är också att undersöka att tryckkuttagen inte är igensatta eller skadade.

Tryckkuttagen bör inte förändras, även om dessa upptäcks vara skadade vid en besiktning, mellan mätningarna. Detta för att få så lika förhållanden som möjligt mellan proven.

3.2.4 Effektmätning

Beställaren ansvarar för att generatorns mättransformatorer uppfyller gällande standarder samt att det finns kretsscheman tillgängliga som visar var utrustningen kan kopplas in.

Enligt IEC 60041 ska spännings- och strömtransformatorer vara av minst klass 0,2 (ref. IEC 185 och 186) eller bättre. Mättransformatorerna ska även kalibreras före och efter provet och ska innefatta samma börda som vid provet.

Det är ett omfattande arbete att kalibrera mättransformatorerna och om beställaren accepterar sämre noggrannhet i mätningen behöver kalibreringen inte utföras. I de fall då samma mättransformatorer används vid proven före och efter antas att det fel som mättransformatorerna har är oförändrande. För de fall där mättransformatorerna byts ut kan inte samma antagande göras och i dessa fall är det mer motiverat att utföra en kalibrering.

3.2.5 Övre och nedre vattenytor

Provutförarens peglar/tryckgivare kalibreras mot fasta pegelskalor alternativt fasta nivåer, det är därför viktigt att skalorna är i bra skick alternativt att det finns en fast punkt med känd höjd i närheten. Det är fördelaktigt om befintliga pegelrör eller golvyta/markyta vid mätpunkterna är avvägda mot en fixpunkt.

Ska stationens egna nivågivare användas, vilket enligt erfarenhet inte är att rekommendera, är det viktigt att dessa kalibreras eller som minsta krav att deras nolla och linjäritet kontrolleras mot en fast referens samt att uppgifter om peglarna levereras till provledaren.

För att få en representativ mätning av nivån på vattenytan i intaget ska grindarna vara rensade. Detta gäller främst med avseende på beräkning av eventuella grindförluster.

3.2.6 Övrigt

Beställaren ska kontrollera att det finns fasta skalor för avläsning av pådrag och löphjulsvinkel (för Kaplan- och Bulbturbiner).

Skala för servoslag, ledkransrörelse eller ledskeneöppning (a-noll) bör ha en upplösning på 1 mm eller 0,5 grad.

Skalan som visar löpskovelvinkeln bör ha en upplösning som gör det möjligt att bestämma vinkeln med 1/10 grad.

Om upplösningen på de mekaniska skalorna är dålig riskerar detta att ge sämre kombinerad och försvårar korrekt inställning vilket direkt påverkar verkningsgraden.

I de fall då en strömsignal kopplas in bör denna ha en upplösning som motsvarar de som nämnts ovan.

För att kontrollera att driftcentralen har samma värden på signalerna för pådrag och löphjulsinkel som de som läses av vid de fasta skalorna bör det finnas visning på display/dataskärm på de värden som driftcentralen har.

3.3 Provledarens ansvar

3.3.1 Mätutrustning och mätsystem

Mätutrustningen ska kontrolleras regelbundet och vara i gott skick. En indikation för att uppnå en god total mätnoggrannhet är att de respektive mätfel hålls kring de fel som angetts i det senaste kalibreringsprotokollet för respektive givare. Exempelvis ska en nivågivare mäta med 0,5 cm noggrannhet ref IEC 60041.

För en indexmetod kan det enligt erfarenhet vara lämpligt om utrustningen kalibreras enligt tillverkarens anvisningar, vanligen en gång per år, om inte parterna överenskommit annat. Som jämförelse vid acceptansprov/verkningsgradsprov på en anläggning ska enligt IEC 60041 [2] alla instrument inklusive elektriska mättransformatorer kalibreras både före och efter ett prov.

För att säkerställa god funktion hos givare och mätsystem bör en kontroll av utrustningen göras före och efter provet.

Fluktuationer definieras enligt IEC 60041 som högfrekventa (större än 1 Hz) förändringar av mätvärdena i jämförelse med medelvärdet.

Enligt IEC 60041 [2] bör någon form av dämpning användas för att eliminera fluktuationer och få en bättre mätning av de långvariga förändringarna, vilka utgör de korrekta avläsningarna för att fastställa medelvärdet. Om plötsliga förändringar uppstår är mätningen ogiltig. Variationer i fallhöjd och effekt ska vara sådan att mätvärdena ligger inom följande gränser inom en mätperiod för en provpunkt:

- effektvariationen ska inte överstiga $\pm 1,5$ % av medelvärdet;
- fallhöjdsvariationen ska inte överstiga $\pm 1,0$ % av medelvärdet.

Vid val av mätvärdesinsamling är det viktigt att beakta mätkortets samplingshastighet och antalet bitar för att få en tillräckligt bra upplösning av mätsignalerna.

Erfarenhetsmässigt kan det finnas både låg- och högfrekventa störningar som påverkar mätningen. Dessa störningar är individuella för varje vattenkraftstation. Därför kan det vara lämpligt att sampla mätvärdena vid en högre frekvens för att vid behov filtrera bort oönskade frekvenser. I praktiken använder man sig ofta av översampling d.v.s. att sampla med en högre

frekvens än högsta frekvens. Om översampling inte används för analoga signaler bör signalen lågpasstreras enligt Nykvistkriteriet.

3.3.2 Effektmätning

Enligt IEC 60041 ska effektmätare vara av klass 0,2 eller bättre.

3.3.3 Övrigt

Kablar ska vara elektriskt skärmade för att minska att signaler påverkas av elektriska störningar [6].

4 Mätningar

4.1 Beställarens ansvar

Beställaren ska informera berörd personal om provets omfattning. Driftcentralen ska vara underrättad om att de måste få klartecken från provledaren innan de ändrar inställningar på intilliggande aggregat eller öppnar/stänger utskovsluckor. Förändringar på intilliggande aggregat eller utskovsluckor kan ge oönskade konsekvenser för provet.

Det är viktigt att driftpersonal som deltar vid provet är kunniga på hur man kopplar isär ledskenorna och löphjulsvinkeln så att aggregatet kan köras felkombinerat.

4.2 Provledarens ansvar

Provledaren ska innan mätningen börjar ha gjort ett körschema för att driftcentralen ska kunna anpassa älvens flöde och produktion.

4.3 Vad som ska mätas eller noteras

Vid ett prov bör följande parametrar mätas:

- Övre vattenyta uppströms grind.
- Övre vattenyta nedströms grind.
- Nedre vattenyta efter sugrör.
- Generatoreffekt.
- Differenstryck.
- Löpskovelvinkel (om det är ett Kaplan- eller bulbturbin).
- Ledskeneöppning.
- Mättid.
- Vattentemperatur.

När det gäller löpskovelvinkel och ledskeneöppning kan det i de flesta fall vara tillräckligt med att okulärt läsa av vinkel och öppning på de fasta skalorna. I de fall då resultatet även ska användas för att ställa in rätt kombinerings är det en fördel om en mA-signal mäts detta för att relatera signalen till en vinkel eller öppning.

Utöver parametrarna ovan bör följande noteras:

- Där det finns intilliggande aggregat bör driften av dessa så som effekt och flöde noteras under varje provpunkt/mätperiod.
- Eventuellt spill från utskovsluckor.
- Notera den reaktiva effekten om inte denna mäts. Effektfaktorn ska ligga så nära 1 som möjligt.
- Notera generatorns lindningstemperatur.

-
- Om det förekommer vibrationer eller onormala ljud, som exempelvis kavitationssmällar.
 - Placering av både egna och stationens ÖVY- och NVY-givare.
 - Notera fallhöjdsvariationen och avvikelser från nominell fallhöjd.
 - Notera vilket instrument som har använts var. Notera både serienummer och tillverkare samt ägare av instrumenten. Eventuella begränsningar hur aggregatet får köras.
 - Viktigt att notera hur vattenvägen ser ut nedströms för att kunna beräkna förlusterna mellan en givarplacering och sugrörsmynning eller spiralinlopp.

All momentan avläsning av instrumentpaneler ska läsas av samtidigt under en mätperiod.

Under provet bör resultatet utvärderas för att tidigt upptäcka orimligheter i mätningen.

4.4 Mättid

Normalt brukar det vara tillräckligt att varje provpunkt mäts under 3-5 min. Stabil strömning och bra signalbehandling leder till kortare mätperioder. Längre mätperioder kan behövas om exempelvis differenstrycket varierar mycket.

Innan ett prov påbörjas rekommenderas att en kontroll utförs i syftet att ta reda på hur lång mättiden bör vara. Kontrollen utförs förslagsvis genom att differenstrycket mäts ungefär där turbinen har sin bästa verkningsgrad under 5 minuter. Därefter beräknas differenstryckets medelvärde efter 3, 3,5, 4, 4,5 och 5 minuter. Om medelvärdet avviker med mer än 0,1 % mellan exempelvis 3,5 och 4 minuter är det nödvändigt med längre mättid än 4 minuter. Mättiden bör vara så lång att en ökad mättid inte ändrar på medelvärdet med mer än 0,1 %. I en del fall är det inte möjligt att uppfylla detta krav på grund av stationens förutsättningar. I dessa fall får en sämre noggrannhet accepteras och beskrivas i rapporten.

När effekten mäts med energipulser kan det krävas längre mätperioder än 3-5 minuter. I de fall där det endast inryms 5 eller färre pulser under en mätperiod kan det för mätnoggrannhetens skull behövas längre mätperioder. Det är viktigt att få tillräckligt många pulser för att få ett bra medelvärde på frekvensen mellan pulserna. Det handlar inte om att missa en hel puls i beräkningen utan att säkerställa att frekvensen mellan pulserna är samma.

Det är lika viktigt att nå stationära förhållanden som att själva mättiden är tillräckligt lång. En kontroll över hur lång tid det bör gå innan en ny mätning startas bör därför utföras. Genom att göra en större omställning och sedan studera hur vattenytorna, effekt och differenstryck varierar över tiden samt se hur standardavvikelsen ser ut kan tiden mellan två mätningar uppskattas.

För de fall då mätning utförs på en station med långa tillloppstunnlar och/eller utloppstunnlar kan väntetiden efter en omställning behöva vara längre än 5 minuter. Detta för att inverkan av eventuella svallningar inte ska påverka mätvärdet. Svallningar förekommer då det sker större förändringar i flödet vid till exempel stopp av intilliggande aggregat eller en omställning av

löpskovelvinkeln. För att minimera risken att svallningen påverkar resultatet bör man öka flödet i små steg. Utöver detta bör en kontroll utföras av hur vattenytan, främst NVY, rör sig under mätningen. Har vattenytan konstant sjunkit eller stigit då en mätpunkt uppmätts bör man antingen vänta längre mellan omställningarna eller diskutera vilken inverkan en variation på NVY har på mätresultatet.

4.5 Provpunkter

4.5.1 Francisaggregat

Antalet provpunkter som behöver utföras varierar beroende på hur stort aggregatet är. Normalt brukar den första provpunkten ligga på cirka 30% av maximal last för ett Francisaggregat. Sedan kan lasten ökas i steg om cirka 2-5%. Antalet provpunkter blir runt 15-25 st. Det viktiga är att antalet provpunkter ska kunna påvisa riktningar och förändringar i kurvformen.

Det kan vara av intresse att ha tätare mellan provpunkterna i närheten av verkningsgradstoppen. En del Francisjul har en liten knyck i verkningsgrad vid kurvtoppen. Det är en fördel om provpunkterna under indexprovet utförs så tätt att denna knyck av verkningsgraden kan ses när punkterna plottas.

Det kan även förekomma nedgångar i verkningsgradskurvan som beror på avlösningssfenomen som uppstår i sugröret.

För att kontrollera repeterbarheten bör man efter utfört prov börja om och ta minst 3 punkter på verkningsgradskurvan. Detta för att se att dessa punkter hamnar på den kurva som först mättes upp. Utöver detta kan man även vid tre eller fyra av de ordinarie provpunkterna mäta flera gånger efter varandra. Detta för att se hur mycket resultatet sprider då inställningarna på aggregatet i teorin är exakt samma.

Normalt brukar man stega sig upp från låg last till full last när provet utförs. Detta för att undvika hysteresfenomen i pådragsmekanismen. Det finns dock vissa typer av fel som kan förstärkas om man ensidigt ökar lasten under provet. Dessa fel kan också vara av eftersläpande- eller av hystereskaraktär. Ett exempel kan vara när en vak skapas på grund av ojämnheter i spiralväggen och vaken ligger kvar vid ett ökat flöde. Minskas däremot flödet kan vaken försvinna genom ändrat flödesmönster. Därför kan det vara viktigt att ta kontroll- eller repeterpunkterna i godtycklig ordning [7].

4.5.2 Kaplan- och bulbaggreat

Vid ett prov på dubbelreglerande aggregat (Kaplan- eller bulbturbiner) används resultatet ofta även för att ställa in rätt kombineringskurva. Ju fler propellerkurvor som mäts desto bättre både vid en jämförelse och för kombineringskurvan. Ett minimikrav är att minst 5 individuella propellerkurvor ska mätas, se IEC 60041.

Propellerkurvorna bör minst ha två provpunkter före och efter verkningsgradstoppen. Detta innebär att en propellerkurva minst bör bestå av 5 provpunkter. Enligt erfarenhet kan fem punkter vara för gles och det är önskvärt att köra flera punkter för att reducera osäkerheter. När

propellerkurvor mäts vid aggregatets maxlast är det ibland inte möjligt att få med två punkter efter verkningsgradstoppen. Detta av två skäl; dels kan aggregatets ledskenor redan vara öppna till max, dels kan propellerkurvorna vara flacka och det kan vara svårt att se en tydlig topp. Därför kan man göra avsteg från kravet på minst 5 punkter.

Efter att provet är klart bör man gå tillbaka och repetera toppen på minst tre av propellerkurvorna. Detta för att se repeterbarheten i mätningen.

Vid ett prov är den normala proceduren att stega sig upp från låg last till full last. Detta för att undvika hysteres i pådragsmekanismen. På samma sätt som för Francisaggregat, se 4.5.1, rekommenderas att repetitionspunkterna tas i godtycklig ordning.

4.6 Inkoppling och kontroll av mätutrustning

4.6.1 Allmänt

Det rekommenderas att värdena (pådrag, löpskovelvinkel, vattennivåer, effekt och flöde) från stationens instrumentpaneler kontrolleras. Helst ska de värden som skickas till driftcentralen stämma överens med de värden som mäts under provet. Gör de inte det kan detta bero på att värdet tas från någon annan position än vad man tror, alternativt att driftcentralen får felaktiga uppgifter på grund av till exempel en trasig pegel. Det är också en bra kontroll för provledaren av dennes utrustning.

4.6.2 Differenstryckmätning

Det är viktigt att nollpunkten vid jämviktstryck över givaren, mäts upp både före och efter provet.

Kontroll av differenstryckgivaren ska göras före och efter mätningen. Denna kontroll kan göras med hjälp av ett slangvattenpass. Syftet med kontrollen är att säkerställa att givaren har ställts in rätt och att värdena stämmer med givarens kalibreringsprotokoll.

Vid val av slang som används mellan differenstryckgivare, tryckuttag och eventuell slangvattenpass ska slangens egenskaper så som tryckbeständighet, arbetstemperatur och böjradie beaktas. För att underlätta att detektera om det finns luftbubblor i systemet rekommenderas en genomskinlig slang. Slangarna ska placeras så att det finns en tydlig höjdpunkt där eventuell luft kan ansamlas och lättare upptäckas.

4.6.3 Mätning av vattenytor

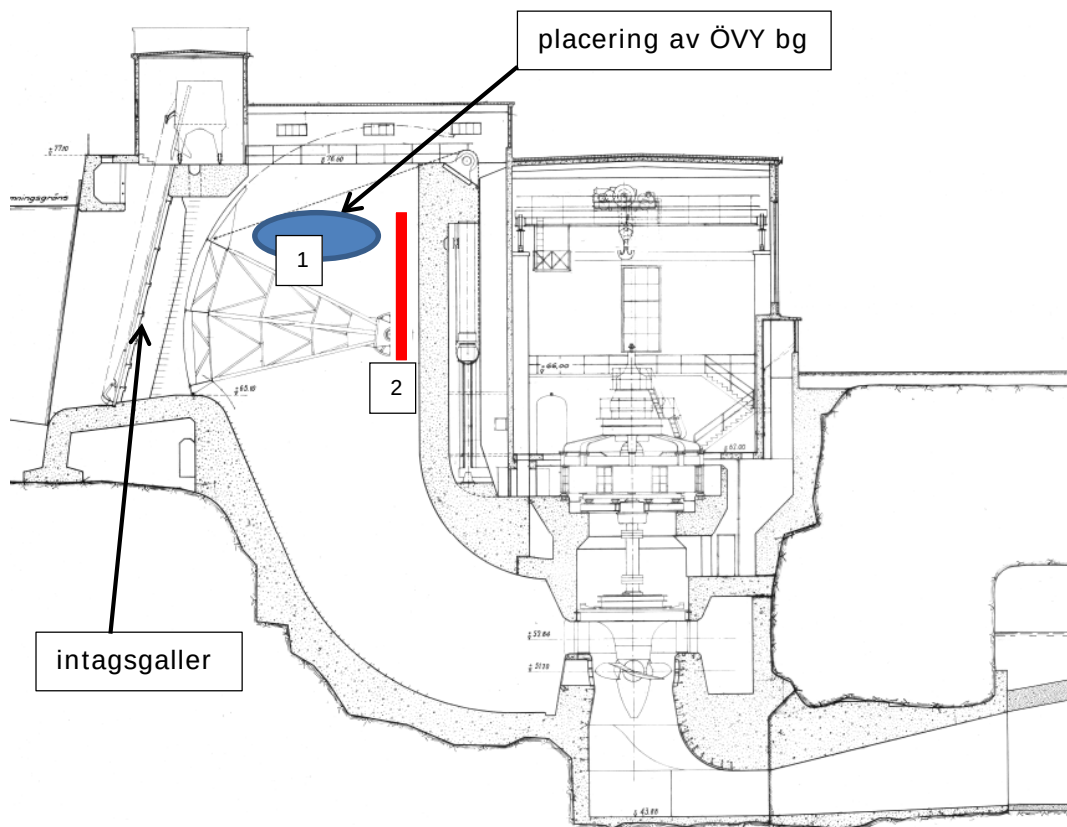
Ytor mäts lämpligen med medhavda dränkbara tryckgivare eller annan mätmetod. Vid jämförande prov bör samma givare används vid mätpunkterna för båda proven. Givarna ska helst också placeras på samma plushöjd vid båda mätningarna.

Givarna kan vara av sämre noggrannhet än 0,1 % så länge det är ett konstant känt mätfel, nulloffset, som kan korrigeras för vid inmätning mot en fast nivå.

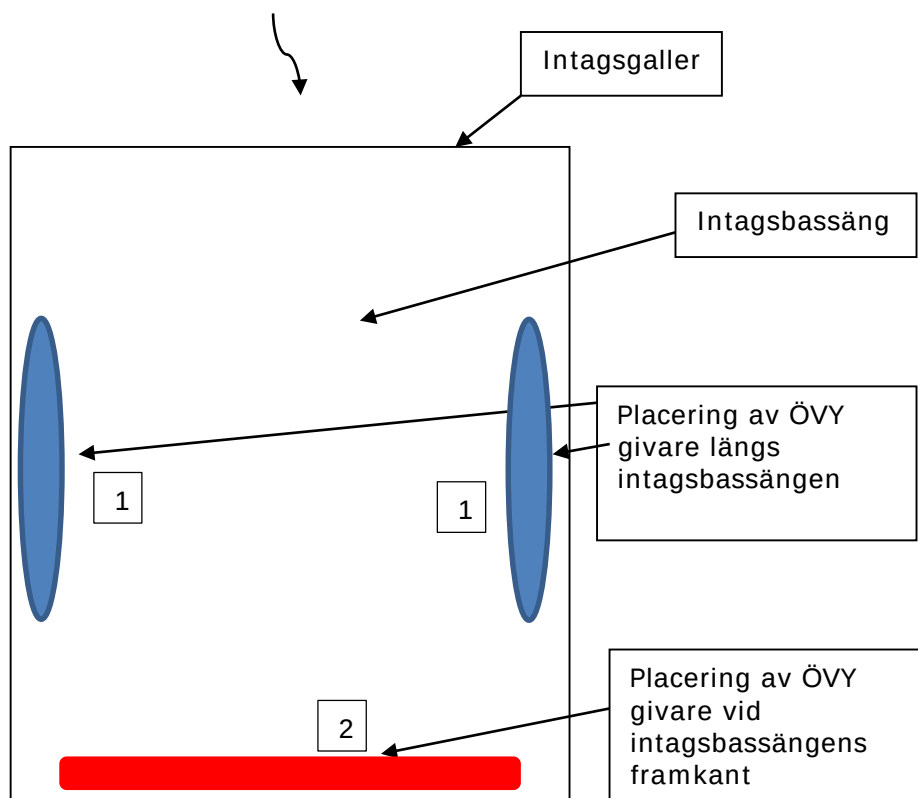
Det viktigaste är att givarna har en god linjär noggrannhet. Absoluta och relativa givare bör ej blandas.

Vägledningen avråder från att använda stationens givare på grund av att de oftast inte är kalibrerade, mätområdet kan vara okänt, placeringen är oklar samt att det, vid en jämförelse, inte garanteras att samma givare är kvar vid mätningen efter löphjulsbytet.

Som nämnts i avsnitt 3.2.5 ska givarsignalen justeras in till rätt plushöjd. Signalen kan antingen kontrolleras mot en fast pegel eller mot en fast punkt med känd plushöjd. Detta kan exempelvis vara golvnivå, brobana, en ovkant på en pelarnos eller ett räcke med känd plushöjd. Vid jämförande prov är det viktigt att samma utgångspunkt används vid båda proven för att eventuella fel i nivån försvinner vid en jämförelse.



Figur 5 - ÖVY-givarplacering nedströms grind.



Figur 6 - Intagsbassäng sedd ovanifrån.

Givarnas placering ska så långt som möjligt efterlikna de som används vid ett modellprov. Om resultatet från provet ska användas för att ta fram aggregatets kombinerings ska extra givare även placeras på samma platser som stationens egna nivågivare.

Givaren för nivåmätningen av övre vattenytan framför/uppströms grind ska placeras så pass långt från intaget att strömningen in mot aggregatet inte påverkar nivåmätningen. Vattenytan ska inte påverkas av att eventuella utskovsluckor öppnas eller intilliggande aggregat startas.

Nivån bakom/nedströms grind i intagsbassängen är den nivåmätning som oftast kommer att användas vid beräkning av fallhöjden. Detta för att mätningen av fallhöjden inte ska påverkas av grindförlusterna.

I Figur 5 och Figur 6 visas ett exempel på hur givaren bakom grind kan placeras. Lämpligast placeras den vid nummer 1 i Figur 4 och Figur 5, intagsbassängens sida. Om givaren placeras vid intagsbassängens nedströmssida placering nummer 2 i Figur 4 och Figur 5 kan det uppstå oklara strömningsförhållanden och hastighetshöjden kan därmed vara svår att beräkna. Placering 2 bör därför undvikas.

För bulbturbiner saknas intagsbassäng och mätningen nedströms intagsgrinden sker strax innan löphjulet.

När det gäller aggregat med långa tillloppstunnlar används inte nivån bakom intagsgrinden vid beräkningen av fallhöjden utan oftast en mätning av trycket strax innan spiralen.

Enligt IEC 60041 se avsnitt 2.4 ska Nvy mätas strax innan sugrörsutloppet, helst med fyra tryckuttag. I modellprov görs normalt detta genom att mäta trycket från fyra eller fler tryckuttag som sitter vid sugrörsmynningen. I anläggningen saknas ofta dessa tryckuttag eller så är de ur funktion.

Nvy är ofta svår att mäta på grund av att vattenytan kan vara orolig och lokalt har höga vattenhastigheter. Stor omsorg ska läggas på att placera Nvy givaren i en punkt som representerar nivån vid sugröret så väl som möjligt.

I de fall när Nvy mäts i schaktet för sugrörsluckan ska schaktet vara placerad efter sugrörsmynningen. Det är olämpligt att mäta Nvy i ett luckschakt som sitter i sugrörskröken.

En kontroll av nivågivarna bör göras både före och efter mätning detta för att säkerställa att givaren fungerat under provet. Kontrollen utförs förslagsvis genom att sänka ned givaren till en känd nivå och kontrollera värdet. Sedan sänks givaren ned till en ny nivå och värdet kontrolleras på nytt. Resultatet av kontrollen jämförs sedan mot kalibreringsprotokollets värden.

4.6.4 Effektmätning

Generatoreffekten ska i första hand mätas på stationens mätkärnor. Är detta inte möjligt kan effektpulser användas. Som sista alternativ kan stationens effektsignal användas.

Beställaren tillhandahåller information om vilka plintar som effektmätaren ska kopplas in mot. Informationen levereras till provledaren inför provets genomförande. Var inkopplingen skett ska noteras i provrapporten.

Mätningen kan ske enligt tvåwattmetermetoden eller trewattmetermetoden. Trewattmetermetoden används när neutralledare är tillgänglig. Skillnaden är i de flesta fall försumbar. Tvåwattmetermetoden används ofta då den kräver enklare utrustning [2].

Innan inkoppling sker bör effektmätarens strömelement kontrolleras för felaktigheter. Detta kan göras genom att resistansmäta elementen för att säkerställa "lågohmig" kontakt. Om strömkretsen bryts under drift går spänningen över en strömtransformator mot oändligheten vilket kan resultera i överslag (ljusbågar). Detta är farligt både ur ett personsäkerhets- som ett anläggningssäkerhetsperspektiv.

Inkoppling av effektmätaren ska utföras av stationspersonalen. Det är viktigt att inkopplingen kontrolleras innan strömkretsar bryts. Se till att kablar sitter fast och att effektmätare står stadigt så att kablarna inte av oförsiktighet åker ur sin inkoppling.

Den reaktiva effekten bör ligga så nära 0 som möjligt och detta bör ställas in inför varje provpunkt.

4.6.5 Ledskeneöppning

Det är viktigt att den fasta skalan för ledskeneöppningen är tydlig och har en upplösning på mm eller 1/10 grad för att kunna ställa in rätt kombinerings.

En fast/mechanisk skala ger en bra referens till hur de elektriska signalerna ska ställas in för rätt kombinerings. Att enbart ställa in kombinerings efter exempelvis en mA-signal ökar risken för felkombinerings. Detta då signalen kan driva på grund av att givaren gått sönder, vid byte av lägesgivare kan även signalen förändras. Det är också en fördel att relatera kombinerings till en fast skala då en kontroll kan utföras ifall den elektriska signalen har förändrats med tiden.

På anläggningen förekommer i huvudsak följande typer av pådragsskalor:

- 1) Ledskenas öppningsvinkel i grader
- 2) Ledskenas öppning i a-noll mm
- 3) Servocylinderns slag i mm
- 4) Pådraget (servocylinderns slag) i %
- 5) Hur mycket pådragsringen har vridit sig i millimeter i förhållande till turbinlocket.

Sambandet mellan stationssignal och fast skala bör redovisas i provrapporten. Detta för att vid årliga statuskontroller kunna undersöka ifall givarsignalerna förändrats.

4.6.6 Löpskovelvinkel

För dubbelreglerade aggregat, som Kaplan eller Bulb, kan löpskovlarna vridas. Det finns ingen branschgemensam standard hur löpskovelvinkeln ska anges. Detta har medfört att turbintillverkarna använder olika sätt att ange löpskovelvinkeln.

Det rekommenderas att avläsning sker på aggregatets fasta skala. Avläsning ska göras tre eller fyra gånger för varje propellerkurva som mäts. Löpskovelvinkeln kan ändras under tiden en propellerkurva mäts. Om så sker kan det vara nödvändigt att mäta om propellerkurvan.

Utöver den okulära avläsningen på aggregatets mekaniska skala kan/bör även den elektriska signalen antingen läsas av i stationsdatorn eller kopplas in i mätutrustningen. Syftet är att få underlag till hur kombinerings ska ställas in.

4.7 Felkällor under mätning

4.7.1 Luft i slangar

Luft i slangarna till differenstryckgivare förebyggs genom att låta ledningarna genomspolas ordentligt innan mätningen börjar. Differenstryckgivaren bör placeras så nära tryckkuttagen som möjligt.

Luft i ledningarna ger ett nollpunktsfel i differenstryckgivaren. Felet ger ett stort procentuellt fel vid låg last eftersom differenstrycken vid låga laster är litet. Andra fel som luft i slangarna ger upphov till är exempelvis instabiliteter.

4.7.2 Nedkylning av differenstryckmätare

Vissa, framförallt äldre, differenstryckmätare kan vara temperaturkänsliga. Vid genomspolning av differenstrycksgivare med kallt älvvatten kan givarelementet påverkas av den lägre temperaturen. När sedan ventilerna stängs kommer vattnet att långsamt anta omgivningstemperatur. I detta läge kan givaren ge en signal precis efter en genomspolning och en annan signal när vattnet i givaren fått omgivningstemperatur.

Om man skulle upptäcka luft i mätslangarna måste de tömmas på luft. Detta kan medföra att givaren kyls ner med kallt älvvatten. Därför bör man vänta en stund efter en renspolning så att temperaturen hinner stabilisera sig.

I vissa stationer kan det ske temperaturförändringar och det kan vara bra att observera sådana förändringar. Temperaturförändringar kan exempelvis förekomma om generatoren är luftkyld. Om utomhustemperaturen sjunker kan det även påverka omgivningstemperaturen där differenstryckgivaren sitter. I ett sådant fall kan det fungera att täcka givaren med en filt eller dylikt.

Effekterna av en nedkylning av differenstryckgivaren kan vara att en propellerkurva förskjuts uppåt eller nedåt i förhållande till övriga propellerkurvor.

Oftast är denna felkälla inget problem då differenstrycksmätare av senare modell inte är lika temperaturkänsliga som tidigare modeller. Men det kan vara bra att känna till och beakta om genomspolning gjorts och resultat och kurva visats sig vara lägre/högre än de andra.

4.7.3 Olika störningar på signalen

Radiovågor från en kommunikationsutrustning är så starka att de kan störa mätningen. Även svetsning kan störa mätsignaler.

Effekten av en sådan störning kan vara en onormal spridning av mätvärden.

Radiokommunikation under en mätning ska ske med stor försiktighet och ej nära turbinregulatorn som kan störas och självreglera.

4.7.4 Variation i fallhöjd

Om fallhöjden varierar under mätningen kan detta påverka resultatet. Ett löphjul har olika verkningsgrad vid olika fallhöjder. Varierar fallhöjden för mycket så ska man kompensera/justera mätresultatet med hjälp av aggregatets musseldiagram. Eftersom detta är något som bör tas i beaktning när man utvärderar resultatet går det att läsa mer om detta under avsnitt 5.3. i analys.

4.7.5 Intelligande aggregat och utskovsluckor

Intelligande aggregat eller utskovsluckor kan behöva vara stängda, alternativt ha ett konstant genomflöde då dessa kan påverka mätningarna. Manövrering av dessa ska stationspersonal vara behjälplig med. Hur manövrering av utskovsluckor och/eller reglering av intelligande aggregat påverkar provet är individuellt för varje station.

5 Analys

5.1 Generellt

För att kunna presentera mätresultatet behöver mätdata från provet analyseras, behandlas och åskådliggöras visuellt. För att möjliggöra detta krävs att kvaliteten på mätta data är säkerställd av provledaren, se avsnitt 4. Nedan följer en beskrivning av de tolkningar och analyser som normalt behövs för att erhålla det resultat som sedan presenteras i rapporten.

5.2 Beräkning av turbinverkningsgrad

Vid ett prov där flödet bestäms med Winter-Kennedymetoden mäts i huvudsak följande parametrar: övre vattenytan, nedre vattenytan, differenstrycket i spiralen samt generatoreffekten.

Utifrån övre och nedre vattenytorna samt förlusterna i vattenvägen beräknas nettofallhöjden. Flödet beräknas/uppskattas med differenstrycket. Generatoreffekten och generatorförlusterna ger turbineffekten.

Innan turbinens verkningsgrad beräknas måste även tyngdaccelerationen och vattnets densitet bestämmas/beräknas. Viskositetens inverkan på verkningsgraden diskuteras i 5.2.2.

Vid provtillfället används ofta preliminära värden på tyngdacceleration och vattnets densitet. När slutgiltiga värden fastställts på densitet och tyngdacceleration behöver resultatet räknas om. Bland annat kan detta gälla för tryckgivare där resultatet ska räknas om till mvp.

5.2.1 Vattnets densitet

För att få så korrekta värden på vattnets densitet bör vattentemperaturen mätas. I första hand bestäms densiteten enligt tabell i Appendix D. Önskas en noggrannare beräkning av densiteten beräknas den enligt Herbst och Rögeners ekvation, se Appendix D.

5.2.2 Vattnets viskositet

I ett modellprov korrigeras verkningsgraden med avseende på Reynoldstal. Syftet med detta är att samtliga provpunkter ska gälla för ett och samma Reynoldstal. Vid en jämförelse mellan två prov är det oftast endast vattnets temperatur som har en inverkan på Reynoldstalet, eftersom både varvtal och löphjulsdiameter är densamma före och efter en förnyelse. För att uppskatta/beräkna betydelsen av hur viskositeten inverkar på verkningsgraden antas samma formel som används vid omräkning av modellprov även gälla vid en omräkning på en fullskaleanläggning.

Enligt IEC 60193 beräknas förändringen i verkningsgrad med följande formel:

$$(\Delta\eta_h)_{A \rightarrow B} = \delta_{ref} \left[\left(\frac{Re_{ref}}{Re_A} \right)^{0,16} - \left(\frac{Re_{ref}}{Re_B} \right)^{0,16} \right] \quad (17)$$

där

$$\delta_{ref} = \frac{1 - \eta_{hoptM}}{\left[\left(\frac{Re_{ref}}{Re_{optM}} \right)^{0,16} + \frac{1 - V_{ref}}{V_{ref}} \right]} \quad (18)$$

Re_{ref} är $7 \cdot 10^6$ och V_{ref} är dimensionslös faktor som beror på turbin typ och för Kaplan är $V_{ref} = 0,8$ medan för Francis är $V_{ref} = 0,7$. Re_{optM} är Reynoldstalet i modellen vid bästa (optimal) verkningsgrad. η_{hoptM} är modellens bästa (optimala) verkningsgrad. δ_{ref} är den del av förlusterna som anses vara skalbara. Re_A och Re_B är olika Reynoldstalet vid samma driftpunkt. Om man ska jämföra en och samma driftpunkt men vid olika Reynoldstal räknar man om resultatet för Re_A att gälla vid Re_B .

Om man antar att en turbin har en toppverkningsgrad på 95%, en löphjulsdiameter på 4,5 m och ett varvtal på 150 rpm. Antas att temperaturen vid provet före är 2 grader och efter är temperaturen 15 grader. Om resultatet för 15 grader räknas om att gälla vid 2 grader blir korrekturen 0,2%.

Korrekturen på grund av förändringar i viskositeten ligger i samma storleksordning som för densiteten och måste därför beaktas.

5.2.3 Tyngdaccelerationen

Tyngdaccelerationen, g , ska beräknas för varje anläggning enligt IEC 60041 [2].

$$g = 9,7803 \cdot (1 + 0,0053 \cdot \sin^2 \varphi) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot z \quad (19)$$

där φ är platsens latitud i grader och z är platsens höjd över havsytans medelnivå. För höjden z används förslagsvis löphjulscentrum.

5.2.4 Nettofallhöjd

När en jämförelse görs mellan turbiner eller om en garanterad effekt önskas kontrolleras måste nettofallhöjden beräknas.

Nettofallhöjden definieras, enligt IEC, som den nettoenergihöjd som råder mellan spiralinlopp och sugrörutlopp enligt formel (20). Det är denna definition

som också används vid modellprov och som leverantörerna använder när garantier på turbinverkningsgraden bestäms.

$$H_n = z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - z_2 - \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (20)$$

där H_n är nettofallhöjden, z_1 den statiska tryckhöjden för mätpunkten vid spiralinloppet, z_2 den statiska tryckhöjden vid sugrörsutloppet, v_1 och v_2 är hastigheterna vid spiralinloppet respektive sugrörsutloppet och g är tyngdaccelerationen.

På en anläggning är det sällan möjligt att mäta enligt IEC. Exempelvis mäts den övre vattenytan i intagsbassängen istället för vid spiralinloppet och NPY mäts i utloppskanalen istället för vid sugrörsutloppet. I de fall då NPY mäts i utloppskanalen måste förlusterna från sugrörsmyrningen fram till mätpunkten beaktas. Genom att räkna ut vattenvägsförluster och hastighetshöjder i respektive mätpunkt kan man beräkna sig till de punkter som definieras av IEC.

Ekvation 21 visar hur nettofallhöjden beräknas vid ett prov.

$$H_n = z_1 - z_2 + \frac{1}{2 \cdot g} \left(\left(\frac{Q}{A_1} \right)^2 - \left(\frac{Q}{A_2} \right)^2 \right) - h_{f-tot} \quad (21)$$

Hastigheten v för beräkning av hastighetshöjden kan beräknas enligt:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (22)$$

där Q är volymflödet och A tvärsnittsarean vinkelrätt mot hastigheten. A_1 är arean för tvärsnittet vid intaget där nivån mäts. A_2 är tvärsnittsarean på nedströmssidan där NPY mäts.

Vid analysen kan korrekta förutsättningar vid mätpunkterna vara mycket svåra att tillgå/beräkna. Svårast är oftast att uppskatta förutsättningarna i intagsdelen. Detta beror på att stagnationstryck för mätpunkten och den vinkelräta tvärsnittsarean är tämligen oklara.

Då osäkerheter råder hur arean vid inloppet ska beräknas föreslås följande formel tillämpas:

$$A_1 = b \cdot (\ddot{O}VY_{mätt} - T_{tr}) \quad (23)$$

där b är intagets bredd, $\ddot{O}VY_{mätt}$ är nivån på den uppmätta vattenytan och T_{tr} är nivån på intagsluckans tröskel.

När hastighetshöjden vid utloppet/NPY ska beräknas är det viktigt att även ta med flödet från övriga aggregat som bidrar till flödet eller hastigheten i kanalen.

Vattenvägsförlusterna, h_{f-tot} , beräknas generellt i form av delbidrag från raksträckor, krökar, utvidgningar och kontraktioner. Hur förlusterna i vattenvägen beräknas har beskrivits i Appendix A.

Ibland råder det osäkerhet om nivåer eller plushöjder är korrekta. En turbinprovare får trots detta utgå från att angivna nivåer stämmer för att kunna utföra sin mätning. Med fördel kan nivåer kring pegelrör eller peglar vägas in före prov för att säkerställa referensnivåernas korrekthet.

5.2.5 Turbineffekt

Vid beräkning av turbineffekten behöver mätt generatoreffekt kompletteras med beräknade generatorförluster enligt formel (3) i teoriavsnitt 2.2.

Det är vanligt att det saknas uppgift om lagerförlusterna. Finns ingen uppgift om förändrade lagerförluster är rekommendationen att bortse från dem.

Den säkraste uppgiften om generatorns förluster hittas normalt i mätprotokoll från leveransprovet av generatoren. I de fall där flera lika aggregat levererats kan mätning ha utförts endast på ett av aggregaten, men gäller för alla. I dessa fall kan det därför bara finnas ett protokoll eller rapport som gäller för alla systemmaskiner.

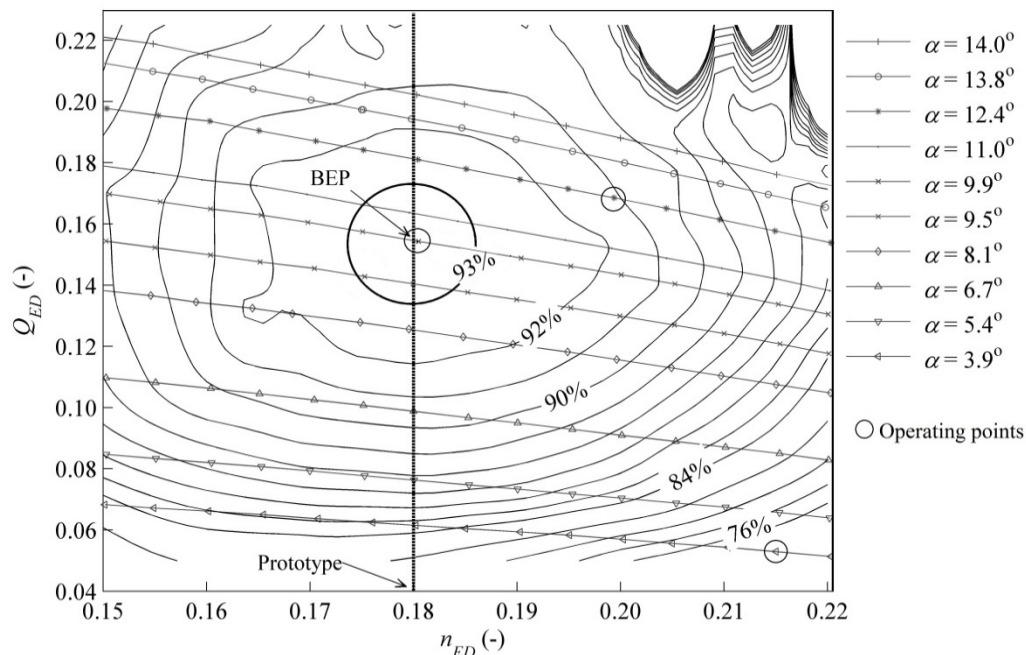
Normalt används förlustuppgifter vid märkdata som grund i formel (4) i teoriavsnitt 2.2.

Om generatoren har roterande matare för magnetisering kompletteras förlusterna med tomgångs- och belastningsförluster för den roterande mataren enligt formel (5) i samma avsnitt.

Normalt räknas den tillförda turbineffekten om till en gemensam vattentemperatur för både referensprov och verifierande prov. Den valda gemensamma temperaturen brukar vid ett löphjulsbyte vara garantitemperaturen för det nya löphjulet. Med garantitemperatur avses den temperatur som alla garantier är angivna för.

Vid beräkning av turbineffekten bör beaktande tas för dess beroende av densitet och den kinematiska viskositetens temperaturberoende.

5.3 Nivåsättning och uppskalning från modelldata



Figur 7 - Exempelutseende på ett musseldiagram för en turbin [8].

5.3.1 Relativt turbinflöde och bestämning av k

Det relativa turbinflödet beräknas enligt formel (12) i teoriavsnitt 2.3.

För att kunna nivåsätta provresultatet och beräkna provpunkternas relativa flöden behövs en önskvärd nivå på verkningsgraden tas fram.

Data hämtas i första hand från ett homologt modellprov, finns inget modellprov kan förslagsvis garantivärden eller data på likvärdiga aggregat användas.

Resultatet från ett modellprov presenteras i ett musseldiagram, där beskrivs turbinen och dess egenskaper på ett mer eller mindre komplett sätt. Används modellprov som referens för att bestämma k ska modellens toppverkningsgrad vid mätt fallhöjd räknas om att gälla för den aktuella turbinen. Den uppskalade modellverkningsgraden ansätts att gälla för indexprovets motsvarande toppunkt. Den används sedan för att bestämma k .

Används ett musseldiagram från leverantören är detta oftast redan uppskalat till anläggningen/prototypen. I dessa fall kan det vara svårt att få tillgång till de indata som användes för uppskalningen. Musseldiagrammen för prototypen är oftast beräknade för den temperatur leverantörens avtalade garantier gäller.

Uppskalningen beskrivs i standard:

- den tidigare IEC60193, eller
- den senaste IEC62097

För standard IEC62097 ska bland annat ytråheter i vattenvägen mätas upp såväl före som efter förnyelse (löphjulsbytet) och redovisas i rapporten i samband med redovisningen av uppräkningsningen.

Uppskalningen resulterar i det uppskalade värdet η_{p-opt} enligt:

$$\eta_{p-opt} = \eta_{m-opt} + \Delta\eta \quad (24)$$

Där η_{p-opt} är verkningsgrad för prototypen, η_{m-opt} verkningsgrad för modellen och $\Delta\eta$ är uppskalningen/"step up"-värdet beräknat enligt använd standard.

När ovanstående parametrar är bestämda kan *flödeskonstanten*, k bestämmas med hjälp av toppunkten.

η_{p-opt} är bestämd enligt ovan. För toppunkten gäller sedan följande grundläggande samband:

$$Q_{rel} = \frac{P_t}{\eta_{rel} \cdot H \cdot \rho \cdot g} \quad (25)$$

och formel (12) i avsnitt 2.3.

Detta ger sammantaget:

$$k = \frac{P_t}{\eta_{rel} \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot (\Delta P)^n} \quad (26)$$

I de fall då en jämförande mätning görs på ett aggregat med plåtspiral brukar denna blåstras och målas i samband med förnyelsen av aggregatet. En nymålad spiral kan påverka gränsskiktets tjocklek som i sin tur inverkar på differenstrycksmätningen. I dessa lägen har man inget annat val än att acceptera att förhållandena intill tryckkuttagen förändrats mellan före och efter löphjulsbytet. När man utvärderar resultatet ska det nämnas att förhållandena ändrats.

5.3.2 Relativ turbinverkningsgrad

När k bestämts kan övriga provpunkters flöden beräknas enligt formel (12) i avsnitt 2.3.

5.4 Normering av provpunkter till gemensam fallhöjd

Fallhöjderna vid de olika provpunkterna varierar. Normalt är att normera provpunkterna till en och samma fallhöjd. Effekter och flöden räknas om till den valda gemensamma fallhöjden. Detta görs vanligen med likformighetslagarna i Appendix E. Detta fungerar om fallhöjdsskillnaden är liten, det vill säga att verkningsgradsförändringarna i löphjulets musseldiagram antas vara försumbara. För att avgöra om likformighetslagarna kan användas bör det kontrolleras i musseldiagrammet hur stor verkningsgradsskillnad den gällande fallhöjdsskillnaden innebär.

Enligt IEC 60041 avsnitt 5.2.2 ska provet utföras så att följande kriterier uppfylls:

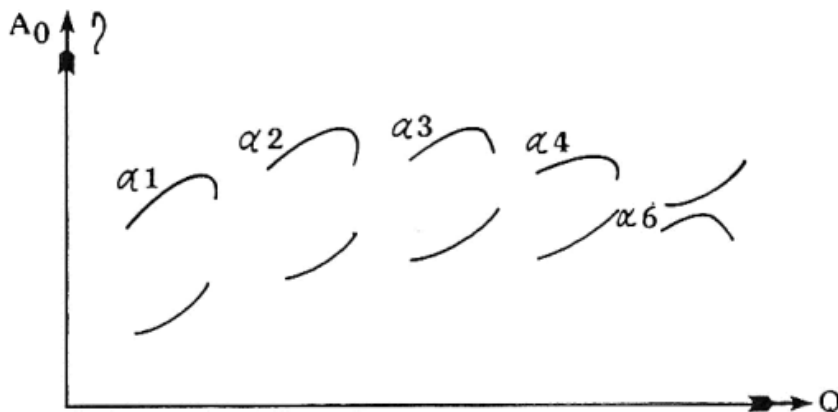
$$0,97 \leq \frac{n/\sqrt{E}}{n_{nom}/\sqrt{E_{nom}}} \leq 1,03 \quad (27)$$

Där n är varvtalet och E den specifika energin, indexeringen nom står för nominell. Då den specifika energin är samma sak som fallhöjd och varvtalet är detsamma under indexprovet som den nominella kan man säga att fallhöjden kan tillåtas variera med cirka $\pm 6\%$ under ett prov.

5.5 Kombinerings för dubbelreglerande aggregat

5.5.1 Bakgrund

Sammanhörande provpunkter med olika ledskeneöppningar för en och samma löphjulsinkel bildar så kallade *propellerkurvor* (gäller Kaplan- och bulbturbiner). En envelopp skissas genom alla tangerande ytterpunkter för propellerkurvorna och beskriver turbinen bästa möjliga verkningsgradskurva. Där enveloppkurvan tangerar respektive propellerkurva återfinns turbinens bästa pådrag för respektive löphjulsinkel. Tillsammans utgör dessa turbinens bästa kombineringspunkter för respektive område.



Figur 8 - Propeller- och pådragskurvor för löphjulsinklarna, α [9].

Det är alltså inte generellt propellerkurvornas toppar som är de bästa kombineringspunkterna utan där enveloppen tangerar.

Toppen på propellerkurvan kan vara otydlig, det kan då vara svårt att bestämma bästa kombineringspunkt för denna propellerkurva. Vid bedömning av kombineringspunktens placering kan man få vägledning av att plotta pådraget som funktion av turbineffekten. Ungefär där kombineringspunkten för respektive löphjulsinkel ska ligga, bör det finnas ett mer eller mindre tydligt "knä" på pådragskurvan.

Turbinens pådragskurva erhålls genom att pådragen vid de bästa kombineringspunkterna för alla löphjulsvinklar sammanbinds.

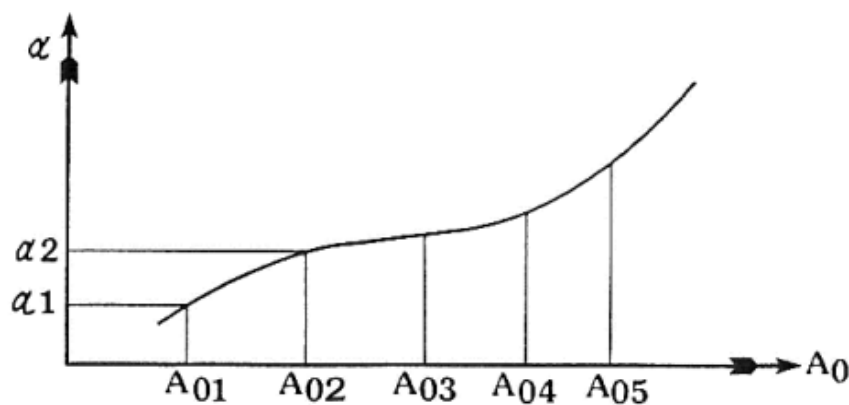
5.5.2 Inverkan av fallhöjdsvariation

Kombineringen varierar med fallhöjden. Idealt bör ett kombineringsprov omfatta flera fallhöjder men detta är svårt att göra av praktiska skäl då det är svårt att styra fallhöjden. Av denna anledning görs oftast en omräkning till övriga fallhöjder.

Under ett indexprov/kombineringsprov (Kaplan- och Bulbturbiner) försöker man att så långt det går hålla en och samma fallhöjd.

Om fallhöjden hålls konstant genom ett prov skulle man kunna plotta en kombineringskurva för den fallhöjden direkt.

En kombineringskurva utgörs av löphjulsvinklar som funktion av pådragsöppningar för kombineringspunkterna. Om en sådan plottas direkt ur provresultatet gäller dessa punkter endast för respektive provpunkts fallhöjd.



Figur 9 - Kombineringskurva för löphjulsvinklarna, α [9]

Innan en kombineringskurva kan erhållas för andra fallhöjder måste provpunkternas pådrag räknas om till önskad fallhöjd.

Pådragsförändringen kan benämnas ΔA_0 och är olika beroende på var man befinner sig i musseldiagrammet. Antingen kan preliminära kombineringskurvor (som baserar sig på musseldiagram) från leverantören användas eller så kan förändringen läsas ur musseldiagrammet.

Ett ΔA_{0-i} beräknas för ett antal fallhöjdsintervall, i . "Händer" det lite i musseldiagrammet med pådraget avseende på fallhöjdsändringar så antas ett konstant ΔA_{0-i} för ett större fallhöjdsintervall och händer det mycket antas ett mindre. En omräkning görs för alla pådrag med det ΔA_{0-i} som passar respektive kombineringspunkts fallhöjdsintervall. Omräkningen görs principiellt enligt följande för intervall i :

$$A_H = (H_{pr} - H) \cdot \Delta A_{0-i} + A_{Hpr} \quad (28)$$

där A_H är beräknat pådrag vid önskad fallhöjd inom det intervall i som pådragsförändringen ΔA_{0-i} per meter fallhöjdsändring gäller. A_{Hpr} är pådraget från en provpunkt med fallhöjden H_{pr} .

Om fallhöjden H är en fallhöjd i randen av ett intervall så används dessa randpådrag som indata vid beräkning av intilliggande intervalls pådrag.

5.6 Felanalys

Analysen bör innehålla en felanalys. I Appendix F ges två metoder att beräkna felet. Nackdelen med den metod som står i IEC60041 är att man måste känna till det procentuella felet för flödet. När Winter-Kennedymetoden används mäts differenstrycket i spiralen som sedan bestämmer flödet. I den andra felanalysen anges hur felet beräknas då man vet vilket fel man har i differenstryck.

5.7 Ändrad flödeskonstant

Vid ett jämförande prov är utgångspunkten att flödeskonstanten och exponenten i formel (12) i avsnitt 2.3 ska vara samma för båda proven.

Det finns flera olika åtgärder i vattenvägarna som kan påverka flödeskonstanten mellan två prov. Några av dessa åtgärder är målning av spiralen, förändringar av tryckuttagen, åtgärder på intag/intagsgrindar och löphjulsbyten. Det kan i vissa fall därför vara nödvändigt att ändra på flödeskonstanten. I de fall där man justerar värdet på flödeskonstanten bör man ha modellprov för det gamla respektive det nya löphjulet som grund vid val av nya flödeskonstanter.

6 Rapportering

6.1 Allmänt

Utfört prov ska redovisas i en skriftlig rapport.

I detta avsnitt ligger fokus på rapportens innehåll snarare än struktur.

Rapporten ska redovisa rådande mätförhållanden vid provtillfället och bör innehålla följande information (ej nödvändigtvis i följande ordning) vilka uppfyller kraven enligt IEC 60041.

6.2 Innehåll

6.2.1 Provobjekt

Provobjektet ska specificeras med kraftstationens namn och aggregatnummer.

6.2.2 Provets syfte och omfattning

Syfte, omfattning samt alla provrelaterade överenskommelser ska noteras i rapporten.

6.2.3 Provdeltagare

Samtliga deltagare vid provet ska redovisas i rapporten. Minst namn och företag bör redovisas.

6.2.4 Provdatum

Datum för provgenomförande ska redovisas.

6.2.5 Beskrivning av provobjektet

Provobjektet bör beskrivas så väl som möjligt. Av rapporten bör följande information framgå:

- Generatordata (märkdata, typ, fabrikat, tillverkningsår)
- Turbindata (märkdata, typ, fabrikat, tillverkningsår)

Mer detaljerad information om detta återfinns i Appendix G.

Tillhörande utrustning

Tillhörande utrustning ska beskrivas såsom exempelvis tryckuttag och dess rörledning, ventiler, grindar, intags- och utloppspassager och deras tillstånd gärna med ritningar eller foton.

Driftförhållande och tillstånd

Detaljerade upplysningar om driftsförhållande och maskinens tillstånd, som exempel driftbegränsningar, DG och SG, kavitationsskador, vibrationer. Beskrivning av omfattningen av renoveringar eller förnyelser.

Information från inspektioner

Uppgifter från inspektioner av maskinen exempelvis av tryckuttag, vattenvägar, grindar bör redovisas.

Prestandagarantier

Prestandagarantier ska anges i rapporten (om testet avtalats gälla för detta).

6.2.6 Beskrivning av mätutrustning

Den vid provet använd utrustning ska redovisas med följande data (med fördel som rapportbilaga):

1. Varumärke/tillverkare samt modellbeteckning.
2. Identifikationsnummer/serienummer.
3. Varuslag (exempelvis "tryckgivare") samt användningsområde vid provet.
4. Senaste kalibrerings-/funktionskontrollsdatum.
5. Ägare (om annan än provutföraren).

6.2.7 Beskrivning av provgenomförande och resultat

Vid jämförande prover är det bästa kombinerat vid respektive prov som ska användas. Kombineringen behöver normalt inte redovisas i det jämförande fallet.

Provets genomförande ska redovisas. Det bör även framgå av rapporten ifall man upptäckt områden där maskinen går dåligt, t ex om man hört kavitationssmällar, noterat höga nivåer på vibrationer eller om maskinen kommit i svängning etc. Detta kan ge information till eventuella lämpliga förbudsområden eller begränsningar för att skydda maskinen.

Eventuella skillnader mellan de jämförande proven bör beskrivas och kommenteras och en uppskattning av skillnadernas påverkan på resultaten bör tas med när det är möjligt.

En daglig loggbok över provets händelser bör bifogas rapporten.

Inställning av turbin

Hur turbinen ställts in och mot vilka referenser ska framgå av rapporten. Foton på referenser/skalor bör bifogas rapporten.

Fast skala/-or för pådragsöppning

De under provet använda skalorna för pådrag redovisas med placering samt gradering.

Fast skala/-or för löphjulsöppning

De under provet använda skalorna för löphjulsöppning redovisas med placering samt gradering.

Övrigt

Eventuellt andra nedtecknade storheter som beskriver turbinens inställning ska också framgå av rapporten. Det kan exempelvis vara ett "%-pådragsvärde" momentanavläst i kontrollanläggningen etc.

Kombinering (Bulb/Kaplan)

Den framtagna kombineringsfunktionen som funktion av fallhöjd (stationens givare för fallhöjds-mätning ska användas) ska presenteras och beskrivas. Använda omräkningsfaktorer mellan fallhöjder ska presenteras och det bör refereras till deras källa.

Diagram och kurvor

Relativa verkningsgrads- och pådragskurvor ska i diagram presenteras i rapporten i följande varianter:

- Relativ verkningsgrad som funktion av flöde
- Relativ verkningsgrad som funktion av effekt
- Pådrag som funktion av flöde
- Pådrag som funktion av effekt

Provets punkter ska i nämnda kurvor bilda så kallade propellerkurvor om det provade löphjulet är av Bulb-/Kaplan-typ. Rapporten ska omfatta en diskussion kring provresultaten med utgångspunkt från kurvorna ovan.

Ytterligare kurvor som beskriver huvudresultaten från provet efter förnyelse är följande (vilka också ska presenteras):

- Kombineringskurvor för olika fallhöjder (Bulb/Kaplan) (prov efter)
- Samband mellan skalorna för löphjuls- och pådragsöppning samt motsvarande värden i kontrollanläggning (prov efter)

6.2.8 Mätta parametrar

Mäts andra parametrar utöver de här beskrivna ska även dessa redovisas i liknande omfattning.

Generatoreffekt

I rapporten ska det framgå på vilket sätt effekten mätts vid provet. För lämpliga mätmetoder, se avsnitt 4.6.4.

Det ska framgå vilken utrustning som använts samt var utrustningen har kopplats in. Rapporterna bör referera till använda plintar och kretsscheman för inkopplingen.

Differenstryck

Mätningen av differenstryck samt relativa flödesberäkningar ska redovisas. Använd utrustning samt senaste datum för funktionskontroll redovisas. Följande bör specificeras:

- Beskrivning av använd differenstryckgivare (se 6.2.6)
- Använt mätområde vid proven.
- Beskrivning av befintliga och använda tryckuttag i spiralen (skiss/foton bör bifogas rapporten).
- Beskrivning av tillvägagångssätt vid installation av differenstryckgivaren ute på anläggning (nollpunktsjustering samt mätområde).

Beskrivning och eventuella beräkningar för använda mätområden redovisas i rapporten. Även nollpunktsjustering bör redovisas hur och att den är genomförd.

Peglar/energinivåer

Vilka ytor/nivåer/tryck som samplats eller lästs av ska specificeras. Hur respektive ytnivågivare monterats/nivåsatts ska redovisas samt de beräkningar som ger det slutliga ytvärdet och vad det representerar.

Eventuell inkoppling i befintlig kontrollanläggning för mätning av signaler ur denna ska redovisas med:

- Mätområde
- Hur mätutrustningen kopplats in samt eventuellt skåp och plintnummer i kontrollanläggningen. Referera till kretsschema.
- Vad signalen/-rna har använts till.

Även eventuella momentanavlästa värden redovisas i rapporten. Det kan exempelvis vara en dammyta med långsamma förändringar.

Av rapporten bör framgå ungefärliga placeringar av mätpunkter för respektive signal presenterade i form av bilagd skiss eller liknande.

6.2.9 Mätvärden, avläsningar och beräknade värden

En komplett lista med redovisning av provets nödvändiga mätvärden (se Appendix H) och avläsningar för samtliga provpunkter, samt hur värden eventuellt har beräknats ska framgå av rapporten. Beräkningsförfarande bör redovisas för minst en av provpunkterna.

Fallhöjder

Alla beräkningar (exempelvis förluster i vattenvägarna) och använda fallhöjder ska vara tydligt definierade. I de fall då nettofallhöjden beräknats ska det framgå av rapporten hur denna gjorts och vilka underlag som använts. Referera till eventuella ritningar och dokument.

Turbineffekt

Generatorförlusterna för beräkning av turbineffekten ska specificeras så att det tydligt framgår vad som är belastningsförluster, tomgångsförluster och magnetiseringsförluster. Det ska också framgå var uppgifterna på förlusterna kommer ifrån, ifall det är leverantörens garantivärde eller om det är uppmätta värden.

Skenspänningen vid provet bör redovisas samt hur eventuell kompensering av järnförlusterna har skett.

Maskinens typ av magnetiseringssystem bör redovisas.

Vattentemperaturer vid respektive provtillfälle ska redovisas.

Även eventuella korrekitioner och beräkningar som gjorts vid beräkning av turbineffekten ska redovisas. Med detta avses korrekitioner för densitet eller fallhöjd.

Hur normering beräknats ska framgå.

Mätosäkerheten i effektmätningen bör specificeras.

Nivåsättning och uppskalning

Används ett modellprov för uppskalning bör följande redovisas:

- Använd uppräkningsstandard samt använda indata.
- En "step up" (uppskalning) redovisad i %-enheter.
- Verkningsgradsnivån för toppunkten.
- Vid vilken vattentemperatur och fallhöjd det gäller (vanligtvis det som gäller för garantivärdena).

Används ett musseldiagram från leverantören; Redovisa hur provets nivå satts med hjälp av detta och nivån det resulterat i, samt vid vilken fallhöjd och vattentemperatur värdet gäller.

7 Utvecklingsbehov

Följande utvecklingsbehov har identifierats under utarbetande av vägledningen.

- Mätningen av differenstrycket kan påverkas av bland annat ett nytt löphjul, ändrade förhållanden vid intaget, blåstråd och ommålad spiral etc. Modellprov har visat att i en del fall så har inte ett nytt löphjul någon påverkan på differenstrycksmätningen, medan andra modellprov har visat att det finns en sådan inverkan. Ingen vet idag vad som har en inverkan och hur stor denna är. Därför är det viktigt att undersöka vad som påverkar differenstrycksmätningen. Det är också viktigt att undersöka vilken betydelse placeringen av tryckuttagen har på mätningen.
- Vad är bästa sätt för uppskattning av generatorförluster? Idag görs ingen korrektion av generatorförlusterna med avseende på lindningstemperatur. För att öka noggrannheten kan det därför vara av intresse att undersöka hur mycket generatorns förluster påverkas av lindningstemperaturen. Förlusterna garanteras vanligtvis vid 75 grader men oftast är temperaturen lägre vilket också ger lägre förluster. Det är brukligt att fördela exempelvis bärlagerförlusterna mellan generator och turbin. För att öka noggrannheten i indexprov kan man undersöka om den fördelning som görs enligt praxis är korrekt.
- En undersökning bör göras för att ta reda på hur noga effekten mäts. Som regel används tillverkares värden avseende noggrannhet på stationens utrustning (exempelvis mätkärnor). I de allra flesta fall är mätkärnorna gamla och mätfelet kan ha förändrats med tiden. Erfarenheter från prov har visat att det skiljer mer än vad som kan förväntas mellan mätning via mätkärner, pulser och stationssignal. En sådan undersökning kan även vara viktig för anläggningsägaren att utföra för att veta att man får betalt för rätt mängd energi som stationen producerat.
- Hur ska normering göras i förhållande till fallhöjd (Hill diagram eller inte) och hur påverkas resultatet?
- Att undersöka vad som är ett nödvändigt och tillräckligt mätförfarande för att på ett systematiskt sätt bestämma kombineringsgraden för en kaplanturbin.
- Verkningsgraden påverkas av vattnets temperatur (viskositet). När en jämförelse görs mellan två prov rekommenderar denna vägledning att verkningsgraden korrigeras med avseende på en eventuell temperaturskillnad. I vägledningen föreslås en korrektion som beror på Reynoldstalet. Denna metod bygger på den gamla standarden för uppräkningsgrad IEC 60193. Metoden för att korrigera verkningsgraden på grund av temperaturen (viskositet) behöver utvecklas med hänsyn till den nya standarden IEC 62097 för uppräkningsgrad av turbinverkningsgraden. Det bör undersökas hur korrektionen ska göras

med den nya standarden samt hur mycket korrektionen skiljer mellan de båda standarderna.

8 Referenser

- [1]** Energiläget, Energimyndigheten
- [2]** IEC 60041-1991(E), International Standard – Field acceptance test to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines, volume 41, Geneva, Switzerland, third edition.
- [3]** Lövgren M. and Cervantes M.J., 2013. Some limitations of the Winter-Kennedy flow measuring method. Hydro 2013, Austria.
- [4]** Krivchenko G., Hydraulic machines: turbines and pumps, CRC Press, USA 1994.
- [5]** ASME/ANSI. Pressure Measurements, Instruments and Apparatus, volume 19.2. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1988.
- [6]** Tsaliovich A., Cable Shielding for Electromagnetic Compatibility, 2014
- [7]** Montgomery D.C., Design and Analysis of Experiments, Wiley
- [8]** Chirag T., Michel C., Bhupendra G., and Ole D., 2013, "Experimental and Numerical Studies for a High Head Francis Turbine at Several Operating Points," ASME Journal of Fluids Engineering, 135(11), pp. 111102:1 – 17.
- [9]** IEC 60193, International Standard – Hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines – Model acceptance tests.
- [10]** Finnemore J. E., Franzini J. B., Fluid Mechanics with engineering applications, USA, 2002.
- [11]** Massey B., rev Ward-Smith J., Mechanics of fluids, Eighth edition, England och USA, 2001.
- [12]** IEC 62097, International Standard – Hydraulic machines, radial and axial - Performance conversion method from model to prototype
- [13]** Arne Persson/Lars-Christer Böiers; Analys i flera variabler, Studentlitteratur 1988

Appendix A - Förluster

Förluster i tunnlar eller kanaler

I de fall där det förekommer en tillloppstunnel ska dessa förluster beräknas. Det finns flera, om kraven uppfylls, empiriska formler för att beräkna förlusterna men helst ska förlusterna beräknas enligt Darcy-Weisbach [10], se ekvationen nedan.

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (29)$$

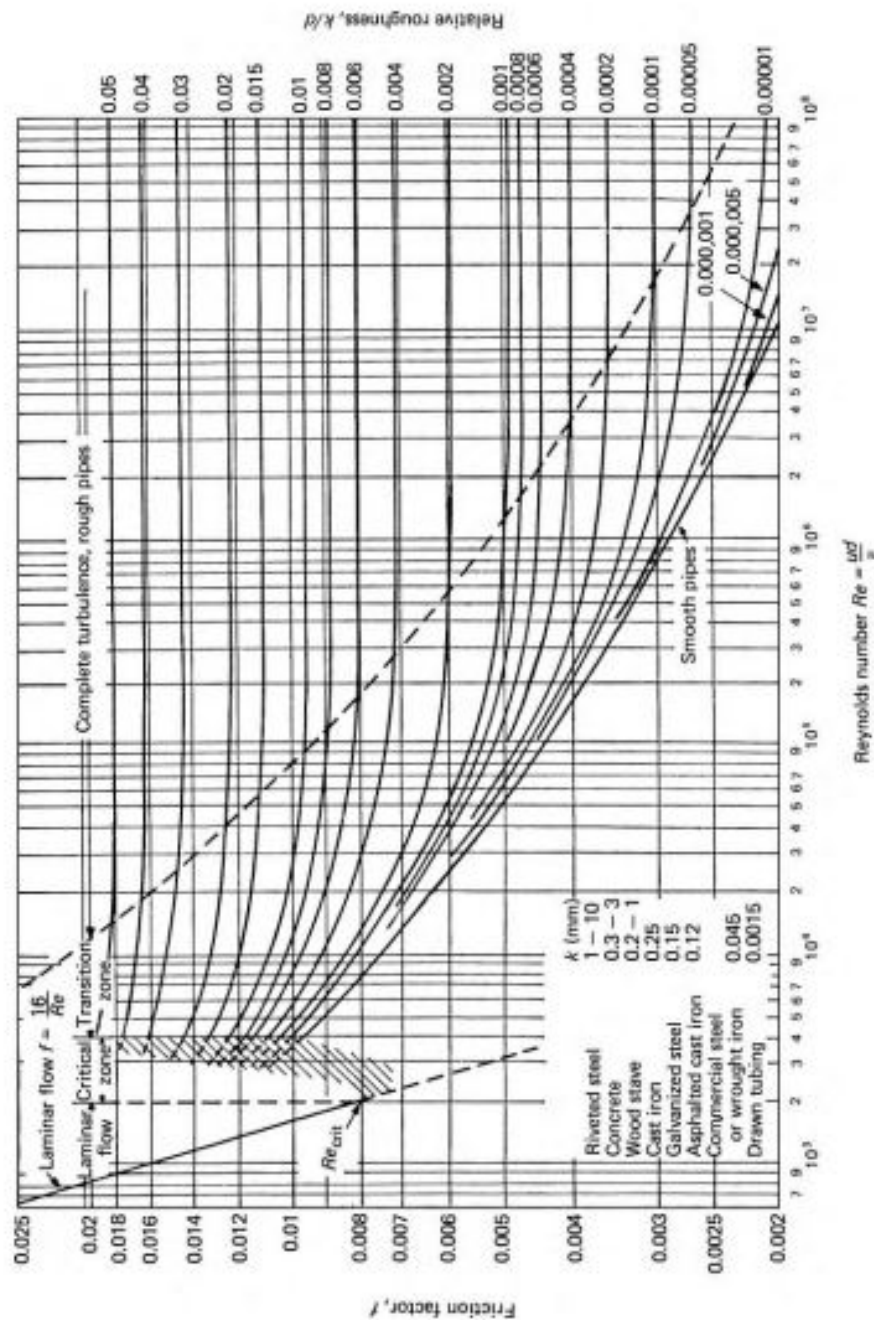
Där l är röret/tubens/tunnelns längd, v är medelhastigheten, d rördiametern och g tyngdaccelerationen. För icke cirkulära vattenvägar används istället hydraulisk diameter d_H .

Friktionsfaktorn f är lika med $4 \cdot C_f$, där C_f är en friktionskoefficient. f beror på den relativa råheten k/d på vattenvägen och Reynoldstal. Diametern, d , på vattenvägen relateras till en på platsen ekvivalent sandråhet, k . För nitade ståltuber är k mellan 0,9 – 9 mm, betongkulvertar ligger på 0,3 till 3 mm, vanligt stål 0,046 mm. När det gäller sprängda tunnlar kan man enligt vår erfarenhet sätta allt från 300 mm till 500 mm. För att få fram friktionsfaktorn f behövs ett så kallat Moodydiagram, se Figur 9.

Den hydrauliska diametern d_H beräknas som:

$$d_H = \frac{4A}{p} \quad (30)$$

A är sektionens area medan p är den våta perimetern det vill säga längden av tvärsnittets omkrets som är i kontakt med vattnet.



Figur 10 – Moodydiagram.

När vatten strömmar fritt i en kanal med öppen yta så kan Mannings formel användas om Reynolds tal är stort och det råder turbulent strömning. Det är en empirisk formel som är vida spridd. Mannings formel kan användas för förlustberäkning när exempelvis placering av nivågivare för nedre vattenyta måste göras efter sugrörsmynningen [11]. Manningsformel ser ut enligt följande:

$$h_f = \frac{Lv^2}{M^2 R^{4/3}} \quad (31)$$

Där L är tubens eller tunnelns längd, v vattnets hastighet, M Manningstal och R är det hydrauliskradie.

R beräknas enligt:

$$R = \frac{A}{p} \quad (32)$$

Observera att hydrauliskradie motsvarar $\frac{1}{4}$ av diametern på en cirkulär tvärsnittsyta. Detta kan skapa förvirring.

Används Mannings formel finns följande vägledning för valet av Mannings tal [11].

Trästavstuber	77 till 100
Stål, nitad	50 till 60
Betong, makadam yta	33 till 60
Betong, jämn yta	77 till 90
Kanaler	
Berg sprängd, ojämn yta	22 till 28
Berg sprängd, jämn yta	28 till 40
Skrovlig botten, gräs på sidor	25 till 40

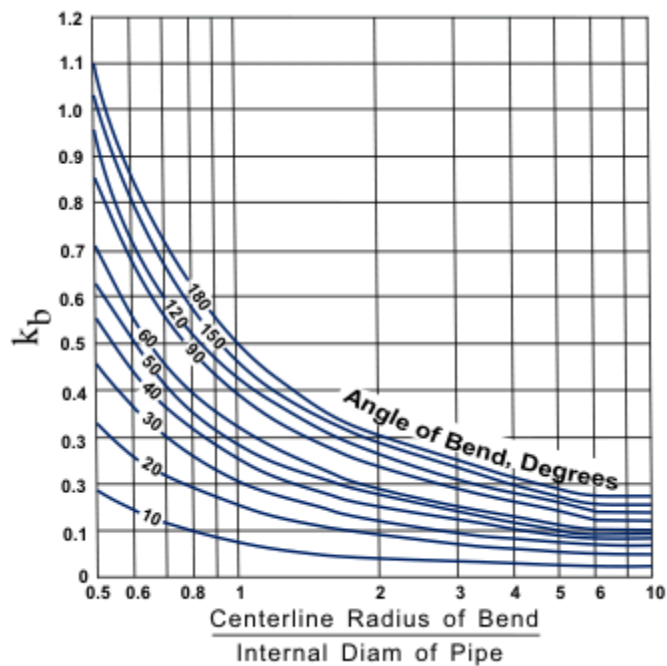
Krökförluster

I de fall då vattenytan mäts i intagsbassängen och det finns en intagstub så tillkommer krökförluster. För att beräkna turbinverkningsgraden ska dessa förluster beräknas.

Förlusterna kan beräknas enligt följande formel:

$$h_{k-f} = k_b \frac{v^2}{2g} \quad (33)$$

Där h_{k-f} är krökförlusterna, k_b en förlustfaktor, v medelhastigheten och g är tyngdaccelerationen. Förlustfaktorn k_b varierar med krökningsradien och krökningsvinkeln. Vid 90 graders böj varierar faktorn mellan 0,21 och 0,16. Vid 45 graders krökning varierar faktorn mellan 0,16 till 0,12, vid 22,5 graders krökning varierar faktorn 0,12 till 0,07; se diagram i under.



Figur 11 - Förlustfaktor k_b

Plötslig utvidgning - Borda-Carnot stöt

När vattnet lämnar sugröret och går in i en tunnel eller i älven sker en hastighetssänkning som ger upphov till en förlust som kallas för Borda-Carnot stöt, $h_{f_{B-C}}$ [11].

$$h_{f_{B-C}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (34)$$

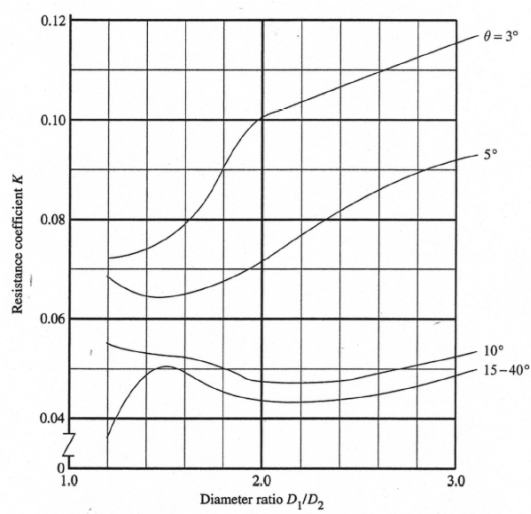
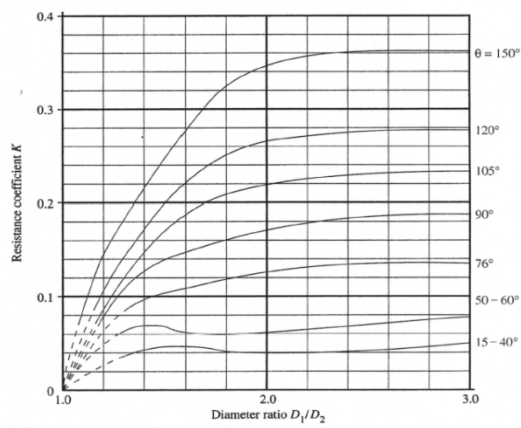
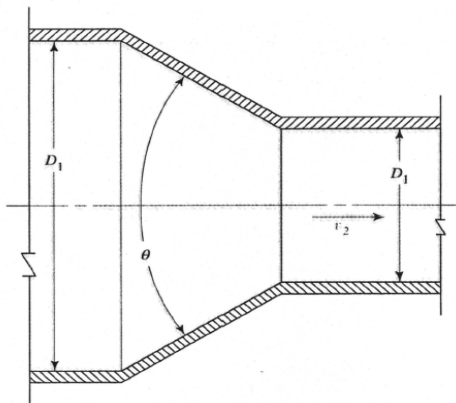
där hastigheten v_1 är medelhastigheten i den trängre delen (sugröret) och v_2 är medelhastigheten i tunneln eller älven efter sugröret.

Förlusten kan också uppstå mellan olika tunneldelar med olika areor och när en tunnel mynnar ut i älven.

Kontraktion

När vattnet exempelvis strömmar från en tilloppstub in till spiralen brukar det vara en övergång från en större tvärsnitts area till en mindre. I förekommande fall föreslås följande beräkning av förlusterna.

$$h_{f_{kont}} = k \frac{v_1^2}{2g} \quad (35)$$



Appendix B – Förberedelser inför prov

Checklista förberedelser inför prov

Förberedande åtgärder i kraftstationen (beställarens ansvar)

- ☐ Är tryckuttag, rördragning, ventiler inspekterade och uppfyller anvisningar?
- ☐ Finns dokumentation på tryckuttagen och stämmer den med anläggningen?
- ☐ Uppfyller mättransformatorer för mätning av generatorspänning och -ström gällande standarder?
- ☐ Mät upp mättransformatorernas noggrannhet (för generatorspänning och -ström) om de byts vid förnyelsen.
- ☐ Finns kretsscheman med anvisning om vilka plintar som ska användas för inkoppling av effektmätare (generatorspänning och -ström).
- ☐ Kontrollera att plintarna i föregående punkt är i bra skick för inkoppling för mätning av effektmätningssutrustning.
- ☐ Rensa intagsgrindarna från skräp.
- ☐ Se till att pegelrörens överkant eller golvnivåerna i direkt anslutning till rören är inmätta till en absolut nivå enligt för stationen gällande höjdsystem.
- ☐ Se till att fasta pegelskalor är i bra skick.
- ☐ Se till att det finns fasta skalor för avläsning av löphjulsinkel och pådrag (Kaplan- och Bulbturbiner).

Beställaren tillhandahåller nedanstående ritningar och dokumentation i god tid inför provet.

- ☐ Tidigare provrapporter.
- ☐ Information om nivågivare och pegelskalors placering.
- ☐ Översiktsritningar av stationen och aggregatet för förberedelser.
- ☐ Areor eller ritningar vid mätsektioner för mätning av intagsytan och ytan vid sugrörsutlopp.
- ☐ Märkdata för turbin och generator, cf. Appendix G.
- ☐ Kretsscheman för inkoppling till generatorns mättransformatorer.
- ☐ Mättransformatorers noggrannhet och omsättning. Gärna datablad.
- ☐ Generatorförluster och dess noggrannhet. Gärna från leveransprov.
- ☐ Typ av magnetisering, hur generatören magnetiseras.

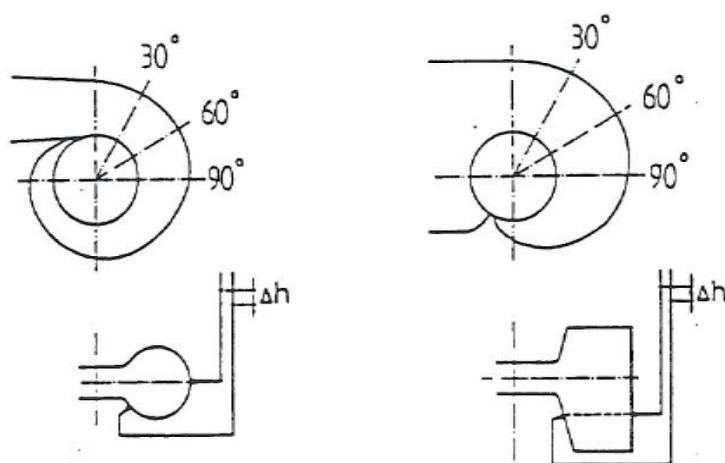
-
- ☐ Ritning över tryckuttagens placering.
 - ☐ Besiktningsrapport tryckuttag.
 - ☐ Modellprovsuppgifter, musseldiagram och kombinerings förhållande mellan olika fallhöjder. Ytråheter om uppräknig från modell till prototyp ska göras enligt SS-EN 62097 "Vattenturbiner –Metod för omräkning av verkningsgrad från modell till anläggning"[12].

Punkter att diskutera vid ett startmöte

- ☐ Driftförhållanden, begränsningar.
- ☐ Provningsplan.
- ☐ Finns driftpersonal att tillgå under uppkoppling och mätning.
- ☐ Har tillgänglig driftpersonal tillräckliga kunskaper om stationen.
- ☐ Finns möjlighet att använda egna nivågivare eller ska stationens nivågivare användas (rekommenderas inte).
- ☐ Vilken uppräkningsstandard från modell till prototyp ska användas.
- ☐ Saknas något material.

Appendix C – Tryckkuttagens placering

Tryckkuttagen bör vara placerade enligt anvisningar i IEC 60041 i ett radiellt snitt i spiralen på två olika radier. För en turbin med semispiral i betong placeras tryckkuttagen mellan 20° till 120° efter spiralinloppet, vid stålspiral placeras tryckkuttagen mellan 45° till 135° efter spiralinloppet



Figur 12 - Tryckkuttagens placering i spiralen.

Det är en avvägning vilken placering som är bäst. Ju längre in i en spiral tryckkuttagen sitter desto mindre känslig blir tryckmätningen för störningar i intaget, strömningen blir också mer lämpad för mätning med Winter-Kennedymetoden (mer lik potentialströmning). Nackdelen är att ju längre in i spiralen man mäter desto lägre differensryck mäts vilket påverkar mätnoggrannheten och ställer högre krav på differenstryckgivaren.

Appendix D – Vattnets densitet

Vattnets densitet, ρ [$kg \cdot m^{-3}$]

Värdena har beräknats enligt Herbst och Røgeners ekvationer enligt nedan.

Temperatur θ [°C]	Absolut tryck [10^5 Pa]							
	1	10	20	30	40	50	60	70
0	999,8	1000,3	1000,8	1001,3	1001,8	1002,3	1002,8	1003,3
1	999,9	1000,4	1000,9	1001,4	1001,9	1002,4	1002,9	1003,4
2	1000,0	1000,4	1000,9	1001,4	1001,9	1002,4	1002,9	1003,4
3	1000,0	1000,4	1000,9	1001,4	1001,9	1002,4	1002,9	1003,4
4	1000,0	1000,4	1000,9	1001,4	1001,9	1002,4	1002,9	1003,4
5	999,9	1000,4	1000,9	1001,4	1001,9	1002,4	1002,8	1003,3
6	999,9	1000,4	1000,9	1001,4	1001,8	1002,3	1002,8	1003,3
7	999,9	1000,3	1000,8	1001,3	1001,8	1002,3	1002,7	1003,2
8	999,9	1000,3	1000,8	1001,2	1001,7	1002,2	1002,7	1003,2
9	999,8	1000,2	1000,7	1001,2	1001,6	1002,1	1002,6	1003,1
10	999,7	1000,1	1000,6	1001,1	1001,6	1002,0	1002,5	1003,0
11	999,6	1000,0	1000,5	1001,0	1001,4	1001,9	1002,4	1002,9
12	999,5	999,9	1000,4	1000,9	1001,3	1001,8	1002,3	1002,7
13	999,4	999,8	1000,3	1000,7	1001,2	1001,7	1002,1	1002,6
14	999,2	999,7	1000,1	1000,6	1001,1	1001,5	1002,0	1002,4
15	999,1	999,5	1000,0	1000,4	1000,9	1001,4	1001,8	1002,3
16	998,9	999,4	999,8	1000,3	1000,7	1001,2	1001,7	1002,1
17	998,8	999,2	999,6	1000,1	1000,6	1001,0	1001,5	1001,9
18	998,6	999,0	999,5	999,9	1000,4	1000,8	1001,3	1001,7
19	998,4	998,8	999,3	999,7	1000,2	1000,6	1001,1	1001,5
20	998,2	998,6	999,1	999,5	1000,0	1000,4	1000,9	1001,3
21	998,0	998,4	998,9	999,3	999,8	1000,2	1000,7	1001,1
22	997,8	998,2	998,6	999,1	999,5	1000,0	1000,4	1000,9
23	997,5	997,9	998,4	998,8	999,3	999,7	1000,2	1000,6
24	997,3	997,7	998,1	998,6	999,0	999,5	999,9	1000,4
25	997,0	997,4	997,9	998,3	998,8	999,2	999,7	1000,1
26	996,8	997,2	997,6	998,1	998,5	999,0	999,4	999,9
27	996,5	996,9	997,4	997,8	998,3	998,7	999,1	999,6
28	996,2	996,6	997,1	997,5	998,0	998,4	998,9	999,3
29	995,9	996,3	996,8	997,2	997,7	998,1	998,6	999,0
30	995,7	996,1	996,5	996,9	997,4	997,8	998,3	998,7
31	995,3	995,7	996,2	996,6	997,1	997,5	997,9	998,4
32	995,0	995,4	995,9	996,3	996,8	997,2	997,6	998,1
33	994,7	995,1	995,5	996,0	996,4	996,9	997,3	997,7
34	994,4	994,8	995,2	995,7	996,1	996,5	997,0	997,4
35	994,0	994,4	994,9	995,3	995,8	996,2	996,6	997,1
36	993,7	994,1	994,5	995,0	995,4	995,8	996,3	996,7
37	993,3	993,7	994,2	994,6	995,0	995,5	995,9	996,3
38	993,0	993,4	993,8	994,2	994,7	995,1	995,5	996,0
39	992,6	993,0	993,4	993,9	994,3	994,7	995,2	995,6
40	992,2	992,6	993,1	993,5	993,9	994,4	994,8	995,2

Herbst and Røgeners ekvationer enligt nedan:

$$\rho = 10^2 \cdot \left[\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 R_{ij} \cdot \alpha^j \cdot \beta^{(i-1)} \right]^{-1} \quad (36)$$

där

$$\beta = \frac{1}{p^*} \cdot (p_{abs} + 200 \cdot 10^5) \quad (37)$$

med p_{abs} i Pa och $p^* = 10^5$ Pa och

$$\alpha = \frac{1}{\Theta^*} \cdot (\Theta - \Theta_1) \quad (38)$$

Med $\Theta^* = 1$ °C, $\Theta_1 = 0$ °C från 0 °C till 20 °C och $\Theta_1 = 20$ °C från 20 °C till 50 °C.

Koefficienten R_{ij} ges av:

R(i,j) för temperaturintervallet 0,0 °C till 20,0 °C [m³/kg]				
i	j = 0	j = 1	j = 2	j = 3
0	$0,4466741557 \cdot 10^{-4}$	$-0,5594500697 \cdot 10^{-4}$	$0,3402591955 \cdot 10^{-5}$	$-0,4136345187 \cdot 10^{-7}$
1	$0,1010693802$	$-0,1513709263 \cdot 10^{-4}$	$0,1063798744 \cdot 10^{-5}$	$-0,8146078995 \cdot 10^{-8}$
2	$-0,5398392119 \cdot 10^{-5}$	$0,4672756685 \cdot 10^{-7}$	$-0,1194765361 \cdot 10^{-8}$	$0,1366322053 \cdot 10^{-10}$
3	$0,7780118121 \cdot 10^{-9}$	$-0,1619391322 \cdot 10^{-10}$	$0,5883547485 \cdot 10^{-12}$	$-0,8754014287 \cdot 10^{-14}$

R(i,j) för temperaturintervallet 20,0 °C till 50,0 °C [m³/kg]				
i	j = 0	j = 1	j = 2	j = 3
0	$-0,4410355650 \cdot 10^{-4}$	$0,3052252898 \cdot 10^{-4}$	$0,9207848427 \cdot 10^{-6}$	$-0,2590431198 \cdot 10^{-7}$
1	$0,1011269892$	$0,1763956234 \cdot 10^{-4}$	$0,5750340044 \cdot 10^{-6}$	$-0,1923769978 \cdot 10^{-8}$
2	$-0,4832441163 \cdot 10^{-5}$	$0,1533281704 \cdot 10^{-7}$	$-0,3749721294 \cdot 10^{-9}$	$0,1322804180 \cdot 10^{-11}$
3	$0,6194433327 \cdot 10^{-9}$	$-0,3164540431 \cdot 10^{-11}$	$0,6311389123 \cdot 10^{-13}$	$0,2469249342 \cdot 10^{-15}$

Appendix E – Likformighetslagarna

Likformighetslagarna

Vid indexprov görs traditionellt antagandet om att verkningsgradsändringen mellan provpunkterna är liten och likformighetslagarna nedan används för att räkna om flöde och effekt mellan olika fallhöjder.

Enligt Krivchenko [4] gäller följande likformighetslagar för turbiner:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \cdot \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} \cdot \frac{\sqrt{\eta_1}}{\sqrt{\eta_2}} \quad (39)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \cdot \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} \cdot \frac{\sqrt{\eta_1}}{\sqrt{\eta_2}} \quad (40)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \cdot \frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} \cdot \frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot \frac{\sqrt{\eta_1}}{\sqrt{\eta_2}} \quad (41)$$

Vid indexprov antas traditionellt att termen $\eta_1/\eta_2 = 1$.

Enhetsvarvtal och enhetsflöde

Modellsambanden för att beräkna enhetsvärden ser ut enligt följande:

n_{11} = enhetsvarvtal [rpm]

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} \quad (42)$$

Q_{11} = enhetsvolymström [m^3/s]

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \quad (43)$$

Andra definitioner för enhetsvarvtal och enhetsvolymström finns. Se vidare i IEC60193 [9].

Appendix F - Felanalys

För att kunna uppskatta mätfelet används följande ekvation

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (44)$$

Där Δy är maxfelet, funktionen f är funktionen vars fel ska analyseras [13].

I detta fall är f verkningsgraden, η , och kan uttryckas med följande ekvation:

$$\eta = \frac{P}{Q\rho gh} \quad (45)$$

I detta fall är flödet, Q , proportionellt mot kvadratroten ur differenstrycket i spiralen, och man kan skriva:

$$\eta = \frac{P}{k\sqrt{\Delta p}\rho gh} \quad (46)$$

För att beräkna felet i mätningarna deriveras ekvationen ovan med avseende på de variabler som mäts. Dessa är fallhöjden h , effekten P och differenstrycket Δp .

Alltså

$$\frac{\partial \eta}{\partial h} = -\frac{P}{k\sqrt{\Delta p}\rho gh^2} \quad (47)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial P} = \frac{1}{k\sqrt{\Delta p}\rho gh} \quad (48)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \Delta p} = -\frac{P}{2k(\Delta p)^{3/2}\rho gh} \quad (49)$$

Maxfelet Δy är summan av absolutbeloppet

$$|\Delta y| = \left| -\frac{P}{k\sqrt{\Delta p}\rho gh^2} \Delta h \right| + \left| \frac{1}{k\sqrt{\Delta p}\rho gh} \Delta P \right| + \left| -\frac{P}{2k(\Delta p)^{3/2}\rho gh} \Delta(\Delta p) \right| \quad (50)$$

Det maximala felet innebär att samtliga fel samverkar, detta ger en allt för pessimistisk skattning. Det vanligaste är att man istället tar kvadratsumman av felen:

$$Fel = \sqrt{\left(-\frac{P}{k\sqrt{\Delta p}\rho gh^2}\right)^2 (\Delta h)^2 + \left(\frac{1}{k\sqrt{\Delta p}\rho gh}\right)^2 (\Delta P)^2 + \left(-\frac{P}{2k(\Delta p)^{3/2}\rho gh}\right)^2 (\Delta(\Delta p))^2}$$

(51)

alternativt

$$Fel = \sqrt{(\Delta Q_{\%})^2 + (\Delta h_{\%})^2 + (\Delta P_{\%})^2}$$

(52)

där $\Delta Q_{\%}$ är det procentuella felet i flödesuppskattningen, $\Delta h_{\%}$ är det procentuella felet i fallhöjdsmätningen och $\Delta P_{\%}$ är det procentuella felet i effektmätningen.

Appendix G – Maskindata

Provobjektet bör beskrivas så väl som möjligt i rapporten. Här specificeras följande punkter:

- Generatordata
- Turbindata

Generatordata

Följanden information om generatoren bör finnas med i rapporten:

- Fabrikat
- Typ / modell
- Serienummer / Identifikationsnummer
- Märkeffekt
- Effektfaktor
- Märkspänning
- Märkström
- Ev omsättning för använda strömtransformatorer i effektmätning
- Ev omsättning för använda spänningstransformatorer i effektmätning
- Märkvarvtal
- Generatorförluster
 - o Tomgångsförluster
 - o Belastningsförluster
 - o Friktionsförluster härrörda till generator
 - o Magnetiseringsförluster samt vilken typ av magnetisering generatoren har

Beräknade generatorförluster ska anges om inte mätning utförts. Noggrannheten blir dock därefter varför rapport och analys behöver uppdateras efter mätning (ex värmeprov) på generatoren utförts.

Turbindata

Följande information bör finnas med om turbinen:

- Fabrikat
- Typ (Francis / Kaplan / Diagonal etc)
- Löphjulsbeteckning, eventuell nav-% samt löphjulsdiameter

-
- Märkvarvtal
 - Nominell effekt samt eventuell maxeffekt
 - Nominellt flöde samt eventuellt maxflöde
 - Nominell fallhöjd
 - Eventuella begränsningar

Begränsningar kan exempelvis vara eventuella maxeffekter beroende av nivå på den nedre vattenytan.

Appendix H – Redovisning av mätdata

Det som minst bör framgå för varje provpunkt är:

- Provpunktsnummer
- Datum och tid för provpunkterna
- Löphjulsöppning
- Pådragsöppning
- Mätta vattenytor/beräknade energinivåer använda för fallhöjdsberäkning
- Beräknade fallhöjder/nettofallhöjder
- Mätt generatoreffekt
- Beräknad generatorförlust
- Beräknad turbineffekt
- Mätvärden på differenstrycksignal
- Beräknat flöde baserat på beräkningssambandet för flödet enligt 2.3.

Vägledning för relativ verkningsgradsmätning med Winter- Kennedymetoden

Rapporten är en vägledning för utförande, analys och rapportering av relativa verkningsgradsmätningar i vattenkraftstationer med Winter-Kennedy-metoden. Vägledningen bygger på författarnas samlade erfarenheter.

Winter-Kennedy-metoden används bl.a. tillsammans med modellprov när anläggningsägaren vill verifiera om en förväntad prestandaökning erhållits efter en förnyelse. Den används också för att ta fram kombineringsregler för dubbelreglerade vattenturbiner.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se