

# Livslängdsbedömningar för stator- lindningar i vattenkraftgeneratorer

---

Anders Karlsson



UPPSALA  
UNIVERSITET

Teknisk- naturvetenskaplig fakultet  
UTH-enheten

Besöksadress:  
Ångströmlaboratoriet  
Lägerhyddsvägen 1  
Hus 4, Plan 0

Postadress:  
Box 536  
751 21 Uppsala

Telefon:  
018 – 471 30 03

Telefax:  
018 – 471 30 00

Hemsida:  
<http://www.teknat.uu.se/student>

## Abstract

Livslängdsbedömningar för statorlindningar i  
vattenkraftgeneratorer

### **Estimating Lifetimes for Stator Windings in Hydropower Generators**

---

*Anders Karlsson*

In today's technically advanced society, a robust power system is crucial. To achieve this, the power plants must work more or less flawlessly. In Sweden 50 percent of the electric energy comes from nuclear power, while the other half comes from hydropower. Compared with nuclear power, hydropower is much more flexible. Because of this, adjusting hydropower usage is almost the only way in which power production is regulated in Sweden. Therefore the availability of the hydropower plants is more important than ever. In a high voltage power generator one of the most critical components is the stator winding. The cost of a stator winding breakdown is extensive, especially when it comes to outage in production. However, nobody wants to change the stator winding if it is not necessary. During the last decades intermittent operation has increased, which has lead to greater strains on the stator windings. Combined with the increased need for availability, this means that a good estimation of the lifetime of a stator winding is crucial. It has been found that generator design, diagnostic data, and power plant operation all are important parameters when estimating lifetimes, thus must several methods be considered. This has often been disregarded in earlier research. In this broad investigation however, several methods are presented, such as lifetime distributions based on Bayesian methods, multiple regression analysis, and various diagnostic methods. While the multiple regression analysis method is developed within the thesis, the other methods originate from earlier research.

Handledare: Thommy Karlsson  
Ämnesgranskare: Bengt Carlsson  
Examinator: Elisabet Andrésdóttir  
ISSN: 1650-8319, UPTec STS06 007

# Sammanfattning

I dagens högteknologiska samhälle är ett välfungerande elsystem helt avgörande. Utan ett sådant skulle såväl industri som hushåll drabbas av ständiga avbrott, vilket skulle vara mycket negativt ur en samhällsekonomisk synvinkel och inte skulle accepteras av konsumenterna. För att över huvud taget ha elektricitet att leverera måste även kraftproduktionen vara tillförlitlig. I Sverige består omkring hälften av elproduktionen av kärnkraft, medan den andra halvan utgörs av vattenkraft. Det är mycket besvärligt att reglera elproduktionen vid kärnkraftverk, därför tillåts dessa producera lika mycket elektricitet oavsett hur stor efterfrågan är. Vattenkraften är däremot mycket enklare att reglera, vilket lett till att antalet start och stopp ökat inom vattenkraften i takt med kärnkraftens framväxt. Detta ställer ytterligare krav på hög tillgänglighet (andel av tiden de är i drift) hos vattenkraftverken.

Anledningarna till haverier inom vattenkraften är givetvis flera, men det handlar givetvis inte om att hela vattenkraftverk fallerar, utan problemen finns på komponentnivå. Ett vattenkraftverk har vanligen flera aggregat (för definition av vattenkraftaggregat, se avsnitt 1.7). Ett haveri på ett aggregat betyder sällan att ett annat havererar. Aggregaten kan alltså ses som i princip fristående enheter. Ett aggregats tillgänglighet är beroende på att dess kritiska komponenter fungerar. I ett vattenkraftaggregat passerar vattnet genom turbinen, som via en turbinaxel överför vattnets rörelseenergi till generatoren. Den roterande komponenten i generatoren kallas rotern. Denna är magnetiserad och inducerar därmed en ström i statorlindningens kopparkärna. Av alla kritiska komponenter är just statorlindningen sannolikt den mest kritiska. Detta beror främst på att en havererande statorlindning medför mycket långa produktionsbortfall. Sådana är mycket kostsamma inom vattenkraften. Därför är det av yttersta vikt att byta ut en statorlindning innan den havererar. Då kan nämligen den gamla statorlindningen sitta kvar i aggregatet, som kan fortsätta att producera elektricitet, medan den nya konstrueras och tillverkas. Detta ger mycket kortare produktionsbortfall, än om statorlindningen havererar. Å andra sidan är statorlindningsbyten dyra, vilket medför att det finns en ovilja att utföra byten om de inte är helt nödvändiga. Att hantera byten av statorlindningar på ett så ekonomiskt sätt som möjligt, har setts som alltmer viktigt i samband med att ett allt mer marknadsekonomiskt synsätt växt fram under de senaste decennierna.

En statorlindnings livslängd är typiskt omkring 50 år och dess åldring (åldrande) är mycket komplext. Två helt identiska statorlindningar som körts på likartat sätt, behöver inte nödvändigtvis åldras helt lika. Generellt kan dock åldringen delas in i elektrisk, mekanisk och termisk åldring, samt yttre miljö-åldring. Den totala effekten av dessa åldringstyper avgör statorlindningens livslängd. Ett annat sätt att se på problematiken, är att se statorlindningens livslängd som resultatet av dess nuvarande kondition, aggregatets drift, samt statorlindningens design. Redan idag bedöms livslängden hos statorlindningar. Detta görs framför allt genom att mätdata från så kallade DSD-mätningar analyseras kvalitativt. I detta fall beaktas dock bara statorlindningens kondition. Ingen hänsyn tas till drift och design. Utöver detta finns ett mer teoretiskt angreppssätt där livslängdsfördelningar tagits fram. Dessa livslängdsfördelningar har tagits fram med hjälp av så kallad Bayesiansk metodik, där verkliga observationer av tekniska livslängder sammanvägts med expertbedömningar. Detta har gjorts på grund av det låga antalet observationer. Problemet är dock att dessa livslängdsfördelningar dels saknar koppling till de enskilda statorlindningarna, dels att varken kondition, drift, eller design beaktas.

Ett av syftena med detta examensarbete är att närma teori och praktik, ett annat är att försöka sammankoppla flera typer av analysverktyg till ett heltäckande koncept. Det första syftet uppfylls genom multipel regressionsanalys. I denna relateras återstående tekniska livslängder ( $y$ ) till ett antal  $x$ -variabler (beroendevariabler), som härrör ur konditionen, driften och designen. Som svar fås en ekvation, där  $x$ -variabler från en statorlindning i drift kan sättas in, för att få en predikterad återstående teknisk livslängd ( $y_{pred}$ ). I och med detta kan även det andra syftet tyckas uppfyllt. Dock går multipel regressionsanalys inte att använda för alla typer av statorlindningar. Nyare statorlindningar är isolerade med epoxi till skillnad från äldre som är asfaltisolerade. Det finns idag knappast några observerade återstående tekniska livslängder för epoxiisolerade statorlindningar. De är helt enkelt för nya. Vidare är den multipla regressionsanalysens resultat något skakiga. Detta beror främst på att antalet observationer är lågt även för de asfaltisolerade statorlindningarna. Allt detta visar behovet av att ta hänsyn till flera analysverktyg, till exempel de Bayesianskt baserade livslängdsfördelningarna. Det heltäckande koncept som tagits fram är ett försök att nå en sådan helhetssyn.

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Inledning.....                                                       | 3  |
| 1.1 Problemformulering .....                                           | 6  |
| 1.2 Forskningsläge – ur ett svenskt perspektiv .....                   | 8  |
| 1.3 Syfte .....                                                        | 10 |
| 1.4 Frågeställningar .....                                             | 11 |
| 1.5 Avgränsningar .....                                                | 11 |
| 1.6 Källmaterial .....                                                 | 12 |
| 1.7 Begreppsdefinitioner .....                                         | 13 |
| 1.8 <i>Paper</i> till PMAPS.....                                       | 13 |
| 2 Bakgrund .....                                                       | 15 |
| 2.1 Kortfattad beskrivning av vattenkraftens framväxt.....             | 15 |
| 2.2 Kortfattad teknisk beskrivning av vattenkraftaggregat. ....        | 16 |
| 3 En statorlindnings åldrande .....                                    | 17 |
| 3.1 Termisk åldring .....                                              | 18 |
| 3.2 Elektrisk åldring .....                                            | 19 |
| 3.3 Mekanisk åldring.....                                              | 20 |
| 3.4 Yttre miljö-åldring.....                                           | 21 |
| 4 Teori och metod .....                                                | 23 |
| 4.1 Multipel regressionsanalys .....                                   | 23 |
| 4.1.1 Förlustfaktorn .....                                             | 25 |
| 4.1.2 Partiella urladdningar .....                                     | 25 |
| 4.1.3 Drifttid.....                                                    | 25 |
| 4.1.4 Intermittent drift .....                                         | 26 |
| 4.1.5 Elektrisk påkänning.....                                         | 26 |
| 4.1.6 Ålder.....                                                       | 26 |
| 4.1.7 Återstående livslängd .....                                      | 26 |
| 4.1.8 Predikterad återstående livslängd.....                           | 27 |
| 4.1.9 Andra viktiga faktorer .....                                     | 27 |
| 4.1.10 Validitet och reliabilitet för multipel regressionsanalys ..... | 27 |
| 4.2 PLS och PCA – exempel på andra modelleringsmetoder .....           | 28 |
| 4.3 Bayesianska livslängdsfördelningar .....                           | 28 |
| 4.4 Att studera modellanvändande .....                                 | 31 |
| 4.5 Att ta fram ett nytt koncept .....                                 | 31 |
| 5 Resultat och analys.....                                             | 33 |
| 5.1 Multipel regressionsanalys .....                                   | 33 |
| 5.1.1 Multipel regressionsanalys inklusive parametern ålder .....      | 34 |
| 5.1.2 Multipel regressionsanalys exklusive parametern ålder.....       | 35 |
| 5.1.3 Jämförelse av resultat .....                                     | 36 |
| 5.1.4 Predikterade livslängder för statorlindningar i drift.....       | 37 |
| 5.1.5 Multipel regressionsanalys och verkligheten .....                | 41 |
| 5.1.6 Robusthet hos den multipla regressionsanalysen .....             | 43 |
| 5.1.7 Multipel regressionsanalys och alternativa parameterval .....    | 43 |
| 5.2 Ett alternativt synsätt .....                                      | 44 |
| 5.3 Nya tillämpningar på livslängdsfördelningar .....                  | 46 |
| 5.4 Modellanvändande .....                                             | 47 |
| 5.5 Nytt koncept .....                                                 | 47 |
| 6 Diskussion .....                                                     | 50 |
| 7 Slutsatser .....                                                     | 52 |
| 8 Fortsatt arbete .....                                                | 54 |
| Referenslista .....                                                    | 55 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Intervjuer .....                                                       | 57 |
| Bilagor .....                                                          | 58 |
| Bilaga 1 - Begreppsdefinitioner .....                                  | 58 |
| Bilaga 2 – Vattenkraftens framväxt .....                               | 59 |
| Bilaga 3 – Kortfattad teknisk beskrivning av vattenkraftaggregat.....  | 62 |
| Bilaga 4 – Uträkning av medelvärde för epoxiisolerade.....             | 64 |
| Bilaga 5 – Avvikelse för alla epoxiisolerade .....                     | 65 |
| Bilaga 6 – Avvikelse för senaste mätning epoxiisolerade .....          | 66 |
| Bilaga 7 – Uträkning av medelvärde för asfaltisolerade .....           | 67 |
| Bilaga 8 – Avvikelse för alla asfaltisolerade .....                    | 69 |
| Bilaga 9 – Avvikelse för senaste mätning asfaltisolerade.....          | 71 |
| Estimating Lifetimes for Stator Windings in Hydropower Generators..... | 73 |

# 1 Inledning

Dagens samhälle är mycket beroende av en tillförlitlig elförsörjning. För att nå slutkonsumenter i form av privatpersoner och företag, måste ett robust elnät finnas. Men för att över huvud taget ha elektricitet att leverera, måste givetvis kraftverken i systemet fungera på ett tillfredställande sätt. Vattenkraftens roll i elsystemet är speciell, eftersom energin, eller mera precist vattnet, går att lagra, samt att energin kan utvinnas precis när den behövs. Till skillnad från exempelvis ett kärnkraftverk kan ett vattenkraftverk startas och stoppas med mycket kort varsel.

Den svenska vattenkraften har en lång historia, särskilt om en bredare definition av vattenkraft används. Att utnyttja vattenkraft till sågar, kvarnar och dylikt går att spåra många hundra år bakåt i tiden. Vattenkraften kan dock definieras på ett snävare sätt och då bara omfatta elproducerande vattenkraft. I denna rapport används i fortsättningen enbart den senare definitionen, det handlar med andra ord endast om elproducerande vattenkraft. Detta är förövrigt analogt med den vedertagna synen på vattenkraft i dagens samhälle. Vattenkraften, enligt den senare definitionen, har i Sverige en drygt hundraårig historia och står idag för knappt hälften av elproduktionen i landet. Sett ur ett globalt miljöperspektiv är vattenkraften gynnsam, då den är förnyelsebar och inte bidrar till den ökande växthuseffekten. I Sverige är vattenkraften den enskilt största energikällan för förnyelsebar energi (Energimyndigheten, 2005). När det gäller den lokala miljön är dock de negativa effekterna av vattenkraften större och risken finns att betydande lokala natur- och kulturvärden måste förstöras för att möjliggöra byggandet av ett vattenkraftverk. Detta har inte minst visat sig i samband med bygget av Three Gorges Dam, eller Tre raviners damm, i Kina, där mycket stora landområden lagts under vatten.

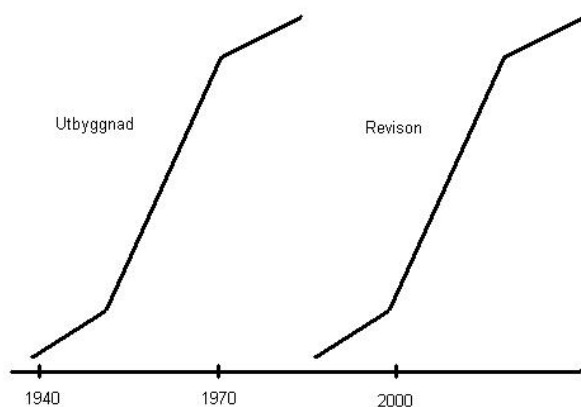
Geografiskt är vattenkraften mycket spridd, även om huvuddelen av vattenkraftverken är förlagda till de norrländska älvarna. Totalt finns nästan 2000 vattenkraftverk i Sverige, men av dessa har endast drygt 700 en effekt som överstiger 1,5 MW. Detta innebär att det finns ett stort antal mycket små vattenkraftverk, som inte ens totalt sett utgör någon större del av den svenska elproduktionen. De 700 vattenkraftverk som har en högre effekt än 1,5 MW står nämligen för cirka 98 procent av den totala elproduktionen från svensk vattenkraft (Energimyndigheten, 2005). Det är alltså uppenbart att skillnaden mellan små och stora vattenkraftverk är betydande. För att konkretisera detta kan vattenkraftverk med effekter på mindre än 1,5 MW jämföras med Stornorrfor kraftverk (se figur 1) vid Umeälven. Detta vattenkraftverk är Sveriges största sett till elproduktion och har den näst högsta effekten, vilken uppgår till 591 MW: Detta är jämförbart med en inte alltför stor kärnkraftreaktor (Vattenfall, 2005a). Ett litet vattenkraftverk levererar således endast några tusendelar av den effekt som levereras från ett av de allra största vattenkraftverken.



*Figur 1 – Stornorrfors kraftverk – färdigt 1958, utbyggt med ett fjärde aggregat 1984, total effekt 591 MW.*

Trots de många goda miljöeffekterna med vattenkraft och den påbörjade avvecklingen av kärnkraften, byggs i princip inte längre några nya vattenkraftverk i Sverige. Den viktigaste orsaken till detta är att riksdagen beslutat att genom lagstiftning skydda de stora norrländska älvarna Torneälven, Kalixälven, Piteälven och Vindelälven samt ytterligare 15 älvar och älvsträckor, samt att det knappast finns några andra plaster kvar, där det är ekonomiskt försvarbart att bygga nya vattenkraftverk. Viss nybyggnation av mindre vattenkraftverk kan dock komma att ske. Trots det mycket begränsade byggandet av nya vattenkraftverk i Sverige, finns många möjligheter att öka effekten inom svensk vattenkraft. Det går nämligen att förbättra befintliga vattenkraftverk. Rent tekniskt är denna potential stor, men endast en mindre del anses ekonomiskt försvarbar (Vattenfall, 2006). Ibland är det emellertid nödvändigt att göra en revision och byta ut någon eller några av de viktigaste komponenterna i ett vattenkraftverk. Det kan till exempel handla om statorlindningen. Att byta denna är dock kostsamt och inget som görs utan noggranna överväganden, vilket förklarar viljan inom Swedpower och Vattenfall att få detta examensarbete utfört. När det väl görs en revision av ett vattenkraftverk ökas vanligtvis effekten, vilket får som följd att den totala effekten från den svenska vattenkraften sakta men säkert kan höjas. Det är dock viktigt att komma ihåg att revisionerna i regel enbart görs på ett vattenkraftaggregat (för definition av vattenkraftaggregat, se avsnitt 1.7) i taget och inte på hela vattenkraftverk, samt att livslängden är så hög att antalet revisioner blir relativt lågt.

Under perioden 1940 till 1970 byggdes vattenkraften ut mycket kraftigt i Sverige. Sedan 1970-talen har emellertid endast några få vattenkraftverk tillkommit, vilket givetvis till största del har att göra med den skyddslagstiftning som redan nämnts. Idag närmar sig dock många aggregat en ålder då revision blir nödvändig. Även av ekonomiska skäl kan det ibland vara intressant att göra revisioner av vattenkraftverk, då ett mer effektivt utnyttjande av vattenpotentialen leder till att elcertifikat kan erhållas. Det är med andra ord högst sannolikt att antalet revisioner inom vattenkraftindustrin kommer att öka under de närmaste åren, framför allt av tekniska skäl, men i någon mån även av ekonomiska. (Se figur 2.) Det är därför viktigt att överföra den kompetens som finns kvar från utbyggnadsåren under efterkrigstiden (Energimyndigheten, 2005).



Figur 2 – Schematisk bild som visar utbyggnaden respektive revisionerna inom den svenska vattenkraften, i båda fallen kumulativt.

Under 1990-talet genomfördes en avreglering av den svenska elmarknaden. Detta medförde ett mer marknadsekonomiskt synsätt. Kraftindustrin hade tidigare framför allt strävat efter hög tillgänglighet i elsystemet, men detta kom nu att mattas av. Dock är produktionsbortfall mycket dyra. En alltför låg grad av underhåll är därför inte önskvärd. Före 1990-talet var dock underhållsnivån obefogat hög, vilket exempelvis behandlas i Nyström & Ståhl (1995). Det bör också poängteras att den relativt låga graden av underhåll under 1990-talet inte följt med in i 2000-talet. Under de närmaste åren kommer nämligen såväl Vattenfall som de andra stora vattenkraftaktörerna i Sverige satsa flera miljarder kronor på revisioner av sina kraftverk. Sammanfattningsvis kan utvecklingen sägas ha gått från mycket omfattande underhåll via lågt underhåll till ett mer balanserat synsätt. Detta examensarbete kan sägas vara en del av detta synsätt, eftersom den grundläggande tanken är att få fram verktyg för att göra rätt revisioner i rätt ordning. Det vill säga att förhindra haverier och medföljande produktionsfall, men samtidigt inte göra revisioner på kraftverk som på ett säkert sätt kan köras i ytterligare många år.

Med kärnkraften som baskraft fick vattenkraften en delvis annan roll och övergick alltmer till *intermittent drift*. Tidigare kördes ofta vattenkraftverk på kontinuerlig basis, för att under de senaste decennierna alltmer övergå till startas och stoppas beroende på när elektriciteten behövs. Fenomenet kallas antingen *start och stopp* eller *intermittent drift*. Denna utveckling har dock inte skett över en natt, utan har kommit smygande över några tiotal år. Sannolikt är denna utveckling långtifrån fullbordad. Antalet start och stopp kommer alltså sannolikt att öka under de kommande åren. Detta diskuteras bland annat av Lars R Nilsson (2005). En anledning till detta, är att allt fler förnyelsebara energikällor såsom vindkraft och vågkraft introduceras. Dessa energikällor medför en viss destabilisering av elsystemet, vilket kan åtgärdas med hjälp av vattenkraften, som kan skapa såväl energibalans som stabilitet. Detta bygger dock på vattenkraftens extrema reglerförmåga och kommer att kräva allt fler start och stopp.

Examensarbetet utfördes på Vattenfalls dotterbolag Swedpower i Älvkarleby inom civilingenjörsprogrammet System i teknik och samhälle vid Uppsala universitet. På uppmaning av Vattenfall har vattenkraftverken i rapporten anonymiserats på så sätt att deras namn bytts ut mot bokstäver. Anledningen till detta, är att företaget inte vill lämna ut viktig information om sina anläggningar. G1, G2, och så vidare, anger vilket aggregat i vattenkraftverket det är fråga om.

## 1.1 Problemformulering

För att utnyttja vattenkraften på ett så effektivt sätt som möjligt, är det viktigt att göra revisionerna i rätt ordning och vid rätt tidpunkt. Att göra revisionerna för tidigt innebär att fungerande komponenter byts ut, trots att de skulle kunna fungera länge till. Under denna tid skulle elektricitet kunna fortsätta levereras. Å andra sidan är det riskabelt att vänta för länge med en revision, eftersom det kan leda till haverier. Vid ett haveri tillkommer nämligen kostnaden för produktionsbortfall, som ofta är tiofalt högre än kostnaden för själva revisionen. Det gäller alltså att inte vänta för länge med en revision, men inte heller att göra den för tidigt.

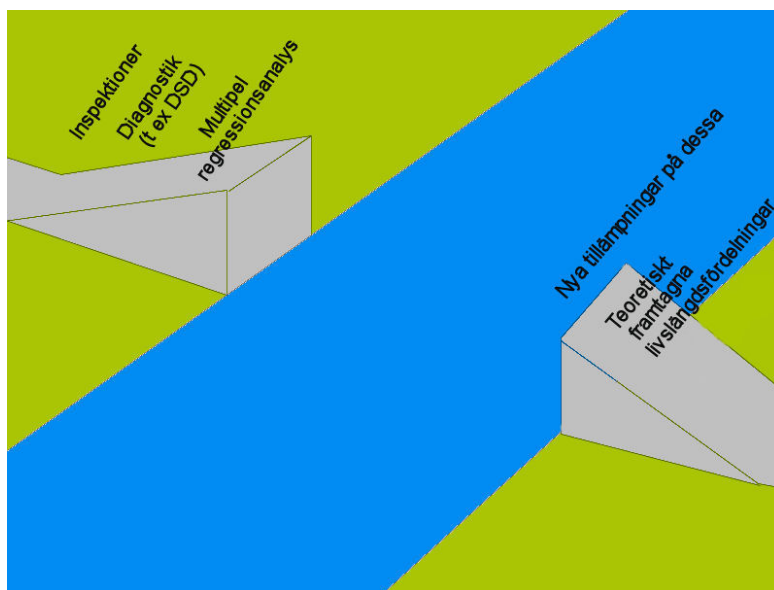
Hittills har diskussionen i denna rapport varit väldigt bred, snarast på kraftverksnivå. Det är dock inte hela vattenkraftverk eller ens hela aggregat som havererar, utan komponenter. För att bedöma vilka aggregat som måste revideras, är det därför nödvändigt studera aggregatets kritiska komponenter. Ett mycket viktigt delsystem i ett vattenkraftaggregat är generatoren. I denna finns ett flertal kritiska komponenter: lager, rotorpoler, magnetisering, kylsystem, statorkärna, statorlindning, statorstomme, med flera. Av dessa framstår statorlindningen, eller mera specifikt dess isolering, som den kanske allra mest kritiska. Den skulle till och med kunna ses som en av de allra mest kritiska komponenterna i hela vattenkraftaggregatet. Statorlindningar är unika och komplexa till sin karaktär, vilket gör att de kräver långa leveranstider. Ett haveri i en statorlindning leder alltså till stora produktionsbortfall. Kan statorlindningen bytas under ordnade former blir avbrottet mycket kortare, eftersom planeringsarbetet kan göras medan den gamla statorlindningen fortfarande är i drift.

Till skillnad från många andra komponenter, görs också en hel del diagnostiska mätningar på statorlindningen. Inom Swedpower kallas dessa DSD, dielektrisk statorlindningsdiagnostik, och görs varje år på ett flertal statorer runt om i Sverige. Data från dessa mätningar lagras av Swedpower i en databas och analyseras i samband med planering av revisioner. Dock har dessa data bara till en mindre del undersökts kvantitativt. Det vanliga tillvägagångssättet är istället att undersöka hur dessa mätdata förändrats med tiden. Dessa analyser görs givetvis utifrån de mycket omfattande kunskaper som finns bland personalen på Swedpower. Det är absolut inget fel med dessa undersökningar. Däremot finns behov av en större teoretisk överbyggnad inom området, för att på olika sätt ge återkoppling till de generatorspecialister som arbetar med detta. Det är dock troligt och till och med önskvärt att det huvudsakliga arbetet inför en revision kommer att ske på ungefär det sätt den gör idag.

Ett annat angreppssätt är att försöka finna statistiska fördelningar för olika komponenters livslängder. För vattenkraften är sannolikt statorlindningens livslängd mest intressant att prediktera, eftersom den är en sådan kritisk komponent. Då antalet havererade statorlindningar är lågt, kan det vara befogat att använda Bayesianska metoder, där såväl faktiska livslängdsobservationer som subjektiva bedömningar beaktas. Problemet med att studera statistiska fördelningar är att de inte säger någonting om specifika aggregat. För att konkretisera detta kan det vara befogat med en liknelse. Om en läkare tar emot en sjuk patient, har han eller hon knappast så mycket nytta av människans livslängdsfördelning. En statorlindnings kondition är resultatet av en mycket komplex blandning av yttre påverkan och design, och är precis som en människas hälsa svår att prediktera. Detta förringar på inget sätt värdet av livslängdsfördelningar, varken för människor eller för vattenkraftskomponenter, men det visar vikten av att inte stirra sig blind på livslängdsfördelningar.

Problemen inom detta område är som synes flera. Dels finns en relativt stor tillgång på mätdata som inte analyserats på ett mera kvantitativt sätt, dels finns teoretiskt framtagna livslängdsfördelningar som saknar koppling till specifika statorlindningar. Utan att alltför

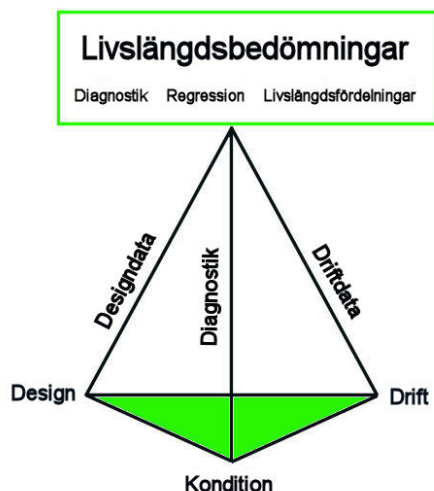
mycket gå händelserna i förväg, kan det vara på sin plats med några mycket överskådliga resonemang. Enligt internationell expertkunskap beror en statorlindnings livslängd dels på hur kraftstationen i fråga körts, dels på hur aggregatet designats. Statorlindningens nuvarande kondition är också avgörande för livslängden, då två identiskt designade statorlindningar kan åldras på helt skilda sätt, trots likartad drift. I dessa fall är det ofta svårt att utreda vad som orsakat de olika graderna av åldring. Det blir alltså uppenbart att problemen inte enbart handlar om ett teoretiskt kontra ett mera praktiskt perspektiv, utan även om hur väl olika typer av analyser kan täcka in drift, design och kondition. Det kan därför vara på sin plats att skissera två huvudproblem och två liknelser relaterade till dem. Huvudproblemen och liknelserna kommer att återkomma och utvecklas senare i rapporten. Den första liknelsen handlar om teori och praktik. Det kan vara lämpligt att se DSD-mätningarna och andra typer av mera praktiskt inriktade analyser som ett brofäste på en bro, medan brofästet på andra sidan kan sägas utgöras av den typ av modeller som ger teoretiska livslängdsfördelningar. Att bygga en fullständig bro mellan dessa brofästen är sannolikt svårt, men det bör gå att bygga något vid varje brofäste. Det bör också vara genomförbart att beakta flera synsätt samtidigt i revisionsarbetet. I så fall skulle ett slags lös koppling mellan teori och praktik kunna skapas. Den bristande kopplingen mellan mera praktiska och rent tekniska livslängdsbedömningar, har åtminstone delvis sin grund i att det är sällan samma personer eller ens samma avdelningar som arbetar med dessa olika angreppssätt. Problematiken framgår tydligt i figur 3.



Figur 3 – De två brofästena som illustrerar klyftan mellan de olika perspektiven.

Det andra huvudproblemet exemplifieras bäst genom det faktum att de teoretiskt uträknade livslängdsfördelningar saknar koppling till aggregatets drift, design och kondition, samtidigt som de mera praktiskt inriktade analyserna saknar teoretisk överbyggnad. Detta huvudproblem är emellertid mera generellt än så. Vikten av att låta den totala livslängdsbedömningen ta hänsyn till såväl drift och design som nuvarande kondition, är grundläggande oavsett vilka metoder som används. Detta kan liknas vid en tetraeder med olika metoder för livslängdsbedömning i toppen (se figur 4). Här ingår alltså alla metoder som över huvud taget kan vara av intresse, såväl rent teoretiska som mera praktiska. Figur 3 kan alltså sägas rymmas inom toppen (rektangeln) på denna tetraeder. Hörnen i tetraedern kan liknas vid drift, design och kondition. För att göra en fullständig analys av en statorlindnings livslängd måste som bekant alla dessa tre faktorer beaktas. Olika metoder tar hänsyn till olika

hörn i tetraedern. Vissa tar hänsyn till fler, medan andra tar hänsyn till färre. Bristen på helhetssyn har dock varit stor. Att finna *en* metod som både är helt tillförlitlig och samtidigt täcker in hela problemområdet är sannolikt mycket svårt.



Figur 4 – Illustration av de viktiga faktorerna för en adekvat livslängdsbedömning.

Det finns emellertid andra problem, nämligen att teoretiska metoder som tas fram tenderar att förbli oanvända. Detta gäller sannolikt generellt och är därför något som bör utredas. Att ta fram modeller som inte används kan sägas utgöra en form av resursslöseri. Detta trots att ett examensarbete givetvis inte är någon större utgift för ett stort företag.

## 1.2 Forskningsläge – ur ett svenskt perspektiv

Ämnesområdet kring livslängdsbedömningar av statorlindningar karaktäriseras alltså av en brist på beröringspunkter mellan teoretiska modeller och analyser gjorda utifrån mätdata. Det vill säga att de teoretiska modeller som tas fram saknar koppling till verkliga data och dessutom ofta förblir oanvända. Samtidigt tas sällan mer praktiskt inriktad kunskap tillvara när teoretiska modeller utarbetas. För att få en översikt av forskningsläget kan det därför vara intressant att börja med den teoretiska sidan. Där finns bland annat examensarbetet *Ökad precision i bestämning av livslängdsfördelningar genom tillämpning av Bayesianska metoder – En utgångspunkt för erfarenhetsåterföring inom Vattenfall Vattenkraft*, som utfördes 2003-2004 på Swedpower med Anna Gabrielsson (då Holmgren), vid Institutionen för elektrotekniska system på KTH, som författare. (Holmgren, 2004) Kärnan i detta examensarbete är en algoritm för definiering av livslängdsfördelningar för komponenter inom vattenkraften. Eftersom de flesta betydelsefulla komponenter i ett vattenkraftverk har låga felintensiteter, är mängden livslängdsdata begränsad. På grund av detta valde Anna Gabrielsson att använda Bayesianska metoder, som fungerar på så sätt att subjektiva bedömningar kan kompensera bristfällig statistik vid definiering av livslängdsfördelningar. I en pilotstudie valde sedan samma författare att tillämpa sin algoritm på komponenten statorlindning. Resultat från studien bekräftar i mångt och mycket tidigare kunskap om statorlindningars livslängder (Holmgren, 2005). Se även avsnitt 4.3.

Två studier som ligger något närmare det praktiska är Fredrik Backlunds (2003) doktorsavhandling *Managing the Introduction of Reliability-Centred Maintenance, RCM*, samt samma författares (1997) examensarbete *Risikanalys för underhåll*. I

doktorsavhandlingen ligger fokus på att studera införandet av RCM i svenska vattenkraftsorganisationer, medan examensarbetet beskriver ett antal olika metoder för riskanalys, samt hur de används i praktiken. Begreppet RCM kan behöva en förklaring. Det handlar om systematiska metoder för att hantera risker och basera underhållsarbetet på dessa. RCM utvecklades inom flygindustrin på 1970-talet och har sedan spridit sig till fler branscher, bland annat till vattenkraftindustrin.

På den andra sidan av ämnesområdet finns de praktiska mätningar som görs på vattenkraftaggregaten. Exempel på dessa är den redan nämnda dielektriska statordiagnostiken (DSD). Resultaten från DSD finns inom Swedpower bokförda i en databas och utgör underlag för revisionsbeslut. Någon större systematisk och kvantitativ analys av dessa databaser har inte gjorts, utan beslut om revision eller inte, tas från fall till fall. I samband med en uppdatering av DSD-databasen togs dock vissa steg i den här riktningen. Bland annat gjordes försök att förutsäga värdet på vissa mätdata ett valt antal år framåt i tiden och att vikta ihop olika mätvärden för att kunna jämföra olika aggregat med varandra och betygsätta dem (Hägglund & Karlsson, 2003).

Utöver detta finns några examensarbeten och rapporter, som berör reinvesteringar inom vattenkraften, men som inte direkt kan hänföras till vare sig det teoretiska eller det praktiska lägret. I mitten av 1990-talet skrev Erik Nyström och Krister Ståhl examensarbetet *Arbetsmetodik vid investeringsbedömningar hos Vattenfall Vattenkraft produktionsenhet Lule älv* (Nyström & Ståhl, 1995), där de bland annat gav förslag på genomsnittlig årlig förnyelsenivå för Vattenfalls vattenkraftverk i Luleälven. Författarna definierade förnyelsenivå som den summa pengar som måste användas till reinvesteringar i syfte att återställa produktionsenheterna i ursprungligt skick. Det handlar alltså om den nivå underhåll, reparationer, revisioner, med mera, måste ligga på, för att bibehålla statusen på de undersökta vattenkraftverken. Deras examensarbete tog även upp den då rådande arbetsmetodiken för investeringsbedömningar och gav förslag på förbättringar. Det handlade mer eller mindre om förbättringar på detaljnivå och har knappast någon relevans i denna övergripande genomgång av ämnesområdet. Viktigare är författarnas slutsats att Vattenfall Vattenkraft produktionsenhet Lule älv skulle kunna reducera sin årliga förnyelsenivå från omkring 320 miljoner kronor till cirka 160 miljoner kronor. Som tidigare konstateras, blev underhållet av vattenkraftverken inom Vattenfall under 1990-talet alltmer styrt av ekonomiska snarare än tekniska hänsyn. Det är möjligt att Nyström & Ståhl, åtminstone till någon del, påverkat utvecklingen i den riktningen. Detta gör deras examensarbete intressant ur ett STS-perspektiv, eftersom det tydliggör samspelet mellan teknik och samhälle.

En annan rapport som bör lyftas fram är Lars R Nilssons *Svensk vattenkraft ur ett europeiskt perspektiv – några exempel*, som diskuterar de grundläggande driftsändringar som genomförts eller kommer att genomföras inom svensk vattenkraft. Återigen handlar det om den alltmer marknadsekonomiska synen på vattenkraften, men ur ett driftsperspektiv istället för ett underhållsperspektiv. Som redan nämnts körs fler och fler vattenkraftaggregat intermittent, vilket möjliggör större intäkter för vattenkraftsproducenterna, men samtidigt leder till en ökad förslitning av framförallt äldre vattenkraftsaggregat, som inte är anpassade för detta. Enligt Lars R Nilsson kommer vattenkraften i framtiden främst drivas på vardagar mellan klockan 8.00 och 16.00, då elpriserna är som högst. Det är alltså frågan om en kraftig förskjutning bort från den traditionella årshushållningen till en dygnsbaserad hushållning. Med andra ord anpassas driften efter dygnsmässiga prisvariationer, istället för de skillnader i pris och behov som årstiderna ger upphov till (Nilsson, 2005).

Med klyftan mellan teori och praktik inom vattenkraften i minne, kan det vara befogat att vidga vyerna något och se vad som gjorts mera generellt, utanför vattenkraften. Den tvärvetenskapliga disciplin som behandlar denna kombination av teknik, management, ekonomi, med mera, kallas teroteknik eller teroteknologi. Namnet systemekonomi förekommer också. Idén med terotekniken är att studera de mest väsentliga tekniska och ekonomiska frågeställningarna inom ett företags ramar, för att på ett kostnadseffektivt sätt ständigt förbättra sina tillgångar. I Sverige bedrivs forskning inom systemekonomi (teroteknologi) vid Växjö universitet (Växjö universitet, 2005). Ett verk som kan nämnas inom detta område är Alsyoufs (2004) *Cost effective maintenance for competitive advantages*.

Som synes finns en hel del forskning inom ämnesområdet. Först och främst finns den teoretiska forskningen, där de Bayesianiska livslängdsfördelningar Anna Gabrielsson tagit fram, utgör en viktig del. Vidare ger Fredrik Backlunds forskning viktiga insikter om användandet av riskanalys vid beslut om underhåll av vattenkraftverk. På den praktiska sidan finns arbeten som gjorts inom exempelvis Swedpower. Problemet är avståndet mellan teori och praktik. De teoretiska arbetena har svag koppling till verkliga mätdata, medan de praktiska undersökningarna till stor del handlar om att mera erfarenhetsmässigt tolka mätdata. Detta examensarbete är tänkt att fungera som en bro mellan teori och praktik, eller kanske snarare ett slags tillämpning av såväl teoretiska som mera praktiska verktyg till ett integrerat koncept. De nya rön som framkommer i detta examensarbete kommer givetvis också inkluderas i konceptet. Inte heller de mer samhällsvetenskapliga studierna av Erik Nyström och Krister Ståhl respektive Lars R Nilsson, förmår att överbrygga klyftan mellan teori och praktik, då de inte har mätdata från vattenkraftaggregaten som utgångspunkt.

### 1.3 Syfte

För att beskriva syftet med detta examensarbete kan det vara på sin plats att ta upp de två huvudproblemen från problemformuleringen. Det första huvudproblemet handlade om den bristande kontakten mellan teoretiska och mera praktiska metoder för bestämning av statorlindningars livslängder. Detta illustrerades med en bro (se figur 3). Att försöka minska gapet mellan dessa två grupper av analysverktyg är därför ett av syftena med detta examensarbete. Som redan antytts är detta sannolikt aldrig helt genomförbart, eftersom varje ny metod tenderar att ha både för- och nackdelar. Tanken är dock att reducera avståndet mellan de analysmetoder som härrör från faktiska mätdata och de som i princip helt bygger på teoretiska resonemang. Ett annat sätt att minska gapet mellan teori och praktik kan vara att på ett eller annat sätt implementera teoretiska livslängdsfördelningar i revisionsarbetet på Swedpower. Det är också av intresse att finna nya tillämpningsområden för den algoritm med tillhörande livslängdsfördelningar som tidigare presenterats. Givetvis kan det även handla om att gå i den motsatta riktningen, exempelvis genom att med hjälp av en kvantitativ metod analysera data, med andra ord att gå från ett slags praktik till teori. Detta kan till exempel göras med hjälp av multipel regressionsanalys, vilket kan ses som ett sätt att utgå från det mera praktiska brofästet och bygga i riktning mot det rent teoretiska.

Det andra huvudproblemet kan alltså liknas vid att bedömningen av en statorlindnings livslängd bör vila på tre ben: statorlindningens design, hur aggregatet körs, samt statorlindningens kondition. Detta illustrerades i figur 4. Olika modeller vilar på olika ben. DSD-mätningarna ger exempelvis värdefulla svar på frågor om statorlindningens kondition, men tar inte hänsyn till vare sig design eller drift. Dock är det viktigt att påpeka att information om design och drift också finns tillgänglig, åtminstone i viss utsträckning. Ett problem är dock att driftdata ofta inte samlats på ett systematiskt sätt, vilket gör det mycket

arbetskrävande att få fram hur ett aggregat körts. När det gäller de mera praktiskt inriktade analyserna finns alltså sätt att kontrollera alla tre ben i tetraedern, även om statorlindningens kondition är det som oftast ligger i fokus. Hittills har det dock inte funnits någon rent teoretisk modell som över huvud taget lyckas anknyta till något av dessa tänkta ben. Här kommer den multipla regressionsanalysen in, vilken skulle kunna fungera som teoretisk överbyggnad för de observationer som görs vid hörnen i tetraederns bas. Sett genom liknelsen med de två brofästena (figur 3) kan den multipla regressionsanalysen sägas bygga en bro från det mera praktiska perspektivet till det teoretiska, samt skapa ett analysverktyg som vilar på alla tetraederns ben.

För att göra så bra livslängdsbedömningar som möjligt, är det dock viktigt att skapa många analysverktyg. Därför är ett annat syfte med detta examensarbete att skapa ett användbart koncept som inkluderar flera metoder. Alla metoder har ju som bekant sina fel och brister, vilket gör att de alla ses som mer eller mindre grova approximationer. Att hitta en universell metod är alltså knappast möjligt. Ett vanligt problem i många sammanhang är att de avancerade metoder som tas fram förblir oanvända. Detta är en uppenbar risk även när det handlar om livslängdsbedömningar av statorlindningar. Att fästa vikt vid den här typen av frågor är viktigt och ligger väl i linje med tankarna bakom civilingenjörsprogrammet System i teknik och samhälle (STS). Ett av syften med detta examensarbete är därför att undersöka vad som kan göras för att minimera risken för att metoder förblir oanvända.

Utöver dessa mera konkreta syften finns en mer övergripande vilja att samla ihop alla de lösa trådar som olika analysmetoder kan sägas utgöra. Detta inkluderar givetvis den multipla regressionsanalys som framförs i detta examensarbete. Tanken med detta examensarbete är därför också att på något sätt göra bokslut för det som varit och ge riktlinjer för fortsatt arbete. Detta kan dels röra sig om att implementera det koncept som anförs i rapporten, men det också mera vetenskapliga problemställningar, som tas upp i kapitel 8.

## 1.4 Frågeställningar

- Är det möjligt att utifrån data från statorlindningens design, aggregatet drift, samt statorlindningens kondition prediktera en statorlindnings livslängd?
- Är multipel regressionsanalys ett användbart verktyg för detta ändamål?
- Vad ger den multipla regressionsanalysen för resultat?
- Är det möjligt att se vilka data som har störst betydelse för en statorlindnings livslängd?
- För vilka *andra* komponenter skulle Bayesianskt baserade livslängdsfördelningar kunna tänkas användas?
- Vad behövs för att framtagna metoder för livslängdsbedömningar skall användas vid revisionsbeslut?
- Hur skulle ett användbart koncept inkluderande flera olika analysmetoder kunna se ut?

## 1.5 Avgränsningar

Som redan framgått är statorlindningen i fokus för detta examensarbete. Detta på grund av dess kritiskhet och att den är en av få komponenter som noga övervakas med diagnostiska mätningar. När det gäller att finna nya tillämpningar till den ovannämnda algoritmen, är det givetvis andra komponenter som kommer på fråga. Denna del av examensarbetet har dock lite av kuriosakaraktär, men visar ändå att det finns en större bredd på undersökningen, trots att

fokus ligger på statorlindningen. Statorlindningen kan ändå ses som en tydlig avgränsning för examensarbetet.

En annan avgränsning är att de aggregat och statorlindningar som behandlas i detta examensarbete alla tillhör Vattenfall. Något enstaka undantag finns, men det handlar då om vattenkraftverk som tidigare ägts av Vattenfall. Anledningen till detta är att olika mätmetoder förekommer inom olika bolag, samt att all information inte är fritt tillgänglig. Det bör dock poängteras att mätvärden inom Vattenfall i andra sammanhang jämförts med vattenkraftverk i övriga världen. Utifrån detta går det att dra slutsatsen, att det som gäller för ett aggregat inom Vattenfall, åtminstone i viss utsträckning, även gäller inom andra företag.

Den multipla regressionsanalysen kan också sägas vara en avgränsning, även om examensarbetet snuddar vid andra matematiska metoder som Partial Least Square (PLS) och principalkomponentanalys (PCA). Detta kommer att diskuteras mera ingående nedan. Floran av regressionsmetoder är dock stor och det skulle krävas en helt annan inriktning på examensarbetet, om fokus skulle ligga på matematisk teoriprövning. Lite annorlunda uttryckt, kan valet av multipel regressionsanalys givetvis diskuteras, men det kan också valet av varje annan regressionsmetod. I ett examensarbete av denna art, är det tvunget att under arbetets gång välja en metod, dels av tydlighetsskäl, dels på grund av den ansevärd mängd metoder som i annat fall måste gås igenom, för att få en total bild av situationen. Viktigaste anledningen till att bara en metod, multipel regressionsanalys, använts, är dock att antalet observationer är så lågt. Eventuella skakigheter i analysen beror alltså i mycket högre grad på för få observationer, än på valet av matematisk metod.

Till en del kan också de asfaltisolerade statorlindningarna ses som en avgränsning för examensarbetet, eftersom mer avancerad matematisk behandling, till exempel multipel regressionsanalys, inte går att tillämpa på epoxiisolerade statorlindningar. Detta hänger givetvis samman med att antalet epoxiisolerade statorlindningar som uppnått teknisk livslängd är nära nog obefintligt. Generellt kan dock sägas att en asfaltisolerad statorlindning har sämre hållbarhet än en äldre epoxiisolerad statorlindning, som i sin tur är sämre än nyare epoxiisolerade statorlindningar. Asfaltisolerade statorlindningar tillverkades fram till 1960-talet, medan brytpunkten mellan äldre och yngre epoxiisolerade statorlindningar approximativt kan sättas till 1980. I realiteten kom givetvis förbättringarna stegvis (Holmgren, 2005).

## 1.6 Källmaterial

Det källmaterial som används för detta examensarbete är främst olika typer av databaser och förteckningar över vattenkraftsaggregat. Den kanske viktigaste är DSD-databasen som utgör en viktig grund för revisionsarbetet inom Swedpower och Vattenfall. Utan att fördjupa sig alltför mycket i denna databas, kan det vara intressant att visa vilka data som fås fram vid DSD-mätningar. Ett av mätvärdena är isolationsresistansen [ $M\Omega$ ]. Ett lågt värde på isolationsresistansen är ett tecken på antingen stora isolationsskador eller kraftig nedsmutsning. I detta fall är alltså ett högre värde bättre än ett sämre. Nästa grupp av värden visar förlustfaktorn och kallas  $\tan \delta$  respektive  $\Delta \tan \delta$ , där det senare syftar på ökningen i förlustfaktor då det pålagda elektriska fältet ökar. Rent generellt visar förlustfaktorn förhållandet mellan förlustström och kapacitiv ström genom isolationen. Värdet avslöjar en hel del om statorlindningens kondition och ett lågt värde är bättre än ett högre. Därefter kommer mätningen av kapacitansen [ $nF$ ], som har en liknande innebörd som förlustfaktorn. Nästa mätvärde är de partiella urladdningarna [ $nC$ ], som mäter styrkan i de partiella

urladdningarna. Även här är ett lågt värde bättre än ett högt. Också antalet partiella urladdningar är av intresse. Många och kraftiga partiella urladdningar är ett tecken på att statorlindningens kondition i vissa avseende är bristfällig. Dessutom mäts temperaturen [°C] och ett hipot-test genomförs. Detta test resulterar i ett jordfel om det finns skador i isoleringen. Mätningarna i DSD-databasen utförs på olika faser och dessutom görs varje typ av test vid exempelvis olika spänningsnivåer. Mätvärdena för varje aggregat får därför ett matrisliknande utseende, se tabell 1.

Tabell 1 – Kraftigt beskuret utdrag ur DSD-databasen.

| STATION                   | AGG | TEST & DAT                       | REK.<br>[ÅR] | NY<br>DSD | FAS  | Temp<br>(°C) | ISOLATIONSRESISTANS (MΩ) |        |            |        |      |
|---------------------------|-----|----------------------------------|--------------|-----------|------|--------------|--------------------------|--------|------------|--------|------|
|                           |     |                                  |              |           |      |              | O-KOMP.                  |        | TEMP-KOMP. |        | P.I. |
|                           |     |                                  |              |           |      |              | 1 Min                    | 10 Min | 1 Min      | 10 Min |      |
| <a href="#">STATION X</a> | G1  | <a href="#">DSD 960507</a>       |              |           | U    | -            | 2 840                    | 16 700 | -          | -      | 5,88 |
|                           |     |                                  |              |           | V    | -            | 2 720                    | 16 500 | -          | -      | 6,07 |
|                           |     |                                  |              |           | W    | -            | 2 660                    | 16 000 | -          | -      | 6,02 |
|                           |     |                                  |              |           | Alla | -            | 1 310                    | 9 000  | -          | -      | 6,87 |
| <a href="#">STATION X</a> | G1  | <a href="#">DSD 001024</a>       | 2            | 2002      | U    | -            | 1 950                    | 10 500 | 312        | 1 679  | 5,38 |
|                           |     |                                  |              |           | V    | -            | 1 720                    | 9 950  | 272        | 1 571  | 5,78 |
|                           |     |                                  |              |           | W    | -            | 1 740                    | 9 950  | 288        | 1 646  | 5,72 |
|                           |     |                                  |              |           | Alla | -            | 1 080                    | 7 750  | 174        | 1 248  | 7,18 |
| <a href="#">STATION Y</a> | -   | <a href="#">DSD<br/>05-04-21</a> |              |           | U    | 17,53        | 3 300                    | 20 000 | 695        | 4 212  | 6,06 |
|                           |     |                                  |              |           | V    | 18,29        | 3 220                    | 19 500 | 715        | 4 330  | 6,06 |
|                           |     |                                  |              |           | W    | 17,78        | 3 200                    | 19 100 | 686        | 4 094  | 5,97 |
|                           |     |                                  |              |           | Alla | 17,86        | 1 560                    | 10 500 | 336        | 2 264  | 6,73 |

På motsvarande sätt hämtas information från de förteckningar som gjorts över kraftverkens driftsätt. I dessa framgår det till exempel hur många starter och stopp ett aggregat i genomsnitt har haft per år de senaste åren. Det finns i förteckningarna också information om den genomsnittliga totala drifttiden per år de senaste åren, samt vissa designparametrar. De senare finns också delvis i DSD-databasen. En viktig designparameter är den elektriska påkänningen [kV/mm].

## 1.7 Begreppsdefinitioner

För att sätta sig in i ett nytt ämnesområde är det viktigt att studera begreppsdefinitionerna inom området. För att inte förlänga de inledande avsnitten i rapporten alltför mycket, kan det dock vara bättre att placera en utförlig lista på relevanta begrepp bland bilagorna. Två mycket viktiga begrepp presenteras redan i detta avsnitt, men i övrigt hänvisas läsaren till bilaga 1.

- Vattenkraftverk – Detta syftar på hela anläggningen. En anläggning med fler än ett aggregat definieras ändå som ett vattenkraftverk.
- Aggregat – Ett aggregat är en uppsättning generator, turbin och så vidare. Med andra ord kan ett vattenkraftverk ha flera aggregat.

## 1.8 Paper till PMAPS

Utöver denna rapport lämnades i samband med examensarbetet in ett *paper* eller konferensbidrag till PMAPS-konferensen, som hålls på KTH i Stockholm 11–15 juni 2006. Konferensen kommer att behandla tillförlitlighetsfrågor inom olika energibranscher. Det mesta av innehållet i detta *paper* beskrivs i rapporten, men eventuella oklarheter i rapporten skulle möjligen kunna rätas ut med hjälp av konferensbidraget, som finns sist bland bilagorna.

I slutskedet av rapportskrivandet, blev det klart att konferensbidraget godkännts vid granskningen. I och med att det ursprungliga konferensbidraget färdigställdes flera månader innan examensarbetet blev klart, är konferensbidraget något avvikande vad gäller resultat och i viss mån även kvalitet. Detta har dock till stor del avhjälpits i och med de ändringar som krävts efter godkännandet. Då det fortfarande finns tid kvar till det slutliga inlämnandet av konferensbidraget, bör den bifogade versionen av detta inte ses som helt identisk med det *paper* som kommer att presenteras på konferensen. Givetvis har konferensbidraget ett annat format än rapporten. Formaliakraven för *paper* till denna konferens var strikta, vilket de vanligtvis är.

## 2 Bakgrund

I detta avsnitt kan det vara lämpligt att vidareutveckla resonemangen kring elsystemet i stort och statorlindningens plats i detta. Med andra ord är det viktigt att förtydliga statorlindningens betydelse för hela elsystemet. I dagens tekniskt mycket avancerade samhälle är tillgång på elektricitet helt avgörande. Medan kärnkraften är svårreglerad och därför producerar i princip samma mängd elektricitet oavsett efterfrågan, är vattenkraften mer flexibel och kan kopplas till och från momentant. Sedan introduktionen av kärnkraften, drivs därför vattenkraften allt mer intermittent. Ett vattenkraftsaggregat startas och stoppas ofta dagligen. En god tillgänglighet i elsystemet kräver givetvis också stabila elnät. Detta ligger dock helt utanför ramarna för examensarbetet. För att över huvud taget ha något elektricitet att leverera krävs dock elproduktion. I Sverige är elproduktionen i princip jämnt fördelad mellan vattenkraft och kärnkraft. Övrig elproduktion är jämförelsevis mycket liten. I fokus för detta examensarbete ligger vattenkraften, som på grund av sin flexibilitet är mycket fördelaktig, men som samtidigt är mycket beroende av god tillförlitlighet. Som redan nämnts är statorlindningen en kritisk komponent i ett vattenkraftsaggregat och kostnaderna för ett haveri är mycket stora, främst på grund av det längre produktionsbortfallet jämfört med ett planerat statorlindningsbyte. Det skulle inte vara helt obefogat att säga att ett välfungerande elsystem kräver tillförlitliga statorlindningar, samt att kraftbolagens ekonomi kräver tillförlitliga statorlindningar. Som redan antytts är det dock inte försvarbart att byta ut statorlindningar för tidigt.

Med tanke på den holistiska syn på teknik som framförs inom STS-programmet, kan det vara intressant att presentera ett mindre bakgrundsavsnitt. Vattenkraften är ett mycket tydligt exempel på ett sociotekniskt system, där teknik, ekonomi, miljöfrågor, med mera, tätt samverkar mer varandra. Rent hypotetiskt kan det vara befogat att fråga sig hur vattenkraften i Sverige skulle ha sett ut utan statlig inblandning, utan en miljöopinion som kritiserat utbyggnad av vissa älvar, och så vidare. Vattenkraften är ett mycket tydligt exempel på hur sociala faktorer påverkar teknikens utformning och utbredning. Vidare kan det vara intressant för läsaren att bekanta sig med de mest elementära grunderna för hur elektricitet genereras med hjälp av vattenkraft. Det vill säga att läsaren får ett smakprov på hur ett vattenkraftsaggregat fungerar. Av utrymmesskäl kan det dock vara befogat att lägga allt detta som bilagor. Dock kommer redan här en mycket kortfattad genomgång av den svenska elproducerande vattenkraftens historia, samt en lika summarisk beskrivning av ett vattenkraftverks funktion. För mer utförlig information, se bilaga 2 och bilaga 3.

### 2.1 Kortfattad beskrivning av vattenkraftens framväxt

I Sverige byggdes de första elsystemen i mitten av 1880-talet. Kraftproduktionen i dessa tidiga elsystem utgjordes till stor del av koleldade kraftverk. Distributionen skedde med likström vid låga spänningar, vilket medförde stora överföringsförluster. Detta innebar att de tidiga elsystemen hade mycket begränsad utsträckning, kanske till en stadskärna eller ett industriområde. Elsystemens lokala karaktär ledde till att de främst sågs som en angelägenhet för kommunala myndigheter eller industriföretag. Omkring sekelskiftet 1900 uppstod dock frågan vad staten skulle göra med de vattenfall som helt eller delvis var statligt ägda och som var möjliga att exploatera för vattenkraften. Från början var tanken att arrendera ut fallen, men på grund av de juridiska turerna kring moderniseringen av Trollhätte kanal, och byggandet av ett kraftverk i anslutning till denna, kom vissa förutsättningar att förändras. Den svenska staten gick nu för första gången in som vattenkraftbyggare och grunden till dagens Vattenfall var lagd. Det bör dock poängteras att de flesta vattenkraftverken, även i Sverige,

byggdes i privat regi. Utbyggnaden påskyndades i samband med Första världskriget, då det rådde fotogenbrist i Sverige (Kaijser, 1994).

Under en period som inleddes kring 1940 och var så gott som avslutad 1970 expanderade vattenkraften kraftigt i Sverige. Som nämnts tidigare har det dock sedan 1970-talen endast byggts några få vattenkraftverk i Sverige, vilket givetvis till största del har att göra med att riksdagen beslutat att genom lagstiftning skydda ett antal älvar och älvräckor. Detta har drastiskt minskat antalet platser, där vattenkraftsutbyggnad skulle vara möjlig (Energimyndigheten, 2005). Under 1990-talet avreglerades alltså elmarknaden. Detta kom delvis som ett svar på att elförbrukningen från 1980-talet och framåt stagnerat. Men viljan att avreglera hade också en bakgrund i en förändrad syn på infrasystemen i stort, ett synsätt som till stor del hade sin grund i politiska händelserna kring 1990: Berlinmurens fall, Sveriges kommande EU-medlemskap, etcetera. För att kunna hävda sig i konkurrensen på en fri marknad, måste Vattenfall bolagiseras och myndighetsrollen flyttas över till andra myndigheter, såsom Svenska Kraftnät. Bolagiseringen av Vattenfall skedde 1992 (Vattenfall, 2005c).

## 2.2 Kortfattad teknisk beskrivning av vattenkraftsaggregat.

Detta avsnitt behandlar mycket kortfattat de tekniska aspekterna på ett vattenkraftverk. En mer utförlig finns som redan nämnts i bilaga 3. Generellt sett är det viktigt att inse att vattenkraften är del i ett större elsystem, där olika former av kraftgenerering via ett mycket sammansatt elnät når slutkonsumenterna. När det mera specifik gäller vattenkraften, kan det först och främst sägas att all vattenkraft har sitt ursprung i solen. Solstrålningen avdunstar det vatten som finns på jordens yta och fördelar det i form av regn på olika platser med olika höjd över havet. Genom att vattnet strömmar från en högre nivå till en lägre, transformeras lägesenergin till rörelseenergi. Längs vattnets väg från bergen till havet finns vattenkraftverken och tar vara på den rörelseenergi som finns i vattnet. På sin väg genom ett vattenkraftsaggregat passerar vattnet en turbin. Något förenklat kan turbinen sägas vara hela det system vattnet strömmar igenom i ett vattenkraftsaggregat. Via olika typer av anordningar når vattnet löphjulet, en propellerliknande konstruktion som kan sägas vara turbinens kärna (Strand, 2003).

I fokus för detta examensarbete ligger dock statorlindningen, vilken som bekant är en del av statorn som i sin tur är en del av generatoren. Kopplingen mellan turbin och generator fungerar på så sätt att det roterande löphjulet via en turbinaxel driver generatoren som omvandlar vattnets rörelseenergi till elektrisk energi. Denna elektricitet transformeras sedan upp till en högre spänning och transporteras vidare ut på elnätet (Svensk Energi, 2005). En generator består av en rotor som är magnetiserad och roterar med turbinaxeln. Denna rotor inducerar en ström i statorlindningen, som är en del av generators stationära del, statorn. Mera precist är det i statorlindningens kopparkärna strömmen induceras. Därifrån leds strömmen till transformatorer som höjder spänningen och skickar ut strömmen på elnätet.

### 3 En statorlindnings åldrande

Generellt sett kan en generators åldrande ses som på varandra följande slumpmässiga processer som uppträder enligt en viss statistisk fördelning. Som en parentes kan det vara värt att nämna att det oftast rör sig om Weibull- eller normalfördelningar. En annan mera generell iakttagelse är att det inte gått att fastställa något orsakssamband mellan åldrande och belastning. Med andra ord är det fullt möjligt att två aggregat av samma typ och ålder uppnår vitt skilda livslängder, trots likartad belastning. Eftersom detta examensarbete handlar om statorlindningars livslängd, är det rimligt att göra en djupgående översikt när det gäller statorlindningens åldrande. En statorlindning kan åldras på flera sätt och åldrandet är naturligtvis till en del beroende på hur ett aggregat körs. Åldrandet ser med andra ord något annorlunda ut inom dagens marknadsekonomiskt inriktade vattenkraft än den gjorde under tidigare decennier. En viktig skillnad mellan dagens vattenkraft och gårdagens är givetvis den allt mer utbredda intermittenta driften (Storesund, 2004).

Medan rotor och rotorlindning främst åldras genom mekanisk belastning, åldras statorlindning, eller rättare sagt dess isolering, huvudsakligen till följd av elektrisk och kemisk belastning. Det kan vara värt att poängtera att statorlindningens åldrande i princip är synonymt med dess isolerings åldrande (Storesund, 2004). Denna isolering kan i olika aggregat bestå av olika material. I riktigt gamla maskiner förekommer schellack som isolermaterial, medan maskiner från 1900-talets mitt är isolerade med asfalt. Under senare delen av 1900-talet och även i dag används olika former av epoxi som isolermaterial.

En mycket vanlig typ av åldrande för statorlindningens isolering är den termiska åldringen, vilken anses vara den viktigaste orsaken till statorlindningshaveri. En annan betydelsefull typ av åldrande är elektrisk åldring. En tredje viktig typ av åldrande är mekanisk åldring, vilket i princip är ekvivalent med begreppet utmattning för metaller. Utöver dessa typer av åldrande, kan även den yttre miljön ge upphov till att statorlindningen åldras. Det kan då röra sig om sådant som fukt, kemikalier eller mekanisk nötning. Dock är det mer komplicerat än så. Olika åldringsfaktorer kan nämligen interagera med varandra, vilket avsevärt riskerar att försvåra bedömningen av en statorlindnings livslängd. Åldring är aldrig summan av de bidragande faktorerna. För att konkretisera detta kan det vara på sin plats med ett exempel: Intensiteten av elektrisk åldring beror ofta på temperaturen. En förändring av temperaturen kan antingen accelerera eller bromsa den elektriska åldringen (Storesund, 2004).

Rent generellt måste något sägas om transienter, eftersom de ofta är orsaken till haverier. En typ av transienter är de elektriska, som innebär extrema spänningstoppar i statorlindningen. Grovt sett kan de elektriska transienterna orsakas av antingen åska eller kortslutningar och medföljande jordfel. En annan typ är de termiska transienterna, det vill säga mycket höga temperaturer i statorlindningen. I de flesta fall handlar det om att kylsystemet slagits ut. Det finns också mekaniska transienter, även om dessa indirekt drabbar statorlindningen. Mekaniska transienter handlar istället om att komponenter i ett aggregat rent fysiskt skadas. Det kan handla om allt från att en skovel släpper från löphjulet till att ett armkors eller lager går sönder. Transienter är alltså en vanlig orsak till haveri, men haverier kan även uppstå som ett resultat av en längre åldringsprocess. Det är också viktigt att påpeka att åldring ökar risken för transienter, samt att en åldrad statorlindning har svårare att klara en transient när den väl inträffar.

### 3.1 Termisk åldring

Termisk åldring kan ha olika förlopp och se ut på olika sätt, men ofta handlar det om att värmen ger upphov till att de stora organiska molekylerna i isoleringen sönderdelas. Detta sker genom att den höga temperaturen ökar vibrationerna på molekylär nivå. Det som händer är alltså att långa polymerer ersätts av korta. Dessa korta polymerer är i sin tur mottagliga för syre, vilket är ekvivalent med att de lätt oxideras. Sett från en makroskopisk nivå blir isoleringen försvagad och spröd när dess polymerer förkortas och oxideras. Detta medför två olika typer av skador. Dels finns det risk att isoleringen helt enkelt spricker, dels riskerar isoleringen att släppa från ledaren. Både dessa skador leder ofta till kortslutningar (turn shorts), vilka ger upphov till kraftig upphettning och så småningom jordfel (Stone et al, 2004).

När det gäller isoleringars temperaturkänslighet finns olika klasser. Generellt kan sägas att äldre statorer är utrustade med isoleringar som är mindre värmebeständiga, medan nyare statorlindningar bättre tål höga temperaturer. Oavsett hur bra eller dålig statorlindningens isolering är, ökar den termiska åldringen med temperaturen. Med andra ord åldras isoleringen snabbare ju varmare det är i aggregatets generator. Den termiska åldringen bestäms alltså både av isoleringens egenskaper och av generatorns driftstemperatur. Det kan i detta sammanhang vara intressant att titta närmare på varför höga temperaturer uppstår i en generator. Överbelastning är en orsak till höga temperaturer, då temperaturen ökar med kvadraten på ökningen av strömstyrkan. En annan orsak till förhöjda temperaturer kan vara dålig design, exempelvis ett dåligt utformat kylsystem. Det är också vanligt att smuts ger upphov till förhöjda temperaturer, bland annat på grund av att kylsystemet kan täppas igen och därmed inte fungera tillfredställande (Stone et al, 2004).

Ett sätt att undersöka termisk åldring är att mäta kapacitansen över tiden och se om den förändras. En minskande kapacitans är ett tydligt tecken på fortskridande termisk åldring. På motsvarande sätt är det även möjligt att undersöka *power factor* och nivå på de partiella urladdningarna, glimningarna. Om dessa faktorer ökar, är det tydligt att även den termiska åldringsprocessen fortgår. Ett mera handgripligt sätt att detektera termisk åldring är att över tiden mäta statorlindningens temperatur. Om temperaturen vid likartade driftsförhållanden ökar med tiden, är det sannolikt frågan om att statorlindningen åldrats termiskt. En termiskt åldrad statorlindning kan inte förbättras på annat sätt än att den byts ut. Dock kan processen bromsas, genom att exempelvis göra ren statorlindningen (Stone et al, 2004). Det finns fler typer av felmekanismer rörande termisk åldring, men det som nämnts ovan kan anses vara det viktigaste. Figur 5 visar ett avsnitt av en kraftigt termiskt åldrad statorlindning.



*Figur 5 – Exempel på kraftig termisk åldring.*

### 3.2 Elektrisk åldring

Den främsta orsaken till elektrisk åldring är partiella urladdningar, eller glimningar som de oftast kallas. Dessa kan resultera i att kemiska skador uppstår genom att de partiella urladdningarna orsakar jonisering eller radikalbildning. Partiella urladdningar kan i sin tur ge upphov till sekundära urladdningar, som också riskerar att skada isoleringen. Även indirekta skador kan uppstå till följd av de partiella urladdningarna, eftersom de framkallar kväveoxider och ozon i luften. Vid reaktion mellan kväveoxider och fukt (vatten) bildas bland annat salpetersyra. Även ozonet skadar statorlindningens isolering på så sätt att det är kraftigt oxiderande (Storesund, 2004).

Det finns ett antal olika felmekanismer för den elektriska åldringen. Ett första exempel är att impregneringen eller packningen är tillverkad på ett felaktigt sätt. En statorlindning tillverkas vanligen på så sätt att ett slags papper läggs runt kopparkärnan, för att sedan impregneras. Utanpå statorlindningens yttre glimskydd görs dessutom en packning, som ser till att passformen i spåret är god. Båda dessa system kan dock vara bristfälligt utförda, vilket är problematiskt. Om impregneringen är dålig, kan det leda till dålig isolationsförmåga och höga temperaturer i statorlindningen. Detta gäller dock bara under förutsättning att impregneringen är mycket dålig. Ett vanligare problem är att de små luftfickor som den dåliga impregneringen medför, ger upphov till partiella urladdningar, vilket ju är ett exempel på elektrisk åldring (Stone et al, 2004).

En annan felmekanism rör glimskyddet. Det finns en risk, åtminstone för vissa typer av statorlindningar, att glimskyddet skadas på grund av oxidation. På vissa ställen kan det till och med gå så långt att glimskyddet helt försvinner. Dock är själva huvudisoleringen så pass beständig mot partiella urladdningar att det kan ta många decennier innan ett haveri inträffar. Oxidationen ökar också risken för dålig spårpassning och därmed mekanisk nötning, vilket är en mycket snabbare process än denna typ av elektrisk åldring. Det är bara i de fall spårpassningen åtgärdats, som elektrisk åldring av detta slag över tiden kan bli ett problem (Stone et al, 2004).

En liknande felmekanism förekommer på den del av härvan som ligger i gränsområdet mellan spården och änddelen. Här finns en speciell form av har glimskydd, som kallas grading. Detta har något andra egenskaper än resten av glimskyddet och fungerar som en övergång mellan ytskikt med olika elektriska egenskaper. Utan att gå in för mycket på det elektriska, är

huvudproblemet att denna grading kan tappa sin ledande förmåga och orsaka att aggregatet havererar. En viktig iakttagelse är att åldrad grading även ger en indikation på åldring av glimmskyddet i statorlindningens spårdel (Stone et al, 2004).

Till sist finns en felmekanism, som delvis skiljer sig från de andra inom elektrisk åldring. I detta fall är det spänningstoppar som är problemet. Dessa kan uppstå av flera skäl, exempelvis av blixtnedslag eller jordfel. Sammanfattningsvis kallas dessa elektriska transienter. Rent allmänt kan det sägas att transienter ofta är det som till slut slår ut en statorlindning. Figurerna 6 och 7 visar avsnitt av statorlindningar som drabbats av elektrisk åldring.



*Figur 6 – Exempel på kraftig yttre glimning.*



*Figur 7 – Exempel på omfattande inre glimningsskador.*

### 3.3 Mekanisk åldring

Mekanisk åldring är till sin natur besläktad med utmattning hos metaller. De flesta isolermaterial är uppbyggda av polymerer, det vill säga stora kedjeformade molekyler. När dessa på grund av utmattning klipps av, leder detta inte enbart till att materialet sönderdelas, utan även till att dess kemiska egenskaper förändras. Detta område är ännu inte utforskat på ett tillfredställande sätt, vilket innebär att det kan vara svårt att göra en djupare beskrivning av den mekaniska åldringen (Storesund, 2004). Dock beror det delvis beroende på vad som

definieras som mekanisk åldring. Mekanisk åldring kan också ges en vidare definition och inkludera olika former av mekaniska processer, som är skadliga för statorlindningen.

För att fortsätta beskrivningen av mekanisk åldring, kan det vara på sin plats att mera generellt redogöra för var denna typ av åldring sker. Givetvis förekommer mekanisk åldring överallt i statorlindningens isolering, men problemen är störst i gränsskikten. Ett exempel på sådana gränsskikt är kontakten mellan kopparn och huvudisoleringen. Andra viktiga gränsskikt är de mellan huvudisolering och glimskydd, samt mellan härvan och spåret. Antalet start och stopp anses ha en negativ inverkan på gränsskikten i statorlindningen. Det är alltså rimligt att anta att dagens sätt att köra aggregaten kan leda till ökade problem med mekanisk åldring.

Även för den mekaniska åldringen finns alltså ett antal felmekanismer. En vanlig sådan är dålig spårpassning, vilket innebär att delar av statorlindningen mer eller mindre lossnat från sina spår i statorn. I ett första steg vibrerar härvorna, även om glimskyddet fortfarande är intakt. Vibrationerna medför emellertid att temporära luftgap bildas mellan glimskyddet och statorplåten. I dessa luftgap uppstår potentialer, som leder till urladdningar då den vibrerande härvan kommer i kontakt med statorplåten. Detta sliter givetvis på glimskyddet, vilket nöts bort på delar av härvan. I just dessa punkter uppstår partiella urladdningar, glimningar, vilket är naturligt då huvudisoleringen exponerats. I detta fall leder alltså mekaniska åldringsprocesser till elektrisk åldring. Ännu mer komplext blir det av att dålig spårpassningen ofta beror på termisk cykling. Termisk åldring kan alltså övergå i mekanisk åldring som i sin tur kan övergå i elektrisk åldring (Stone et al, 2004).

En annan vanlig felmekanism inom kategorin mekanisk åldring, är vibrationer i härvändorna. Dessa vibrationer kan orsaka sprickor i isoleringen i den del av härvan som ligger precis utanför spåret, det vill säga i gränsområdet mellan spår delen av härvan och härvändan (Stone et al, 2004). Som nämnts i inledningen av detta stycke består denna typ av mekanisk åldring av något som närmast kan liknas vid utmattning hos metaller.

### 3.4 Yttre miljö-åldring

Utöver de typer av åldring som redan tagits upp finns en mer brokig samling åldringsfaktorer, som kan benämnas yttre miljö-åldring. Dessa uppkommer inte som ett resultat av själva driften i sig, utan orsakas av förhållanden i omgivningen. En vanlig orsak till yttre miljö-åldring är fukt. Denna fukt kan orsaka flera typer av skador, exempelvis genom att interagera med kväveoxider och bilda salpetersyra, vilket redan nämnts. Andra typer av yttre miljö-åldring uppkommer på grund av kemikalier eller mekaniskt nötande förhållanden. Ett mycket vanligt exempel på mekaniskt nötande är att partiklar, till exempel sand, blåses omkring i aggregatet via kylsystemet (Storesund, 2004).

Också för den yttre miljö-åldringen finns ett antal vanligt förekommande felmekanismer. Den första mekanismen gäller nötande partiklar. Dessa kan antingen vara sand, aska, glasfiber, eller andra små hårda partiklar. Partiklarna rör sig vanligen med hög hastighet med luften som kyler aggregatet. Fenomenet är vanligast vid härvändorna, men förekommer också på den del av härvorna som sitter i spåren. Nötningen kan vara mycket allvarlig och till och med orsaka så djupa skador att statorlindningens koppar blottläggs (Stone et al, 2004). Utöver de problem som finns med mekanisk nötning, är det mycket vanligt att en generator på olika sätt kontamineras av smuts. Denna smuts nöter inte direkt på statorlindningen, men innebär inte desto mindre problem som måste beaktas.

Nästa felmekanism hänger samman med att vissa material som använts i statorlindningar varit känsliga för kemikalier. Det gäller framför allt äldre typer av statorlindningar med asfalt som huvudisolering. Dessa riskerar att mjukna, svälla, samt förlora motståndskraften mot såväl elektriska som mekaniska påfrestningar, på grund av så pass ofarliga kemikalier som olja, vatten och andra lösningsmedel. När det gäller nyare statorlindningar med epoxiisolering, är läget bättre, även om långvarig exponering är skadlig också för epoxiisolerade statorlindningar (Stone et al, 2004).

## 4 Teori och metod

I detta kapitel är avsikten att beskriva de teorier och metoder som använts under arbetets gång. Som rubriken antyder rör det sig ofta om en sammansmältning mellan teori och metod. Examensarbetet är på det stora hela inte teoriprovande. Istället handlar det främst om användning av metoder, vilka dock oftast har ett teoretiskt innehåll.

### 4.1 Multipel regressionsanalys

Rent generellt handlar regressionsanalys om att skapa en funktion som bäst passar observerade data. Detta är enklast att illustrera med en enklare form av regressionsanalys, linjär regressionsanalys. Då gäller det att anpassa data till en linje:

$$y_{pred} = ax + b \quad (1)$$

Konstanterna  $a$  och  $b$  beräknas så att felet jämfört med observerade data blir så litet som möjligt. Felet kan exempelvis beräknas med hjälp av minsta kvadrat-metoden (Heath, 1997). Ett klassiskt exempel på linjär regressionsanalys är förhållandet mellan längd och vikt. Om de observerade vikterna kallas  $y$  [kg] och längderna  $x$  [cm], skapas först en tabell med vikter och längder:

$x$ : 180...  
 $y$ : 80...

När sedan den linjära regressionsanalysen är genomförd fås en ekvation liknande ekvation (1), men med den skillnaden att  $a$  och  $b$  fått numeriska värden. Nu är det alltså möjligt att sätta in värden på  $x$ , det vill säga längden, för att få en prediktion av vikten på en person med den längden. Observera skillnaden mellan  $y$  och  $y_{pred}$ . I det första fallet handlar det om viktobservationer, som används för att via linjär regressionsanalys skapa en ekvation, medan det i det andra fallet handlar om prediktioner av vikten. Denna prediktion kommer alltså av ekvationen den linjära regressionsanalysen skapat (Wikipedia, 2006a).

Multipel regressionsanalys fungerar på samma sätt, men med en viktig skillnad. Antalet  $x$ -variabler är fler. Istället för ett  $x$ , finns flera  $x$ -variabler eller parameter:  $x_1 \dots x_n$ . Även här handlar det om att skapa en funktion som bäst passar observerade data. Ekvationen får dock givetvis ett annat utseende:

$$y_{pred} = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b \quad (2)$$

För att förstå användningen av multipel regressionsanalys för statorlindningar, kan det vara intressant att titta på ett vardagligt exempel, den begagnade bilen. Om de observerade priserna kallas  $y$  [kr] och de andra parametrarna ( $x$ -variablerna) är milalen  $x_1$  [mil], effekterna  $x_2$  [hk] och åldrarna  $x_3$  [år] skapas en tabell (ursäkta avsteget från SI-enheterna):

$x_1$ : 14200...  
 $x_2$ : 122...  
 $x_3$ : 6...  
 $y$ : 96000...

När sedan den multipla regressionsanalysen är genomförd på denna tänkta tabell, fås en ekvation liknande ekvation (2) med  $n=3$ . Skillnaden är givetvis att  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  och  $b$  fått numeriska värden. Det är nu alltså möjligt att sätta in observerade värden på  $x_1$ ,  $x_2$  och  $x_3$ , det vill säga miltal, effekt och ålder, för att prediktera priset på en bil med dessa karakteristika. Observera även här skillnaden mellan  $y$  och  $y_{\text{pred}}$ . I det första fallet handlar det om prisobservationer, som ingår i den multipla regressionsanalysen, medan det i det andra fallet handlar om prediktioner av priset. Denna prediktion beräknas med den ekvation den multipla regressionsanalysen skapat.

En fråga som först måste klaras ut, är vad som egentligen avses med återstående teknisk livslängd. Detta är mycket viktigt eftersom den multipla regressionsanalysen i detta fall handlar om att få fram en ekvation genom vilken det är möjligt att prediktera den återstående livslängden för en vald statorlindning. Allt bygger med andra ord på att data från statorlindningar som av tekniska orsaker bytts ut genererar en ekvation som sedan kan användas på statorlindningar i drift. Data från statorlindningarna sätts alltså som  $x$ -variabler i den multipla regressionsanalysen, medan den återstående tekniska livslängden (från DSD-mätning till byte av statorlindning) sätts som  $y$ -variabel. Ur dessa data fås sedan, via multipel regressionsanalys, en ekvation liknande ekvation (2). Genom att sätta in värden på  $x$ -variablerna för en statorlindning i drift, kan dess återstående tekniska livslängd,  $y_{\text{pred}}$ , predikteras. Prediktionen syftar dock egentligen på när en statorlindning i drift är i ett så pass dåligt skick, att dess status (innefattande såväl den nuvarande konditionen, designen och driftsättet) är ekvivalent med statusen på de statorlindningar som bytts ut av tekniska skäl. I tekniska skäl ingår alltså både haverier och planerade statorlindningsbyten. I och med att antalet observationer är så lågt, måste en sådan sammanslagning göras. Det väcker dock en del frågor angående vad som egentligen predikteras. Det är alltså inte rimligt att se prediktionen som ett slags definitivt slutdatum för en statorlindning, utan det handlar hela tiden om risknivåer. Ett rimligt sett att se på saken, är att ju kortare predikterad återstående teknisk livslängd en statorlindning har, desto större är risken att transienter slår ut den. Detta beror dels på att risken för transienter ökar ju sämre en statorlindning är, men det beror också på att risken för haveri större när väl en transient inträffar.

Det finns ett stort antal olika regressionsmetoder. I detta examensarbete har den multipla regressionsanalysen använts, eller mer exakt direkt (vanlig) multipel regressionsanalys. Några andra varianter på multipel regressionsanalys testades, men de gav antingen i princip identiska resultat eller så klarade de inte av att lösa problemet, eftersom de krävde fler observationer. Därför valdes direkt multipel regressionsanalys. Detta examensarbete har inte ambitionen att vara teoriprovande ur matematisk synvinkel, därför behandlas inte dessa frågor mera ingående. Något kommer dock att sägas om PLS (som är en typ av multipel regressionsanalys) och PCA, men bara i syfte att jämföra med den multipla regressionsanalysen.

Den programvara som användes för den multipla regressionsanalysen var Winstat. Med all säkerhet har dock valet av programvara inte haft någon som helst inverkan på resultaten i undersökningen (Winstat, 2006). Mer djupgående analyser av såväl multipel regressionsanalys som PLS och PCA finns exempelvis i Geladi & Kowalski (1986). Detta har dock liten betydelse för detta examensarbete, eftersom det alltså inte gör anspråk på att vara teoriprovande. Multipel regressionsanalys används istället först och främst som en metod, för att få ett verktyg i syfte att bedöma statorlindningars livslängder.

För att ekvationen som fås genom en regressionsanalys skall vara tillförlitlig, krävs ett välgenomtänkt val av parametrar. Fokus ligger i nästkommande avsnitt på de parametrar som valts ut för den multipla regressionsanalysen. Den urvalsprocess som föregick valet av parametrar gjordes i nära samarbete med generatorexperterna på Swedpower i Älvkarleby. Parametrarna valdes utifrån tre kriterier: oberoende, påverkan och kvantifierbarhet. I en multipel regressionsanalys är det viktigt att parametrarna inte är linjärt beroende av varandra, eller åtminstone att de är så lite beroende av varandra som möjligt. Ett visst beroende finns i princip alltid mellan de parametrar som undersöks med hjälp av multipel regressionsanalys. Det är mycket svårt att tänka sig ett exempel med parametrar helt utan beroenden. Fallet med den begagnade bilen visar detta på ett mycket tydligt sätt. Problemet med linjärt beroende bör dock, av två skäl, inte överbetonas. Dels skulle den multipla regressionsanalysen helt kollapsa om linjära beroenden förekom, dels finns resultat utifrån som tyder på att linjära beroenden inte finns. Om nu linjära beroende inte föreligger, måste kriteriet påverkan uppfyllas. Parametrarna måste med andra ord ha en signifikant påverkan på statorlindningens livslängd. I annat fall skulle den konstanta termen bli mycket stor och ekvationen i princip intetsäggande.

#### **4.1.1 Förlustfaktorn**

Förlustfaktorn eller  $\tan \delta$  behandlades mycket kortfattat i avsnittet källmaterial. Det kan dock vara på sin plats med en något längre utläggning. Tanken bakom  $\tan \delta$  är att undersöka hur ett pålagt elektriskt fält växelverkar med ett dielektrikum, i detta fall ett isolermaterial i statorlindningen. Annorlunda uttryckt handlar det om att fastställa förhållandet mellan förlustströmmen och den kapacitiva strömmen genom isolationen. Istället för  $\tan \delta$ , kan det ibland vara intressant att titta på  $\Delta \tan \delta$ . Då handlar det istället om förändringen av förlustfaktorn i ett successivt allt starkare elektriskt fält. Denna ökning är också av intresse när det gäller att konditionsbestämma en statorlindning. Både när det gäller  $\tan \delta$  och  $\Delta \tan \delta$  är ett lågt värde bättre än ett högt. Ett högt  $\tan \delta$  eller högt  $\Delta \tan \delta$  är tydliga indikationer på att statorlindningens kondition är låg. I den multipla regressionsanalysen har parametern  $\Delta \tan \delta$  efter samråd med generatorexperterna på Swedpower.  $\Delta \tan \delta$  har enheten %.

#### **4.1.2 Partiella urladdningar**

Partiella urladdningar kallas ofta glimningar. Det engelska uttrycket är partial discharges, vilket förklarar benämningen PD-mätning, som ofta används på svenska. Dessa mätningar utgör en del av DSD-metodiken och i vissa kretsar anses de partiella urladdningarna vara den enda väsentliga parametern för att se en statorlindnings åldrande. Som redan beskrivits ovan har givetvis de partiella urladdningarna stor inverkan på en statorlindnings åldrande och ses som den viktigaste formen av elektrisk åldring. Att fästa alltför stor vikt vid partiella urladdningar, kan dock vara överilad. Det bör också poängteras att partiella urladdningar i denna undersökning inte syftar på antalet partiella urladdningar, utan på deras styrka. Denna styrka mäts i nC. Precis som i fallet med  $\tan \delta$  respektive  $\Delta \tan \delta$ , är ett högt värde på de partiella urladdningar, både vad gäller styrka och antal, tecken på att statorlindningens kondition är bristfällig.

#### **4.1.3 Drifftid**

Drifftiden är den tid aggregatet producerat elektricitet sedan kraftverket byggdes eller sedan statorlindningen senast byttes ut. När det gäller drifftiden finns en stor spridning mellan olika aggregat, dels på grund av varierade ålder på statorlindningen, dels beroende på hur mycket den körs per tidsenhet. Eftersom åldern kommer in som en annan parameter, är det rimligt att i fallet drifftid istället titta på drifftiden per år. Mera precist handlar det om den genomsnittliga

drifttiden per år under ett antal år. Drifttiden anges i timmar och även här handlar det i någon mening om att ett högre värde är sämre än ett lägre. En statorlindning åldras rimligtvis mer om den är mycket i drift. Detta kompliceras dock något i och med att antalet start och stopp också har en effekt på åldringen.

#### **4.1.4 Intermittent drift**

Under de senaste decennierna har intermittent drift av kraftverken blivit allt vanligare. Med detta menas att vattenkraftaggregaten med korta intervall startas och stoppas. Det är idag vanligt att aggregat dagligen skiftar mellan att vara i och ur drift. Givetvis får detta konsekvenser för en statorlindning, speciellt om den tillhör en äldre generation som inte är anpassad för intermittent drift. Enligt expertkunskap på Swedpower bör en start och ett stopp motsvara ungefär tio timmars kontinuerlig drift i fråga om åldring på en statorlindning. Graden av intermittent drift har i den multipla regressionsanalysen enheten antal och en start och ett stopp räknas tillsammans som en start och stopp. Liksom för de andra parametrarna är det i detta fall rimligt att anta att ett högre värde svarar mot en sämre kondition än ett lägre. Det är dessutom så att ett högre värde ökar risken för sämre konditionsutveckling över tiden. Jämför gärna med det ben i tetraedern som vilade på driften. Det handlar alltså inte enbart om den nuvarande konditionen, utan även om den framtida konditionen.

#### **4.1.5 Elektrisk påkänning**

Den elektriska påkänningen är en designparameter för statorlindningen. Det är nämligen så att detta bestäms i samband med att statorlindningen konstrueras. Mera precist är den elektriska påkänningen i detta examensarbete den genomsnittliga elektriska påkänningen, som definieras som medelvärdet av det elektriska fältet som pålagts på statorisoleringen. Höga fält eller med andra ord hög genomsnittlig elektrisk påkänning leder till laddningsinjektioner, vilket skapar partiella urladdningar och elektrisk åldring. För att uppnå lång teknisk livslängd är alltså låg elektrisk påkänning att föredra. Men låg elektrisk påkänning medför istället låg verkningsgraden, vilket givetvis inte är önskvärt.

#### **4.1.6 Ålder**

Parametern ålder fångar in flera olika faktorer. Det mest uppenbara är givetvis att statorlindningen åldras och delvis förlorar de egenskaper den haft vid tillverkningstillfället. En annan inte fullt så uppenbar faktor är att äldre statorlindningar tenderar att redan från början ha något sämre egenskaper. Precis som hos andra tekniska produkter har statorlindningarna hela tiden utvecklats. Detta gäller exempelvis hur väl de klarar av intermittent drift. Generellt sett innebär därför, av flera skäl, en högre ålder en sämre kondition på statorlindningen.

#### **4.1.7 Återstående livslängd**

Som y-variabel i den multipla regressionsanalysen används den återstående livslängden, eller mera korrekt den återstående tekniska livslängden. Denna definieras som den tid som gått från en DSD-mätning tills statorlindningen bytts ut av tekniska skäl. Dessa tekniska skäl kan vara haverier, men det kan också röra sig om att statorlindning bedömts vara uttjänt och därför bytts ut.

#### 4.1.8 Predikterad återstående livslängd

Den predikterade återstående livslängden är det svar som fås, då parametrarna för en statorlindning sätts i den ekvation som en multipel regressionsanalys givit. Den visar alltså det predikterade antalet år från observationstillfället (mät datumet) till uppnådd teknisk livslängd.

#### 4.1.9 Andra viktiga faktorer

En viktig beståndsdel i en statorlindning är isolersystemet. Detta syftar på det material som omgärdar ledaren i statorlindningen. En annan benämning på isolersystem är huvudisolering, eftersom partisoleringen (mellan parterna i ledaren) och glimskyddet (utanför huvudisoleringen) också kan sägas utgöra delar av statorlindningens isolering. Det är vanligt att dela upp vattenkraftaggregat efter vilket isolersystem (vilken huvudisolering) de har. I riktigt gamla vattenkraftaggregat användes bland annat schellack som isolermaterial, medan aggregat från mitten av 1900-talet ofta har isolersystem av asfalt. Under senare delen av 1900-talet och även idag används epoxi som huvudisolering. Eftersom så få epoxiisolerade statorlindningar bytts ut av tekniska skäl, är det ännu omöjligt att prediktera livslängden på dem med hjälp av matematiska modeller. Det krävs helt enkelt ett antal observationer för att det skall vara möjligt, ju fler observationer desto bättre. Emellertid går det delvis att gå runt problemet. Detta kan göras genom att titta på hur en viss epoxiisolerad statorlindning avviker från ett slags genomsnittligt epoxiisolerad statorlindning. Å andra sidan finns problem även med detta angreppssätt. Detta kommer att behandlas mera ingående nedan.

Ett vattenkraftverk kan byggas på olika sätt. I Sverige dominerar underjordsstationerna, det vill säga kraftverk där aggregaten är placerade i ett bergrum några tiotal meter ner i marken. Andra kraftverk är så kallade ovanjordstationer, där aggregaten är placerade i en byggnad. Givetvis finns skillnader i driftsmiljö beroende på om aggregaten är placerade ovan eller under jord. Detta kan röra sig om såväl temperatur som fuktighet och påverkar givetvis statorlindningarnas åldrande. En mer udda form av vattenkraftverk kallas bulb, vilken kan liknas vid en u-båt innehållande en generator, som i sin tur givetvis innehåller en statorlindning. Turbinen finns däremot i det strömmande vattnet utanför bulben. Driftmiljön i bulbens innandöme är i vissa avseende ganska extrem jämfört med andra kraftverk, eftersom så mycket kondens bildas. Detta har givetvis en stor inverkan på statorlindningens kondition. Andra faktorer som kan tänkas påverka statorlindningens livslängd är sådant som plåtkärnans utformning eller trycksystemet. Listan på möjliga parametrar kan göras mycket lång, men som redan nämnts måste hänsyn tas till eventuella linjära beroenden, kvantifierbarhet och givetvis måste parametern även antas ha en signifikant påverkan på statorlindningens livslängd. En annan sak som måste beaktas, är att det finns risk för att en multipel regressionsanalys eller liknande med för många parametrar får en för god följsamhet med observationerna. Det innebär med andra ord att den framtagna ekvationen inte skulle prediktera den återstående livslängden på andra statorlindningar särskilt väl. Med allt detta i åtanke, valdes därför parametrarna på det sätt som beskrivits ovan.

#### 4.1.10 Validitet och reliabilitet för multipel regressionsanalys

Eftersom begreppet *validitet* i fortsättningen kommer att skifta något i betydelse beroende på sammanhanget, kan det vara på sin plats med några resonemang kring begreppet. Rent generellt menas med validitet *förmåga att mäta det man vill mäta*. Det kommer längre fram visa sig att multipel regressionsanalys i de flesta fall, har en riktigt hyfsad validitet, då den på ett bra sätt lyckas pricka in dåliga statorlindningar som dåliga och bra statorlindningar som bra. Å andra sidan används begreppet validitet, eller snarare sidoförmen *validering*, när det handlar om att testa hur bra utfallen från den multipla regressionsanalysen stämmer överens med

verkliga återstående livslängder. Denna användning av begreppet validering verkar vara praxis inom den här typen av undersökningar, även om det i princip undersöker både *validitet* och *reliabilitet*. Reliabilitet syftar på en metods tillförlitlighet. Då diskussioner om validitet och reliabilitet är centrala för utvärderingen av den multipla regressionsanalysen, är detta en fråga som kommer att återkomma längre fram i rapporten.

## 4.2 PLS och PCA – exempel på andra modelleringsmetoder

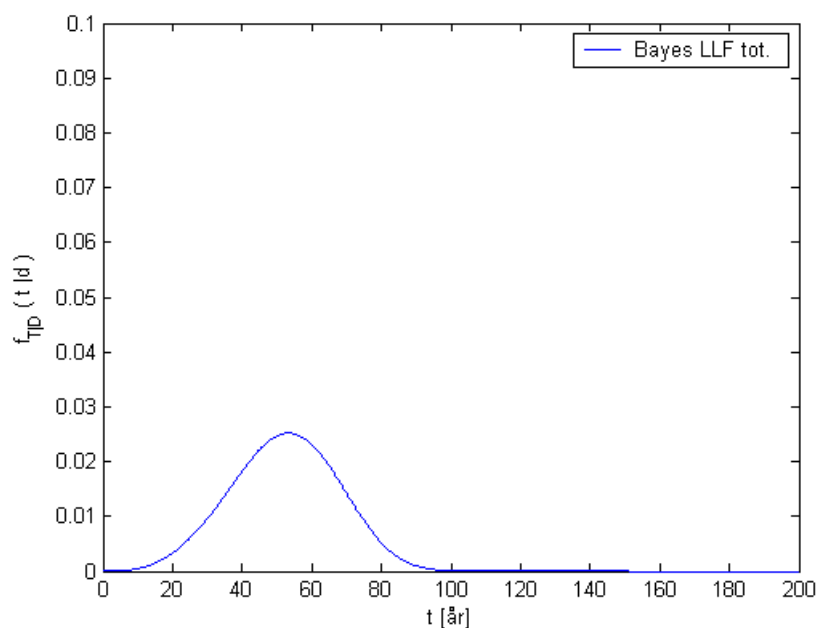
Det finns, som redan antytts, flera typer av multipel regressionsanalys. Av de skäl som anförts ovan, har den direkta (vanliga) multipla regressionsanalysen valts. Det finns också andra regressionsmetoder. Partial Least Square (PLS) är en sådan metod, som har en viktig fördel gentemot den multipla regressionsanalysen, nämligen att den klarar av att hantera linjära beroenden mellan parametrarna i analysen. Å andra sidan skulle linjära beroenden i en multipel regressionsanalys förorsaka så stora fel, att det skulle bli uppenbart att något inte stod rätt till. PLS ingår inte i detta examensarbete, men resultaten från en sådan analys har blivit tillgänglig via examensarbetets ämnesgranskare, Bengt Carlsson. Att låstas som att dessa resultat inte finns, är inte heller rimligt, trots att examensarbetet avgränsats till multipel regressionsanalys. I avsnitt 5.1.3 jämförs därför tillförlitligheten hos PLS jämfört med multipel regressionsanalys. Principalkomponentanalys (PCA) är istället ett sätt att se om beroenden finns. Även en sådan analys har blivit tillgänglig, men eftersom den utförts utanför examensarbetet, kan den inte ses som en del av detta. Det kan dock sägas att det i denna PCA inte finns något som tyder på linjära beroenden. Om tidsramarna varit annorlunda och framför allt om mängden data varit större, hade det möjligen varit intressant att titta närmare på PCA. Även PLS skulle vara intressantare att studera om observationerna varit fler. Jämförelser mellan olika regressionsmetoder skulle i ett sådant fall vara mer meningsfulla. För mer information om detta hänvisas läsaren till Geladi & Kowalski (1986) eller någon manual för Matlab-applikationer med detta innehåll. Se också fortsatta diskussioner i kapitel 8.

## 4.3 Bayesianiska livslängdsfördelningar

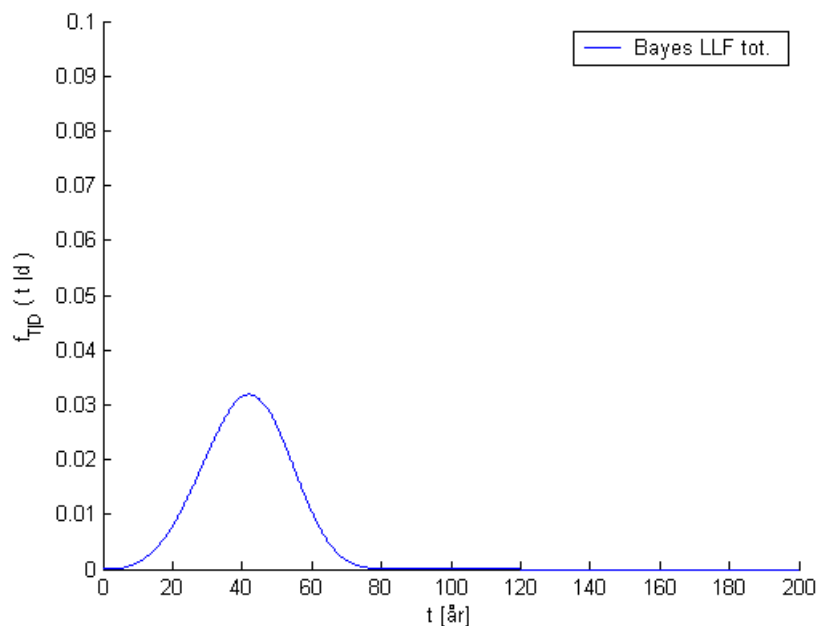
Ett annat sätt att göra livslängdsbedömningar, är att arbeta med Bayesianiska metoder, som kombinerar verkliga observationer med subjektiva bedömningar. Dessa subjektiva bedömningar är konfidensintervall för livslängden för olika komponenter och har satts av experter inom det område man valt att studera. Själva framtagandet av livslängdsfördelningarna görs med hjälp av en algoritm. Exakt hur denna algoritm är utformad, är inte möjligt att utveckla inom ramen för detta examensarbete. Den övergripande tanken bakom algoritmen, och Bayesianisk metodik i allmänhet, är i alla fall att låta subjektiva bedömningar kompensera för fåtaliga observationer (Holmgren, 2005). Rent praktiskt är algoritmen implementerad i ett Matlab-program och skulle kunna tillämpas på andra komponenter än statorlindningen. För att anknyta till människans livslängd, skulle algoritmen kunna tillämpas på en liten population människor. Forskare skulle även i detta fall kunna göra kvalificerade subjektiva bedömningar av livslängden. Detta skulle sedan kunna kombineras med de fåtaliga observationerna av livslängder i populationen, för att få tämligen tillförlitliga livslängdsfördelningar.

I pilotstudien av Holmgren (2005) finns ett mera praktiskt perspektiv, där algoritmen tillämpas på statorlindningar inom Vattenfall Vattenkraft. Det kan i detta läge vara intressant att påminna sig om illustrationen av två brofästen. Denna pilotstudie tar nämligen vissa steg i byggandet av bron från det teoretiska brofästet i riktning mot det praktiska. Efter att ha intervjuat Anna Gabrielsson (2005-09-21) stod det klart att mycket lite kan göras för att ytterligare förflytta algoritmen i praktisk riktning. Rent hypotetiskt hade det varit intressant att

studera om det exempelvis skulle gå att inkludera mätdata i algoritmen. Dock visade det sig alltså att algoritmen i princip nått vägs ände i detta avseende. Det kan dock inte helt uteslutas att vissa steg kan tas i denna riktning under förutsättning att en mycket djupgående matematisk undersökning genomförs. Algoritmen och dess livslängdsfördelningar är dock långt ifrån oanvändbara. Tvärtom kan de vara ett viktigt verktyg för livslängdsbedömning av statorlindningar. I pilotstudien delas statorlindningarna upp i grupper beroende på deras isolermaterial, nämligen: asfalt, epoxi 1 och epoxi 2, där epoxi 1 avser epoxiisolerade statorlindningar tillverkade före 1980, medan epoxi 2 syftar på epoxiisolerade statorlindningar producerade från och med 1980. Grupperna av statorlindningar kan med andra ord ses som typer av komponenter. I och med att ingen statorlindning i den sistnämnda gruppen bytts ut av tekniska skäl, kunde reella livslängdsfördelningar endast tas fram för gruppen asfalt och gruppen epoxi 1. Figurerna 8 och 9 visar de livslängdsfördelningar som fått för gruppen asfalt respektive gruppen epoxi 1.



Figur 8 – Livslängdsfördelning för asfaltisolerade statorlindningar.



Figur 9 – Livslängdsfördelning för epoxiisolerade statorlindningar.

Självklart är dessa livslängdsfördelningar ganska grova, vilket är naturligt eftersom statorlindningar med olika drifhistorik, olika design, samt olika grad av faktisk åldring, klumpats ihop i tre grupper. Parallellen med livslängdsfördelningar för människor är slående. Istället för uppdelning beroende på isolermaterial, kan människor exempelvis vara uppdelade på länder, kön, eller någonting annat. Här inses mycket av problemet med detta Bayesianska angreppssätt, nämligen att den praktiska nyttan är begränsad. Om de ingenjörer som arbetar på Swedpower liknas vid läkare, är det egentligen en helt annan typ av information de är intresserade av. För att uttrycka det annorlunda, kan denna algoritm sägas sakna kontakt med basen i den tänkta tetraedern. Ett annat sätt att uttrycka det, är att algoritmen inte vilar på något av tetraederns ben. Varken drift, design, eller nuvarande kondition beaktas alltså i algoritmen. Det enda ben i tetraedern som algoritmen möjligen vilar på, är det som innehåller statorlindningens design. Detta eftersom statorlindningarna trots allt är uppdelade efter isolermaterial. Det som tagits upp ovan kan tolkas som kritik av livslängdsfördelningarna och den Bayesianska metodik de bygger på. Så är dock inte riktigt fallet, eftersom de mycket väl kan fungera som ett komplement till inspektioner, DSD-mätningar och multipel regressionsanalys. I själva verket är det alltså högst tveksamt som någon enskild metod någonsin kan ge en helhetsbild. Istället bör ett koncept, där flera olika metoder ingår, utvecklas. Detta kommer att behandlas mera ingående senare i rapporten.

Trots att uppenbarligen är svårt utveckla algoritmen särskilt mycket i praktisk riktning, finns en del att göra. Detta ligger dock i princip helt utanför ramarna för detta examensarbete, eftersom det först och främst skulle handla om att tillämpa algoritmen på andra komponenter. Med andra ord skulle det vara frågan om att ta fram livslängdsfördelningar för andra komponenter. Eftersom att detta examensarbete endast behandlar statorlindningen, är det inte rimligt att direkt göra några sådana studier. Däremot kan det vara intressant att mera övergripande sondera vilka komponenter som skulle kunna komma i fråga. Detta görs lämpligen genom intervjuer med en eller flera experter på området, där fokus bör ligga på att hitta komponenter som har lång livslängd och som uppvisar åtminstone en viss grad av kritiskhet. En komponent som bara är i drift tills den går sönder för att sedan bytas utan större problem, är knappast intressant att applicera algoritmen på.

## 4.4 Att studera modellanvändande

Ett vanligt problem är alltså att modeller som tagits fram inte används. Anledningarna till detta kan självklart variera, men det är ändå intressant att försöka sortera ut några viktiga faktorer. Det finns egentligen bara ett sätt att studera modellanvändande, nämligen att intervjua dem som arbetar med revisioner av vattenkraftaggregat. Även om den här typen av frågor möjligen kan ses som lite avvikande jämfört med resten av examensarbetet, är det viktiga frågor som rör några av grundtankarna inom civilingenjörsprogrammet System i teknik och samhälle. Med tanke på min bakgrund och att dessa problem bevisligen funnits inom Swedpower, skulle det därför vara konstigt att inte ta upp dem i examensarbetet. Dessa problem måste också beaktas när det nya konceptet tas fram, men framförallt när det implementeras.

## 4.5 Att ta fram ett nytt koncept

I de flesta organisationer finns en invand metodik för hur en viss uppgift skall hanteras. En sådan metodik har ofta en lång utvecklingsprocess bakom sig, där olika erfarenheter steg för steg lett till den idag rådande metodiken. I examensarbeten och andra liknande sammanhang är det vanligt att helt förkasta befintliga metodiker och istället hävda att den nya metodik som framförs är mycket bättre. I detta examensarbete är avsikten en annan. Visst är tanken att ta fram heltäckande koncept, men detta koncept är trots allt snarare tänkt att fungera som ett hjälpmedel än ett sätt att förkasta kunskaper det tagit decennier att bygga upp.

Konceptet kan istället ses som ett sätt att få en överblicksbild över situationen, eller annorlunda uttryckt, ett slags akt för varje statorlindning. En sådan akt skulle vara ett sätt att, åtminstone löst, koppla samman de båda brofästena som diskuterats ovan (se figur 3). Det är också viktigt att konceptet tar hänsyn till hela basen i tetraedern, eller annorlunda uttryckt, vilar på alla tre ben (se figur 4). Såväl design, som drift och statorlindningens nuvarande kondition måste alltså beaktas.

För att utveckla ett nytt koncept måste olika angreppssätt för livslängdsbedömningar av statorlindningar undersökas. Förutom den multipla regressionsanalysen och Bayesiansk baserade algoritmen, måste även mer praktiska angreppssätt beaktas. Det rör sig då främst om inspektioner, vilka ofta företas på vattenkraftanläggningarna. Dessa inspektioner kan ge mycket värdefull kvalitativ kunskap. Införandet av ett nytt koncept måste föregås av en bred diskussion. Självklart är det under denna process viktigt att vara öppen för impulser från handledare och andra som arbetar med dessa frågor. Dock kan det också i vissa fall vara fruktbart att se saker ur nya perspektiv.

När det gäller mera teoretiska aspekter på det nya konceptet kan en inspirationskälla föras fram, nämligen Gulliksen & Göransson (2002). Ett av deras viktigaste resonemang, *användarcentrering*, kan med fördel användas vid den här typen av studier. Att följa deras metodik till punkt och pricka är svårt, men mycket av deras idéer är applicerbara i utvecklandet av ett nytt koncept för livslängdsbedömningar av statorlindningar. Anledningen till att det är problematiskt att helt följa deras metodik är den primärt är tänkt att användas i kognitivt besvärligare situationer. En viktig princip för Gulliksen & Göransson (2002) är *användarfokus*. Detta innebär att utvecklingen av ett koncept, som det handlar om i detta fall, måste utgå ifrån användarens och verksamhetens behov. Det är också viktigt att användarna deltar i utvecklingsprocessen. Ett annat viktigt begrepp är *evolutionär utveckling*, vilket innebär att systemet eller i detta fall konceptet utvecklas iterativt och inkrementellt, alltså att utvecklingen genomförs i samverkan med användarna och att den sker i (små) steg.

Författarna nämner också begreppet *prototyping*, som går ut på att kontinuerligt i utvecklingsarbetet ta fram prototyper för att visualisera och utvärdera idéer. När det gäller senare steg i utvecklingen, vilka inte helt ryms inom tidsramarna för ett examensarbete, kan *utvärdering av verklig användning* nämnas. Detta handlar om att mäta hur väl målen för användbarheten uppfyllt i praktiken. Viktigast av allt är sannolikt en generellt *användarcentrerad attityd*, vilken författarna menar måste etableras på arbetsplatsen i fråga.

Utöver resonemangen i Gulliksen & Göransson (2002) bör det tilläggas att konceptet måste vara förståeligt även utanför de kretsar där det konkreta revisionsarbetet genomförs. Konceptet måste alltså vara greppbart för exempelvis icke-teknikutbildad personal inom Vattenfall. Vidare är det viktigt att hänsyn tas till de problem med modellanvändande, som nämnts i föregående avsnitt. Det gäller alltså att se till att konceptet inte glöms bort, utan kan användas som ett nyttigt hjälpmedel vid revisionsbeslut.

## 5 Resultat och analys

I detta kapitel presenteras svaren på de frågeställningar som kan sägas utgöra stommen för examensarbetet. Områdena behandlas i stort i den ordning de presenterades i frågeställningarna. Diskussion, mera koncisa svar på frågeställningarna samt resonemang om fortsatt arbete behandlas dock senare i rapporten.

### 5.1 Multipel regressionsanalys

Inledningsvis kan det vara lämpligt att återknyta till resonemangen kring validitet och reliabilitet i avsnitt 4.1.10. För att testa validiteten, och i någon mån möjligen reliabiliteten, för exempelvis en multipel regressionsanalys, är det rimligt att använda en del av observationerna för kalibrering, medan en annan används för validering. Mera vardagligt kan detta beskrivas som att en del av observationerna används för att bestämma en ekvation. Denna ekvation appliceras sedan på den andra gruppen observationer. Då antalet observationer i detta fall är så pass lågt är det rimligt att använda betydligt fler observationer för kalibrering än validering. Av samma skäl, det vill säga att antalet observationer är så lågt, kan det självklart även vara intressant att göra en multipel regressionsanalys, för att sedan göra ett slags validering på alla kalibrerande observationer, genom att jämföra verkligt uppnådda återstående livslängder med predikterade. För att fastställa den multipla regressionsanalysens kvalitet kan det vara på sin plats att göra dessa jämförelser på ett matematiskt korrekt sätt. En bra lösning är att titta på RMSE, *Root Mean Squared Error*, vilket ger en bra uppfattning om den multipla regressionsanalysens användbarhet. Detta behandlas mera ingående nedan.

Eftersom linjärt beroende inte får finnas mellan parametrarna i en multipel regressionsanalys, kan det vara befogat att titta parametrarnas koppling till varandra. En viss koppling finns alltid mellan parametrarna. Det är mycket svårt att hitta ett praktiskt exempel där så inte är fallet. Exemplet med bilen är en bra illustration på detta. En bils pris beror på ett flertal parametrar, exempelvis miltal och ålder. Självfallet finns en koppling mellan miltal och ålder, men kopplingen är definitivt inte i form av ett linjärt beroende. Samma synsätt kan appliceras på statorlindningen. Det finns sannolikt en viss koppling mellan exempelvis  $\Delta \tan \delta$  och de partiella urladdningarna, eftersom båda indikerar att statorlindningen åldrats. Den kanske mest problematiska parametern är dock aggregatets ålder vid observationstillfället. Är det möjligen så att någon av de övriga parametrarna uppvisar ett linjärt beroende med aggregatets ålder? Efter att ha gjort multipla regressionsanalyser både med och utan parametern ålder, är sannolikt svaret på denna fråga nej. De multipla regressionsanalyserna blir nämligen fullt rimliga i båda fallen. En slutsats blir då, att det är naturligt att fokusera på den multipla regressionsanalys som inkluderar aggregatets ålder. Det kan dock vara intressant att visa den multipla regressionsanalysen även utan parametern ålder, för att redovisa vilka tankegångar som funnits under arbetets gång. En viktig skillnad är dock att exkluderandet av åldern som parameter inte leder till konstiga resultat, utan mycket väl skulle kunna användas om exempelvis åldersuppgifter saknas för en grupp aggregat.

För att kalibrera en modell som exempelvis multipel regressionsanalys, krävs faktiska observationer. Om ingen statorlindning bytts ut, är det omöjligt att med hjälp av multipel regressionsanalys prediktera statorlindningars livslängder. Som redan nämnts är typen av isolersystem en mycket viktig faktor, som är helt avgörande för en statorlindnings livslängd. Då statorlindningar byts ut först efter flera decennier, finns inga uppgifter om uppnådda livslängder, eller rättare sagt uppnådda återstående livslängder efter DSD-mätning, för

statorlindningar tillverkade de senaste decennierna. Med andra ord är det ännu omöjligt att via multipel regressionsanalys prediktera livslängden på epoxiisolerade statorlindningar. Därigenom blir den multipla regressionsanalysen helt igenom en analys av asfaltisolerade statorlindningar. Detta har både sina för- och nackdelar. På den positiva sidan finns det faktum att de allra flesta statorlindningar som idag är i fråga för revision, är just asfaltisolerade. Det negativa är dock att detta bara gäller dagens situation. Om något eller några decennier kommer läget vara ett annat och allt fler epoxiisolerade statorlindningar kommer att vara uttjänta. Lite mer svävande uttryckt kan alltså nackdelen med den multipla regressionsanalysen sägas vara, att den inte är så framåtsyftande. I en ganska snar framtid kommer dessa resultat att vara irrelevanta. Å andra sidan är det då knappast något större problem att använda samma metodik på epoxiisolerade statorlindningar, eftersom dessa då börjat bytas ut.

Parametrarna i den multipla regressionsanalysen ser ut på följande sätt:

- $y$  – återstående teknisk livslängd (observerad)
- $x_1 - \Delta \tan \delta$  [%]
- $x_2$  – partiella urladdningar [nC]
- $x_3$  – genomsnittlig drifttid per år [h]
- $x_4$  – genomsnittligt antal start och stopp per år
- $x_5$  – genomsnittlig elektrisk påkänning [kV/mm]
- $x_6$  – statorlindningens ålder [år]

För att skilja mellan de observerade återstående livslängderna och de predikterade återstående livslängderna, är det en fördel att använda olika variabelnamn. Predikterade återstående livslängder kommer därför att betecknas på följande sätt:

- $y_{\text{pred}}$  – återstående teknisk livslängd (predikterad)

### 5.1.1 Multipel regressionsanalys inklusive parametern ålder

Multipel regressionsanalys inklusive parametern ålder innebär att alla sex x-variablerna används i den multipla regressionsanalysen, som utgår ifrån observationerna i tabell 2. Det är alltså frågan om kalibrering. Då fås ekvation (3), som i sin tur används för att prediktera den återstående tekniska livslängden för statorlindningarna i tabell 3. I detta rör det sig alltså om validering. Genom att i validering (tabell 3) jämföra prediktionerna med de verkliga utfallen, inses att viss träffsäkerhet föreligger. Den multipla regressionsanalysen lyckas alltså skilja en dålig statorlindning från en bra och så vidare. Om skillnaderna mellan predikterad och verklig återstående teknisk livslängd beror på att statorlindningarna var i olika skick när de byttes ut, eller om det finns svagheter i den multipla regressionsanalysen är svårt att bedöma.

Tabell 2 – Kalibrering multipel regressionsanalys inklusive parametern ålder.

| Aggregat | y  | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> |
|----------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A G1     | 8  | 1,22           | 14,9           | 5436           | 153            | 1,66           | 39             |
| B G1     | 6  | 1,02           | 20,2           | 6444           | 117            | 1,3            | 42             |
| B G2     | 5  | 1,46           | 9              | 6108           | 190            | 1,3            | 40             |
| C G1     | 5  | 1,02           | 9,3            | 7992           | 60             | 2              | 42             |
| D G1     | 4  | 1,64           | 3,5            | 5079           | 282            | 1,97           | 39             |
| D G1     | 8  | 1,44           | 17,1           | 5079           | 282            | 1,97           | 35             |
| E G1     | 9  | 0,62           | 13,2           | 7524           | 60             | 1,27           | 41             |
| F G2     | 6  | 1,96           | 8,2            | 4440           | 372            | 1,74           | 47             |
| C G2     | 3  | 0,78           | 8,8            | 6204           | 216            | 2              | 37             |
| G G3     | 10 | 0,34           | 5,3            | 8208           | 48             | 1,41           | 43             |
| G G3     | 4  | 0,64           | 19             | 8208           | 48             | 1,41           | 49             |

Dessa observationer ger genom multipel regressionsanalys följande ekvation (3) för prediktion av den återstående tekniska livslängden:

$$y_{pred(1)} = -1,96x_1 - 0,065x_2 - 0,0014x_3 - 0,012x_4 - 2,69x_5 - 0,064x_6 + 27,38 \quad (3)$$

Tabell 3 – Validering multipel regressionsanalys inklusive parametern ålder.

| Aggregat | y  | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> | y <sub>pred(1)</sub> |
|----------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| C G1     | 10 | 0,58           | 1,6            | 7992           | 60             | 2              | 37             | 6,5                  |
| D G2     | 7  | 2,56           | 13,6           | 5148           | 307            | 1,97           | 36             | 3,0                  |
| F G3     | 0  | 3,74           | 7,7            | 5712           | 288            | 1,74           | 39             | 0,9                  |

### 5.1.2 Multipel regressionsanalys exklusive parametern ålder

Multipel regressionsanalys exklusive parametern ålder innebär att enbart de fem första x-variablerna används i den multipla regressionsanalysen. Det är i övrigt frågan om samma observationer som i avsnitt 5.1.1, vilket visas i tabell 4. Med andra ord används observationerna i tabell 4 för kalibrering. I detta fall fås givetvis en annan ekvation (4) än den i 5.1.1. Ekvationen (4) används i sin tur för att prediktera den återstående tekniska livslängden för statorlindningarna i tabell 5, vilka också är desamma som i föregående avsnitt. Det är alltså precis som i avsnitt 5.1.1 frågan om validering. Genom att i validering (tabell 5) jämföra prediktionerna med de verkliga utfallen, inses att träffsäkerheten är något sämre i detta fall. Trots allt lyckas den multipla regressionsanalysen även här skilja en dålig statorlindning från en bra och så vidare. Även här är det svårt att veta om skillnaderna mellan predikterad och verklig återstående teknisk livslängd beror på att statorlindningarna var i olika skick när de byttes ut, eller om det finns svagheter i den multipla regressionsanalysen. Notera gärna sammanträffandet att ekvation (3) och (4) fått samma konstantterm (med två decimalers noggrannhet).

Tabell 4 – Kalibrering multipel regressionsanalys exklusive parametern ålder.

| Aggregat | y  | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> |
|----------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A G1     | 8  | 1,22           | 14,9           | 5436           | 153            | 1,66           |
| B G1     | 6  | 1,02           | 20,2           | 6444           | 117            | 1,3            |
| B G2     | 5  | 1,46           | 9              | 6108           | 190            | 1,3            |
| C G1     | 5  | 1,02           | 9,3            | 7992           | 60             | 2              |
| D G1     | 4  | 1,64           | 3,5            | 5079           | 282            | 1,97           |
| D G1     | 8  | 1,44           | 17,1           | 5079           | 282            | 1,97           |
| E G1     | 9  | 0,62           | 13,2           | 7524           | 60             | 1,27           |
| F G2     | 6  | 1,96           | 8,2            | 4440           | 372            | 1,74           |
| C G2     | 3  | 0,78           | 8,8            | 6204           | 216            | 2              |
| G G3     | 10 | 0,34           | 5,3            | 8208           | 48             | 1,41           |
| G G3     | 4  | 0,64           | 19             | 8208           | 48             | 1,41           |

Dessa observationer ger genom multipel regressionsanalys följande ekvation (4) för prediktion av den återstående tekniska livslängden:

$$y_{pred(2)} = -2,35x_1 - 0,074x_2 - 0,0018x_3 - 0,015x_4 - 2,29x_5 + 27,38 \quad (4)$$

Tabell 5 – Validering multipel regressionsanalys exklusive parametern ålder.

| Aggregat | y  | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | y <sub>pred(2)</sub> |
|----------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| C G1     | 10 | 0,58           | 1,6            | 7992           | 60             | 2              | 6,0                  |
| D G2     | 7  | 2,56           | 13,6           | 5148           | 307            | 1,97           | 2,0                  |
| F G3     | 0  | 3,74           | 7,7            | 5712           | 288            | 1,74           | -0,6                 |

### 5.1.3 Jämförelse av resultat

En inledande extern studie av PLS har alltså gjorts. Samma observationer användes vid denna som vid den multipla regressionsanalysen, men eftersom PLS inte visade sig vara markant bättre än den multipla regressionsanalysen, övergavs detta spår. Med bättre menas i detta fall mindre fel jämfört med de verkliga observerade återstående tekniska livslängderna. Detta mäts med *Root Mean Squared Error* (RMSE) och kommer att beskrivas nedan. Det är dock viktigt att komma ihåg att en djupare studie av PLS skulle kunna komma till delvis andra resultat, eftersom sådant som reducering av dimension och variansskalning har betydelse på en PLS-modells resultat. Som redan nämnts ligger egentligen såväl PLS som PCA utanför detta examensarbete. I och med att de ändå utförts, om än externt, skulle det vara märkligt att låtsas som om resultaten var helt okända. Därför kommer RMSE från PLS-resultaten att användas i syfte att jämföra multipel regressionsanalys med just PLS. PCA kommer ej behandlas, men faktum är att PCA inte ger några indikationer på linjära beroenden, samtidigt som den multipla regressionsanalysen visar rimliga resultat. Allt detta kan summeras till att det inget tyder på att det skulle finnas linjära beroenden mellan parametrarna. Då reduceras givetvis motivet att använda PLS kraftigt. Utan linjära beroenden borde de båda regressionsmetoderna ge likartade resultat, vilket de också gör. I tabell 6 jämförs resultaten från  $y_{pred(1)}$  och  $y_{pred(2)}$ . Det senare är alltså prediktionen utan parametern ålder. PLS-prediktionen redovisas inte i tabell 6, men dess RMSE analyseras nedan.

För att jämföra tillförlitligheten hos olika metoder kan alltså med fördel *Root Mean Squared Error* (RMSE) användas. Detta beräknas på så sätt att avvikelsen (felet) mellan prediktionen och den verkliga iakttagelsen (återstående tekniska livslängden) först kvadreras. Sedan beräknas ett medelvärde för dessa kvadrerade avvikelser. Slutligen tas roten ur detta medelvärde (Wikipedia, 2006b). Observera att tabell 6 inkluderar alla 14 observationerna, det vill säga både de som använts för kalibrering och de som använts för validering.

Tabell 6 - Jämförelse mellan regressioner.

| Aggregat | Faktisk återstående teknisk livslängd | Återstående teknisk livslängd enligt $y_{pred(1)}$ | Återstående teknisk livslängd enligt $y_{pred(2)}$ |
|----------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| A G1     | 8                                     | 7,6                                                | 7,5                                                |
| B G1     | 6                                     | 7,5                                                | 7,2                                                |
| B G2     | 5                                     | 7,0                                                | 6,5                                                |
| C G1     | 10                                    | 6,5                                                | 6,0                                                |
| C G1     | 5                                     | 4,8                                                | 4,4                                                |
| D G1     | 4                                     | 5,6                                                | 5,4                                                |
| D G1     | 8                                     | 5,4                                                | 4,8                                                |
| D G2     | 7                                     | 3,0                                                | 2,0                                                |
| E G1     | 9                                     | 8,0                                                | 7,6                                                |
| F G2     | 6                                     | 4,6                                                | 4,6                                                |
| C G2     | 3                                     | 6,3                                                | 5,9                                                |
| F G3     | 0                                     | 0,9                                                | -0,6                                               |
| G G3     | 10                                    | 7,8                                                | 7,5                                                |
| G G3     | 4                                     | 5,9                                                | 5,7                                                |
|          | <b>RMSE</b>                           | <b>2,19</b>                                        | <b>2,38</b>                                        |

Att  $y_{pred(1)}$  är något bättre än  $y_{pred(2)}$  är inte särskilt besynnerligt. Något mer uppseendeväckande är möjligen att RMSE för  $y_{pred(1)}$  (2,19) och den tidigare nämnda PLS-prediktionen (2,17) är nära nog identiska. De ger inte identiska prediktioner för varje enskild statorlindning, men totalt sett är felnivån densamma. Detta kan ses som ett tecken på att problemet snarare ligger i det låga antalet observationer än i valet av regressionsmetod. Utöver detta ger RMSE en tydlig indikation på hur fint eller grovt det går att uppdelat statorlindningarna i olika risknivåer.

#### 5.1.4 Predikterade livslängder för statorlindningar i drift

Vattenfall äger ett stort antal vattenkraftverk, framför allt i Sverige. Många av dem har asfaltisolerade statorlindningar och deras livslängder kan därmed predikteras med hjälp av de ekvationer som fått av de multipla regressionsanalyserna ovan. Eftersom felmarginalen för prediktionerna är relativt stor, är det inte möjligt exakt prediktera en statorlindnings livslängd. Att exakt prediktera en statorlindnings livslängd är dock aldrig möjligt, eftersom det skulle kräva att alla observerade statorlindningar skulle ha bytts ut vid exakt samma kondition. Så fungerar det dock inte, eftersom ett byte av en statorlindning ibland beror på haverier och ibland på att riskerna anses för stora för att fortsätta driften. Det senare är det vanligaste. Hur som helst klumpas båda dessa anledningar till statorlindningsbyte ihop till tekniska orsaker. I båda fallen är det alltså den tekniska livslängden det handlar om, eller i detta examensarbete snarare den återstående tekniska livslängden. Det är också viktigt att komma ihåg att

För att hantera de felmarginaler som mer eller mindre självklart uppkommer i den här typen av undersökningar, kan det vara intressant att göra någon form av indelning i riskkategorier beroende på när den predikterade återstående tekniska livslängden tar slut. Eftersom felmarginalen är i storleksordningen två år (jämför RMSE), är det rimligt att dela in statorlindningarna i grupper eller riskkategorier med intervall på exempelvis fem år. Den indelning som valts för detta examensarbete ser ut på följande sätt och har fått följande färgkodning:

|           |                                                                                   |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| -2005     |  |
| 2006-2010 |  |
| 2011-     |  |

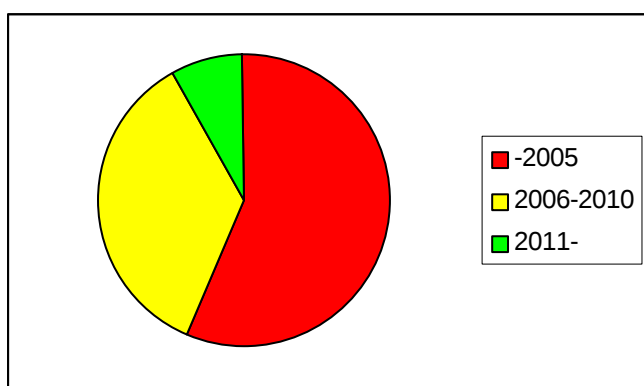
Tabell 7 visar den predikterade återstående tekniska livslängden för de asfaltisolerade statorlindningar som är i drift hos Vattenfall.  $y_{pred(1)}$  är prediktionen som fås genom ekvation (3), det vill säga den som fås fram då alla sex parametrar använts. Eftersom observationerna är gjorda vid olika tillfällen är det viktigt att relatera den predikterade återstående tekniska livslängden till mättillfällena. På så sätt fås ett *bäst före-datum* för statorlindningen. Benämningen *bäst före-datum* kan tyckas konstig, men den visar på ett bra sätt vad det handlar om. *Bäst före 1* är alltså summan av året för observationen och den predikterade återstående tekniska livslängden ( $y_{pred(1)}$ ). På motsvarande sätt är  $y_{pred(2)}$  prediktionen som fås genom ekvation (4). I detta fall har parametern  $x_6$ , det vill säga statorlindningens ålder, exkluderats. *Bäst före 2* är därmed summan av året för observationen och den predikterade återstående tekniska livslängden ( $y_{pred(2)}$ ).

Tabell 7 – predikterade återstående tekniska livslängder för statorlindningar inom Vattenfall.

| Statusen för Vattenfalls aggregat |                |                |                |                |                |                |                      |                      |             |             |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|
| Aggregat                          | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>5</sub> | X <sub>6</sub> | Y <sub>pred(1)</sub> | Y <sub>pred(2)</sub> | Bäst före 1 | Bäst före 2 |
| H G4                              | 0,34           | 16             | 7356           | 72             | 1,56           | 34             | 8,1                  | 7,5                  | 2002        | 2002        |
| I G1                              | 2,38           | 2,7            | 1224           | 204            | 1,72           | 48             | 10,7                 | 12,4                 | 2011        | 2012        |
| I G2                              | 3,76           | 11,3           | 2004           | 378            | 1,72           | 48             | 4,2                  | 4,5                  | 2004        | 2004        |
| I G3                              | 2,8            | 9,5            | 2976           | 473            | 1,72           | 48             | 3,7                  | 3,7                  | 2004        | 2004        |
| F G2                              | 1,96           | 8,2            | 4440           | 372            | 1,74           | 47             | 4,6                  | 4,6                  | 2005        | 2005        |
| J G1                              | 0,54           | 9,1            | 6492           | 63             | 1,8            | 35             | 8,8                  | 8,7                  | 2007        | 2007        |
| K G1                              | 0,14           | 7,4            | 5508           | 168            | 1,07           | 53             | 10,6                 | 11,6                 | 2008        | 2009        |
| L G1                              | 0,94           | 3,5            | 3240           | 331            | 1,64           | 45             | 9,5                  | 10,4                 | 2009        | 2009        |
| M G3                              | 3,06           | 11,2           | 7560           | 96             | 1,55           | 43             | 2,0                  | 0,8                  | 2001        | 2000        |
| E G2                              | 0,88           | 7,8            | 7932           | 72             | 1,27           | 41             | 7,1                  | 6,5                  | 2003        | 2002        |
| N G1                              | 0,82           | 8,6            | 7644           | 131            | 1,86           | 33             | 5,8                  | 4,8                  | 2001        | 2000        |
| A G2                              | 0,96           | 4,6            | 5460           | 164            | 1,66           | 38             | 8,7                  | 8,7                  | 2006        | 2006        |
| O G2                              | 3,12           | 6              | 7752           | 84             | 1,63           | 43             | 1,9                  | 0,7                  | 2001        | 2000        |
| P G2                              | 0,3            | 7              | 6504           | 154            | 1,58           | 41             | 8,5                  | 8,5                  | 2012        | 2012        |
| Q G1                              | 0,96           | 29             | 6324           | 136            | 1,39           | 44             | 6,6                  | 6,4                  | 2008        | 2007        |
| Q G2                              | 0,52           | 19,3           | 6396           | 154            | 1,39           | 41             | 7,9                  | 7,7                  | 2006        | 2006        |
| R G1                              | 0,16           | 2,75           | 4788           | 280            | 1,61           | 39             | 10,0                 | 10,3                 | 2010        | 2010        |
| H G1                              | 1,48           | 13,4           | 6936           | 168            | 1,56           | 41             | 5,1                  | 4,3                  |             |             |
| H G1                              | 1,78           | 17,8           | 6936           | 168            | 1,56           | 48             | 3,7                  | 3,3                  | 2004        | 2003        |
| H G2                              | 0,94           | 24,1           | 6000           | 132            | 1,56           | 40             | 7,2                  | 7,0                  |             |             |
| H G2                              | 1,32           | 5,6            | 6000           | 132            | 1,56           | 47             | 7,2                  | 7,5                  | 2006        | 2006        |
| H G3                              | 1,34           | 13,2           | 6468           | 132            | 1,56           | 39             | 6,6                  | 6,1                  |             |             |
| H G3                              | 1,68           | 3,5            | 6468           | 132            | 1,56           | 43             | 6,3                  | 6,0                  | 2003        | 2003        |
| S G4                              | 2,28           | 22             | 6612           | 204            | 1,4            | 38             | 3,6                  | 2,2                  |             |             |
| S G4                              | 2,68           | 9              | 6612           | 204            | 1,4            | 45             | 3,2                  | 2,2                  |             |             |
| S G4                              | 2,38           | 5,6            | 6612           | 204            | 1,4            | 48             | 3,8                  | 3,2                  | 2004        | 2003        |
| C G1                              | 0,58           | 1,6            | 7992           | 60             | 2              | 37             | 6,5                  | 6,0                  |             |             |
| C G1                              | 1,02           | 9,3            | 7992           | 60             | 2              | 42             | 4,8                  | 4,4                  | 2004        | 2004        |
| F G1                              | 0,86           | 17,5           | 3528           | 420            | 1,74           | 40             | 7,3                  | 7,4                  |             |             |
| F G1                              | 0,94           | 6,6            | 3528           | 420            | 1,74           | 48             | 7,4                  | 8,0                  | 2005        | 2006        |
| J G2                              | 0,98           | 49             | 7632           | 45             | 1,8            | 41             | 3,6                  | 2,9                  |             |             |
| J G2                              | 0,8            | 15,2           | 7632           | 45             | 1,8            | 43             | 6,0                  | 5,8                  | 2009        | 2008        |
| T G1                              | 1,26           | 15,2           | 6648           | 183            | 1,76           | 35             | 5,4                  | 4,6                  |             |             |
| T G1                              | 1,3            | 3,2            | 6648           | 183            | 1,76           | 41             | 5,8                  | 5,3                  | 2004        | 2003        |

Efter att ha tagit del av detta, kan läget tyckas vara kritiskt för Vattenfalls vattenkraftsanläggningar. Riktigt så behöver det dock inte vara, eftersom den tekniska livslängden, i de fall det inte rör sig om haverier, är den tidpunkt då ett byte ansetts nödvändigt. Rent hypotetiskt skulle många av dessa aggregat kunna fortsätta att vara i drift i många eller åtminstone flera år till, utan att statorlindningen byts. Att en statorlindning uppnått sitt *bäst före-datum* innebär alltså mera exakt att den är i sämre kondition än en genomsnittlig statorlindning var när den byttes av tekniska orsaker, det vill säga när den antingen havererade eller dömdes ut och ersattes under mera kontrollerade former. Det handlar alltid om risknivåer, inte om exakta slutdatum. Dock bör statorlindningar som passerat sitt *bästa före-datum* övervakas extra noga, eftersom haveririsken är förhöjd.

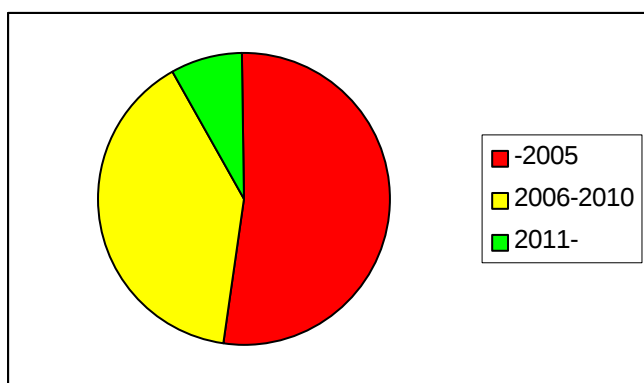
Det kan också vara värt att notera att båda ekvationerna, med respektive utan statorlindningens ålder som parameter, ger ganska likvärdiga resultat. Endast statorlindningen i F G1 hamnar i olika grupper beroende på vilken ekvation som används vid prediktionen. Dock skiljer det inte heller här mer än ett år mellan prediktionerna. Det kanske rimligaste sättet att handskas med den information som fås av den multipla regressionsanalysen är att se den som ett verktyg att jämföra statorlindningar, alltså att sätta olika statorlindningar i relation till varandra. Att statorlindningarna, enligt den multipla regressionsanalysen, generellt är i ganska dåligt skick, är inte heller särskilt konstigt. Till och med de yngsta asfaltisolerade aggregaten har idag passerat 40-årsstrecket. Vid en närmare granskning av tabell 7 inses att få asfaltisolerade statorlindningar har mer än något decennium kvar av sin livslängd. De flesta har ännu kortare återstående livslängd, då de med stor marginal passerat 40-årsstrecket. För att få en bättre överblick över de återstående livslängderna hos de undersökta statorlindningarna, predikterade med hjälp av multipel regressionsanalys, kan figurerna, 10 och 11, studeras:



Figur 10 – Gruppering av asfaltisolerade statorlindningar enligt  $y_{pred(1)}$ .

Tabell 8

|           |    |
|-----------|----|
| -2005     | 14 |
| 2006-2010 | 9  |
| 2011-     | 2  |



Figur 11 – Gruppering av asfaltisolerade statorlindningar enligt  $y_{pred(2)}$ .

Tabell 9

|           |    |
|-----------|----|
| -2005     | 13 |
| 2006-2010 | 10 |
| 2011-     | 2  |

### 5.1.5 Multipel regressionsanalys och verkligheten

För att ytterligare utvärdera den multipla regressionsanalysen, kan det vara befogat att titta närmare göra några fallstudier. Ett lämpligt sätt att göra detta på, är att plocka ut några statorlindningar med mycket olika predikterade livslängder och studera de rapporter som gjorts i samband med DSD-mätningarna. Dessutom kan det vara intressant att titta på ett aktuellt exempel, A G1, som just nu genomgår revision. Antalet DSD-rapporter och därmed antalet fallstudier valdes till fyra. Givetvis hade det varit tänkbart att göra fler fallstudier, men fyra är ändå ett ganska lämpligt antal, eftersom det då är möjligt att titta på en bra, en medelmåttig och en dålig statorlindning, samt en statorlindning som just håller på att bytas ut. En sak måste dock påpekas, nämligen att utgångspunkten i rapporterna ofta är att jämföra den undersökta statorlindningen med en ny. I någon mån blir resultaten alltså dåliga för alla så här gamla statorlindningar.

De fyra DSD-rapporter som valts är I G1 från 2000, Q G1 från 2001, O G2 från 1999, samt A G1 från 1997. Enligt den multipla regressionsanalysen är I G1 trots sin ålder i mycket god kondition, närmare bestämt 10,7 års respektive 12,4 års återstående livslängd enligt prediktionerna ovan. Aggregatet togs i drift redan 1952, men körs i genomsnitt bara 2004 timmar per år, vilket också är orsaken till dess goda resultat enligt den multipla regressionsanalysen. Det intressanta är nu att se vad som framkommer i DSD-rapporten.

$\Delta$  tan  $\delta$  konstaterades vara högre än i normkraven och detta sågs som ett tecken på att statorlindningen var åldrad. Glimnivån, med andra ord nivån på de partiella urladdningarna, visade sig däremot vara låg. Inga åtgärder föreslogs, men det ansågs viktigt att göra en ny mätning redan 2005 på grund av statorlindningens höga ålder (Östberg, 2000). Någon sådan undersökning har dock inte gjorts, vilket tyder på att Vattenfall inte ansett det vara några större problem med aggregaten och dess statorlindning. Det är mycket troligt att den korta drifttiden per år, som ju resulterat i en så pass lång predikerad återstående livslängd, verkligen haft en positiv inverkan på konditionen. Om inte annat håller en statorlindning, oavsett hur åldrad den är, längre om den inte är i drift så mycket. I fallet I G1 är det sannolikt driften och inte den nuvarande konditionen eller designen som har en positiv inverkan på livslängden. Jämför gärna med de tre hörnen i tetraederns bas.

Nästa aggregat att undersöka är Q G1. Detta aggregat och dess statorlindning är något nyare; det togs i drift 1957. Å andra sidan utfördes DSD-mätningen ett år senare än i fallet med I G1, alltså 2001. Q G1 var alltså 44 år gammal vid DSD-mätningen, medan I G1 var 48 år gammal vid mättillfället. Enligt de multipla regressionsanalyserna är den predikterade återstående livslängden för Q G1 6,6 respektive 6,4 år. Det handlar alltså om en statorlindning i relativt gott skick, men knappast mer än så. Enligt DSD-rapporten var Q G1 2001 med tanke på sin ålder i ganska bra skick.  $\Delta$  tan  $\delta$  beskrevs dock som högre än normkravet och det var en högre nivå av partiella urladdningarna än normalt, till och med i jämförelse med andra asfaltisolerade i samma ålder. Några åtgärder föreslogs dock inte, men rapportförfattarna rekommenderade en ny DSD-mätning inom fem år, eller senast 2006 (Östberg, 2001). Konditionsmässigt verkar alltså I G1 och Q G1 vara ganska likvärdiga. I tabell 7 går det dock att se att I G1 har mycket lägre nivå av partiella urladdningar än Q G1, som glimmar kraftigt. Q G1 har dock något lägre  $\Delta$  tan  $\delta$ . Skillnaden i genomsnittlig drifttid är dock gigantisk. Varje år körs Q G1 6324 timmar, vilket är mer än tre gånger mer än I G1. Återigen visar det sig att flera av den tänkta tetraederns hörn måste beaktas. När det gäller designen, som ju också var en av tetraederns hörn, använder sig den multipla regressionsanalysen enbart den elektriska påkänningen. Denna är 1,72 kV/mm för I G1 och 1,39 kV/mm för Q G1. Genom att studera ekvationerna som fåtts från de olika multipla regressionsanalyserna, är det dock möjligt att se

att denna skillnad i elektrisk påkänning sannolikt har mycket begränsad inverkan på den predikterade återstående livslängden.

Det tredje exemplet är O G2. Redan i Hägglund & Karlsson (2003) konstaterades det att detta aggregats statorlindning var i dåligt skick. Också den multipla regressionsanalysen visar att O G2 är i dålig kondition, och att den endast har 1,9 års respektive 0,7 års återstående livslängd enligt prediktionerna ovan. Eftersom detta baseras på en DSD-mätning från 1999, är resultaten för O G2 närmast alarmerande. Aggregatet och dess statorlindning hade vid mättillfället uppnått en ålder av 43 år. Den elektriska påkänningen var 1,63 kV/mm, vilket får betecknas som normalt för den här typen av statorlindningar. Det som dock drar ner den predikterade återstående livslängden för O G2:s statorlindning är det höga  $\Delta \tan \delta$ -värdet på 3,12 procent, samt att den körs så många timmar per år, närmare bestämt i genomsnitt 7752 timmar per år. Detta innebär att den är i drift nästan fyra gånger mer per år än I G1 och omkring 20 procent mer än Q G1. I DSD-rapporten från 1999 nämns givetvis det höga  $\Delta \tan \delta$ -värdet, men samtidigt bedöms statorlindningen vara i relativt gott skick och inga åtgärder ansågs nödvändiga. Detta trots att även de partiella urladdningarna var fler än normalt (Adeen, 1999). Detta visar två saker. Först och främst är det viktigt att även ta hänsyn till driften, det vill säga ett av hörnen i tetraedern bas. Om rapportförfattaren lagt större vikt vid detta, hade kanske slutsatserna varit annorlunda. Å andra sidan är den multipla regressionsanalysen lågt ifrån perfekt, eftersom det finns aspekter som inte tas upp i den. Det är möjligt att rapportförfattaren sett andra saker, som inte handlar om kvantitativa data, utan snarare om kvalitativa observationer. Sådant är omöjligt att ta med i en multipel regressionsanalys.

Den sista fallstudien rör A G1. DSD-mätningar gjordes samtidigt på både A G1 och G2, varför det är möjligt att se skillnader i status mellan dem. Enligt den multipla regressionsanalysen hade A G1 7,6 respektive 7,5 års återstående livslängd, medan den återstående livslängden enligt båda prediktionerna för A G2 uppgick till 8,7 år. Redan här går det att se att den multipla regressionsanalysen givit någorlunda vettiga resultat. A G1 är något sämre än A G2 och den predikterade återstående livslängden för A G1 stämmer i princip exakt med den verkliga. Bilden som målas upp i DSD-rapporten är att de båda statorlindningarna är i relativt gott skick. Dock finns större problem med glimningar i A G1 än i A G2, vilket lett rapportförfattaren till att rekommendera ny DSD-mätning inom fem år för A G1, medan rekommendation satts till tio år för A G2 (Adeen, 1997). Det är svårt att peka på några direkta svagheter hos A G1; ingen parameter sticker direkt ut. Å andra sidan är det inte heller mycket som framstår som speciellt positivt. Det rör sig alltså om en ganska jämnt sliten äldre statorlindningen.

Hur stämmer då de multipla regressionsanalyserna med verkligheten? Går det att dra några slutsatser utifrån dessa tre exempel? Eftersom DSD-mätningarna nästan helt fokuserar på det hörn av tetraederns bas som handlar om den nuvarande konditionen, är de multipla regressionsanalyserna och DSD-mätningarna inte helt jämförbara. Precis som när det gäller den algoritmen Anna Gabrielsson arbetat fram (Holmgren, 2005), kan det vara befogat att dra en parallell med en människas hälsa. DSD-rapporterna skulle i detta sammanhang kunna liknas vid de mätningar som görs på en akut sjuk människa: EKG, blodtryck, blodsocker, eller någon annan viktig parameter. De multipla regressionsanalyserna kan däremot ses som ett sätt att få med de viktigaste av dessa parametrar, men samtidigt inkludera andra faktorer. När det gäller statorlindningar är dessa andra faktorer data från drift och design. I en jämförelse med en människa, kanske driften skulle vara patienten ålder medan designen skulle handla om ärftlighetsfaktorer. DSD-mätningarna kan alltså liknas vid de mätningar som görs akut på en

sjuk patient, medan den multipla regressionsanalysen inkluderar detta men även tar hänsyn till andra saker, vilka, när det gäller en människa, tas upp efter det akuta skedet. Å andra sidan är det inte något i DSD-rapporterna som direkt motsäger de multipla regressionsanalyserna. Detta innebär att dessa ändå har en relativt god validitet, med andra ord den multipla regressionsanalysen visar det den är avsedd att visa, även om reliabiliteten är något skakig.

### 5.1.6 Robusthet hos den multipla regressionsanalysen

För att undersöka robustheten hos den multipla regressionsanalysen, kan det vara på sin plats att variera värdena som sätts in i ekvationerna. Eftersom resultaten blev så pass likvärdiga för multipel regressionsanalys med respektive utan parametern ålder, är det kanske egentligen inte nödvändigt att testa detta för båda dessa ekvationer. Dock har de båda som en röd tråd följt med genom hela resultatavsnittet. Därför kan det vara intressant att undersöka båda fallen. Tanken är att utgå från ett slags standardvärden för de olika parametrarna och sedan testa att höja och sänka värdena på ett systematiskt sätt. Utgångspunkten är alltså ekvationerna (3) och (4). Resultaten av robusthetsanalys återges i tabell 10.

$$y_{pred(1)} = -1,96x_1 - 0,065x_2 - 0,0014x_3 - 0,012x_4 - 2,69x_5 - 0,064x_6 + 27,38 \quad (3)$$

$$y_{pred(2)} = -2,35x_1 - 0,074x_2 - 0,0018x_3 - 0,015x_4 - 2,29x_5 + 27,38 \quad (4)$$

Tabell 10 – jämförelse mellan tänkt standardstatorlindning och varierade värden

|          | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> | y <sub>pred(1)</sub> | y <sub>pred(2)</sub> |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|
| 30%      | 1,95           | 13             | 7800           | 260            | 1,95           | 52             | 0,1                  | -0,6                 |
| 20%      | 1,8            | 12             | 7200           | 240            | 1,8            | 48             | 2,2                  | 1,6                  |
| 10%      | 1,65           | 11             | 6600           | 220            | 1,65           | 44             | 4,3                  | 3,7                  |
| Standard | 1,5            | 10             | 6000           | 200            | 1,5            | 40             | 6,4                  | 5,9                  |
| -10%     | 1,35           | 9              | 5400           | 180            | 1,35           | 36             | 8,5                  | 8,0                  |
| -20%     | 1,2            | 8              | 4800           | 160            | 1,2            | 32             | 10,6                 | 10,2                 |
| -30%     | 1,05           | 7              | 4200           | 140            | 1,05           | 28             | 12,7                 | 12,3                 |

En näraliggande fråga är givetvis reproducerbarheten. Förutsatt att samma regressionsmetod och är för säkerhets skull även samma programvara används, är reproducerbarheten givetvis god. Sedan kan det givetvis finnas mycket små skillnader mellan olika programvaror. Det skulle exempelvis kunna handla hur tal avrundas och så vidare. I detta examensarbete är dock programvarans resultat i sin avrundats kraftigt, vilket delvis reducerar problemet. När det gäller regressionsmetod kan skillnaderna vara större. Multipel regressionsanalys och PLS ger exempelvis olika resultat, men har ungefär samma felnivå. Generellt kan det återigen påpekas att det låga antalet observationer snarare än valet av regressionsmetod påverkar tillförlitligheten i analysen.

### 5.1.7 Multipel regressionsanalys och alternativa parameterval

Resultaten av den multipla regressionsanalysen påverkas givetvis något av vilka parametrar som använts. Sannolikt skulle resultaten skifta mindre om antalet observationer var högre. Ett problem när det gäller multipel regressionsanalys, är att äldre DSD-mätningar, eller DTI-mätningar som de kallades, mätte inte partiella urladdningar. Om dessa mätningar skulle ha tagits med, skulle självfallet antalet observationer bli högre. Å andra sidan inkluderas då inte den elektriska parameter som traditionellt sett ansetts vara den viktigaste indikatorn på åldring. Det bör dessutom poängteras att drift- och designdata varit svåra att finna för en del

av de aggregat som svarar mot DTI-mätningarna. Lite annorlunda uttryckt handlar det alltså om att observationer (mättillfällen) skulle bli fler, men parametrarna färre (partiella urladdningar ej med i analysen). Att antalet observationer utökas med två eller tre, motiverar dock inte att en så viktig parameter utesluts. Den multipla regressionsanalysen har därför i detta examensarbete genomgående inkluderat de partiella urladdningarna, trots att antalet observationer då blir något mindre.

För att förstå vikten av de partiella urladdningarna är det nödvändigt att ha en något djupare förståelse för en statorlindnings funktionssätt. Det kan dock sägas att de partiella urladdningarna traditionellt sett haft lite av en särställning inom statorlindningsdiagnostiken. Det skulle redan av det skälet vara märkligt att bortse från dem. Att göra en multipel regressionsanalys utan att ta hänsyn till de partiella urladdningarna är med andra ord inte särskilt meningsfullt. Vikten av att inkludera partiella urladdningar framstod ännu tydligare då testkörningar med den multipla regressionsanalysen genomfördes. Inkluderades partiella urladdningar i den multipla regressionsanalysen blev resultaten högst rimliga, medan multipel regressionsanalys utan partiella urladdningar visades sig problematisk. Det skulle teoretisk kunna vara så att det bara handlar om att de partiella urladdningarna ger en ytterligare parameter, vilket ökar följsamheten i den multipla regressionsanalysen. Dock kunde andra parametrar tas bort utan att påverka analysen alltför mycket negativt. Av flera skäl har det alltså visat sig att de partiella urladdningarna är nödvändiga som parametrar i en multipel regressionsanalys av detta slag. Den multipla regressionsanalysens oförmåga att fungera utan parametern partiella urladdningar är dock något illavarslande. Det illustrerar på ett tydligt sätt riskerna med multipla regressionsanalyser och visar återigen att ingen enskild analysmetod ensam kan lösa problematiken kring livslängdsbedömningarna av statorlindningar. Dock är det tydligt att multipel regressionsanalys, där partiella urladdningar inkluderats, faktiskt har god validitet.

## 5.2 Ett alternativt synsätt

Eftersom multipel regressionsanalys och andra former av matematisk prediktion inte alltid går att använda, kan det vara värdefullt att titta närmare på andra synsätt. Det kan då handla om att istället titta på en statorlindnings avvikelser från andra statorlindningar. Denna typ av analyser ger givetvis ingen explicit prediktion av den återstående livslängden, men genom att tolka avvikelserna kan insatta personer skapa sig en uppfattning om statorlindningens status. En fördel med detta synsätt är att även epoxiisolerade statorlindningar kan beaktas. Att studera avvikelser blir därmed en naturlig del av det heltäckande koncept som föreslås i examensarbetet. Detta gäller naturligtvis främst för de epoxiisolerade statorlindningarna, men avvikelser kan även vara intressanta som ett komplement till den multipla regressionsanalysen för asfaltisolerade statorlindningar. Det är viktigt att inse dessa studier av avvikelser, precis som den multipla regressionsanalysen, vilar på alla tre ben i den tänkta tetraedern. Som visas nedan är de undersökta parametrarna desamma som i den multipla regressionsanalysen.

- $x_1 - \Delta \tan \delta$  [%]
- $x_2$  – partiella urladdningar [nC]
- $x_3$  – genomsnittlig drifttid per år [h]
- $x_4$  – genomsnittligt antal start och stopp per år
- $x_5$  – genomsnittlig elektrisk påkänning [kV/mm]
- $x_6$  – statorlindningens ålder [år]

Ett av problemen med att titta på avvikelser är att mät- och driftdata inte är aktuella och att det till skillnad från den multipla regressionsanalysen inte finns någon möjlighet att ta hänsyn till

detta. I den multipla regressionsanalysen togs ju som bekant den återstående livslängden med i analysen. Denna eliminerade problemen med att mätningar och driftdata inte var helt aktuella. För att åtminstone till en del hantera de här problemen i avvikelseanalysen, visar tabell 11 dels alla epoxiisolerade statorlindningar och dels de senaste noteringarna. Medel 1 svarar mot alla epoxiisolerade statorlindningar, medan medel 2 syftar på de senaste noteringarna för epoxiisolerade statorlindningar. Bilaga 4 visar hur dessa medelvärden beräknats.

*Tabell 11 – Medelvärden för epoxiisolerade statorlindningar*

| Epoxi<br>Aggregat | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Medel 1           | 0,451          | 7,24           | 5993           | 197            | 2,37           | 20,5           |
| Medel 2           | 0,452          | 7,44           | 6005           | 191            | 2,34           | 21,4           |

Tabellerna 12 och 13 visar avvikelserna från medelvärdena för ett urval av de epoxiisolerade statorlindningarna. Kompletta listor finns i bilaga 5 respektive bilaga 6. För att uttrycka sig lite tydligare är det kvoten mellan avvikelse och medelvärde som visas för de olika aggregaten och de olika parametrarna. Längst ut till höger visas ett slags genomsnittsavvikelse, som helt enkelt är summan av avvikelserna dividerat med antalet parametrar. Under förutsättning att alla sex parametrar har lika stor betydelse, skulle denna genomsnittsavvikelse kunna ses som ett betyg. Tabell 12 baseras på medel 1 medan tabell 13 har sin grund i medel 2. Den svartmarkerade texten syftar på den senaste noteringen, medan brunmarkeringen visar äldre noteringar. Detta är alltså analogt med resonemangen om medel 1 och medel 2 ovan.

*Tabell 12 – Avvikelser hos epoxiisolerade statorlindningar utifrån medel 1*

| Epoxi<br>Aggregat | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> | Genomsnitt |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| U G1              | -0,29          | 0,11           | -0,05          | -0,10          | -0,12          | 0,41           | -0,01      |
| U G1              | -0,42          | 2,99           | -0,05          | -0,10          | -0,12          | 0,61           | 0,48       |
| V G1              | -0,25          | 0,63           | -0,02          | 0,29           | 0,42           | -0,56          | 0,09       |
| V G1              | -0,16          | -0,75          | -0,02          | 0,29           | 0,42           | -0,46          | -0,11      |
| Z G1              | 0,06           | -0,63          | 0,25           | -0,87          | -0,17          | 0,56           | -0,13      |
| Z G1              | 0,15           | -0,89          | 0,25           | -0,87          | -0,18          | 0,66           | -0,15      |
| Z G2              | -0,11          | -0,89          | 0,35           | -0,86          | -0,17          | 0,56           | -0,19      |

*Tabell 13 – Avvikelser hos epoxiisolerade statorlindningar utifrån medel 2*

| Epoxi<br>Aggregat | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> | Genomsnitt |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| U G1              | -0,43          | 2,88           | -0,05          | -0,07          | -0,11          | 0,54           | 0,46       |
| V G1              | -0,16          | -0,76          | -0,02          | 0,32           | 0,44           | -0,49          | -0,11      |
| Z G1              | 0,15           | -0,89          | 0,25           | -0,87          | -0,17          | 0,59           | -0,16      |
| Z G2              | -0,12          | -0,89          | 0,35           | -0,86          | -0,16          | 0,49           | -0,20      |

Givetvis går det även att göra samma typ av beräkningar för asfaltisolerade statorlindningar. Detta visas i tabell 14. Medel 3 svarar här mot alla asfaltisolerade statorlindningar, medan medel 4 syftar på de senaste noteringarna för asfaltisolerade statorlindningar i drift. Bilaga 7 visar hur dessa medelvärden beräknats.

Tabell 14 – Medelvärden för asfaltisolerade statorlindningar

| Asfalt<br>Aggregat | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Medel 3            | 1,38           | 11,4           | 6113           | 181            | 1,64           | 41,7           |
| Medel 4            | 1,40           | 10,6           | 5817           | 187            | 1,61           | 43,2           |

Tabellerna 15 och 16 visar avvikelserna från medelvärdena för ett urval av de asfaltisolerade statorlindningarna. Kompletta listor finns i bilaga 8 respektive bilaga 9. Även här är det kvoten mellan avvikelse och medelvärde som visas för de olika aggregaten och de olika parametrarna. Längst ut till höger visas ett slags genomsnittsavvikelse, som helt enkelt är summan av avvikelserna dividerat med antalet parametrar. Under förutsättning att alla sex parametrar har lika stor betydelse, skulle denna genomsnittsavvikelse alltså kunna ses som ett betyg. Tabell 15 baseras på medel 3 medan tabell 16 har sin grund i medel 4. Den svartmarkerade texten syftar på den senaste noteringen för asfaltisolerade statorlindningar i drift, medan brunmarkeringen visar äldre noteringar. Detta är analogt med medel 3 och medel 4 som beskrivits ovan.

Tabell 15 – Avvikelser hos asfaltisolerade statorlindningar utifrån medel 3

| Asfalt<br>Aggregat | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> | Genomsnitt |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| H G1               | 0,07           | 0,18           | 0,13           | -0,07          | -0,05          | -0,02          | 0,04       |
| H G1               | 0,29           | 0,56           | 0,13           | -0,07          | -0,05          | 0,15           | 0,17       |
| H G2               | -0,32          | 1,11           | -0,02          | -0,27          | -0,05          | -0,04          | 0,07       |
| H G2               | -0,04          | -0,51          | -0,02          | -0,27          | -0,05          | 0,13           | -0,13      |
| H G3               | -0,03          | 0,16           | 0,06           | -0,27          | -0,05          | -0,07          | -0,03      |
| H G3               | 0,22           | -0,69          | 0,06           | -0,27          | -0,05          | 0,03           | -0,12      |
| H G4               | -0,75          | 0,40           | 0,20           | -0,60          | -0,05          | -0,19          | -0,16      |

Tabell 16 – Avvikelser hos asfaltisolerade statorlindningar utifrån medel 4

| Asfalt<br>Aggregat | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> | Genomsnitt |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| H G1               | -0,59          | -0,85          | 0,37           | -0,68          | 0,24           | -0,14          | -0,27      |
| H G2               | -0,59          | -0,85          | 0,37           | -0,68          | 0,24           | -0,14          | -0,27      |
| H G3               | -0,44          | -0,17          | 0,07           | 0,15           | 0,24           | -0,14          | -0,05      |
| H G4               | -0,59          | -0,85          | 0,37           | -0,68          | 0,24           | -0,14          | -0,27      |

### 5.3 Nya tillämpningar på livslängdsfördelningar

Eftersom hela idén med den tidigare beskrivna algoritmen är att ta fram livslängdsfördelningar där få observationer finns, är det rimligt att leta bland komponenter som har dessa egenskaper. Det handlar alltså om komponenter som har en lång livslängd. Efter intervjuer på Swedpower i Älvkarleby har det varit möjligt att urskilja några komponenter där det skulle gå att använda Bayesianskt baserade livslängdsfördelningar. Transformatorer tillhör de komponenter som skulle kunna komma i fråga. Rotorpoler och magnetisering är andra tänkbara komponenter. Att sedan rent praktiskt beräkna dessa livslängdsfördelningar, bör vara genomförbart, eftersom en algoritm för detta finns utarbetad (Holmgren, 2004). Detta ligger dock utanför ramarna för detta examensarbete och kräver nära kontakter med expertis inom såväl Bayesiansk metodik och elteknik.

Detta är också ett lämpligt tillfälle att diskutera något om nya tillämpningar för den multipla regressionsanalysen. I detta fall är det dock mera problematiskt, eftersom andra komponenter än statorlindningen inte diagnostiserats lika väl. Mer och bättre data måste insamlas, för att över huvud taget möjliggöra nya tillämpningsområden för multipel regressionsanalys. Rent hypotetiskt skulle dock transformatorer, rotorpoler och magnetisering, även i detta falla vara möjliga undersökningsobjekt. Även olika former av lager skulle eventuellt kunna behandlas med multipel regressionsanalys.

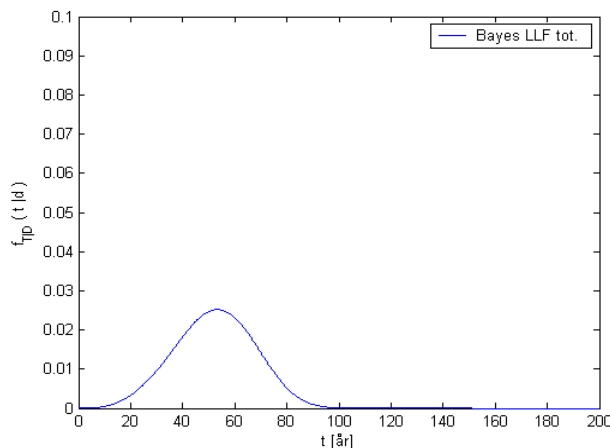
## 5.4 Modellanvändande

Det enda sättet att undersöka frågor rörande modellanvändande, är att intervjua personer som arbetar med revisioner av statorlindningar. Att som examensarbetare försöka teoretisera över modellanvändandet leder ingenstans. Den viktigaste faktorn för en lyckosam implementering av nya modeller framkom i samband med en intervju med Thommy Karlsson (2006-01-16) och handlar om vikten av att på något sätt sammanfoga nya modeller med befintliga rutiner. Om en ny modell hamnar utanför det vanliga arbetet i en organisation, är risken stor att arbetet med den nya modellen varit förgäves. En lyckosam ny modell måste därför på ett eller annat sätt kopplas till de rutiner som redan finns i organisationen. För att konkretisera detta, kan det vara befogat med ett exempel. Om livslängdsfördelningar, multipel regressionsanalys och annat enbart finns i rapporter och liknande, är alltså risken överhängande att de inte används. Det koncept som utarbetats i samband med detta examensarbete innebär dock att olika modeller får en helt annan styra än de skulle få för sig själva. Dock måste konceptet sättas in i ett större sammanhang, vilket exempelvis skulle kunna innebära någon form av anknytning till DSD-databasen. Exakt hur detta genomförs är dock en fråga för Swedpower.

## 5.5 Nytt koncept

Viktiga utgångspunkter för konceptet har varit att dels koppla samman de båda brofästena och dels att se till att konceptet vilar på alla tre ben i tetraedern. Vid det mera praktiska brofästet finns alltså inspektioner, DSD-mätningar, samt den något mer teoretiska multipla regressionsanalysen. På den andra sidan finns de Bayesianskt baserade livslängdsfördelningarna. Eftersom allt detta är viktigt men inte direkt kan sammansmältas, bör istället ett heltäckande koncept inkluderande alla metoder skapas. Det kan med andra ord ses som en bro av metoder med olika grad av teoriinnehåll. När det gäller liknelsen med tetraedern, blir det ännu viktigare att en mångfald av metoder används, eftersom de vilar på olika ben i tetraedern. Inspektioner och DSD-mätningar, eller mera generellt, diagnostik i allmänhet, vilar nästan uteslutande på det ben som handlar om statorlindningens nuvarande kondition. Den multipla regressionsanalysen är däremot ett försök att täcka in hela tetraedern. De Bayesianskt baserade livslängdsfördelningarna vilar å andra sidan inte på något ben i tetraedern. De säger inte heller någonting om en specifik statorlindning. Allt detta är tecken på låg validitet; livslängdsfördelningarna svarar inte på de frågor som är mest intressanta ur ett revisionsperspektiv. De är dock viktiga för att mera översiktligt se var en statorlindning befinner åldersmässigt. Detta kan vara nog så viktigt om någon utomstående studerar revisionsbehoven. Figur 12 nedan visar hur en akt i konceptet skulle kunna se ut. Observera att en epoxiisolerad statorlindning inte skulle ha något resultat från en multipel regressionsanalys. I övrigt skulle dock akterna se ut som figur 12.

# A G1



|                                                  |      |
|--------------------------------------------------|------|
| I drift sedan                                    | 1958 |
| DSD-mätning                                      | 1997 |
| x1 – delta tan delta (%)                         | 1,23 |
| x2 - partiella urladdningar [nC]                 | 14,9 |
| x3 - genomsnittlig drifttid per år [h]           | 5436 |
| x4 – genomsnittligt antal start och stopp per år | 153  |
| x5 - genomsnittlig elektrisk påkänning [kV/mm]   | 1,66 |
| x6 - statorlindningens ålder [år]                | 39   |

Livslängdsfördelning asfaltisolerade statorlindningar

Ekvation från multipel regressionsanalys:

$$y_{\text{pred}} = -1,96x_1 - 0,065x_2 - 0,0014x_3 - 0,012x_4 - 2,69x_5 - 0,064x_6 + 27,38$$

I detta fall:  $y_{\text{pred}}$  [år] **7,6**  
 "Bäst före" **2005**

Avvikelser (1997)

| x1    | x2   | x3    | x4    | x5   | x6    | Genomsnitt |
|-------|------|-------|-------|------|-------|------------|
| -0,12 | 0,31 | -0,11 | -0,16 | 0,01 | -0,07 | -0,02      |

Kommentarer

Noteringar om aggregatet i allmänhet och statorlindningen i synnerhet

Figur 12 – Utformning av en akt i konceptet.

Figur 12 visar ett tänkbart koncept. Gulliksen & Göransson (2002) tankar om användarcentrering har varit vägledande i arbetet. En viktig del i användarcentreringen är att ha användarfokus, det vill säga ta hänsyn till såväl användarens som verksamhetens behov. Detta har tillgodosetts genom att ta intryck från den nuvarande revisionsprocessen och ha en dialog med anställda på Swedpower i Älvkarleby. En annan viktig del i användarcentreringen, är begreppet evolutionär utveckling. Där handlar det om att låta, i detta fall konceptet, utvecklas inkrementellt och iterativt, alltså att utveckla det i (små) steg och samverka med användaren under utvecklingsprocessen. Detta har dock bara delvis skett, eftersom konceptet inte har en sådan omfattning att ett inkrementellt arbetssätt kan motiveras. Sett ur ett längre perspektiv är det dock viktigt att förändringar av och tillägg till konceptet utförs enligt denna princip. När det gäller prototyping kan detta koncept ses som just en prototyp; efter examensarbetet är det givetvis fritt fram att förändra denna prototyp. Mest av allt har dock konceptets framtagande grundats på en användarcentrerad attityd. Det har under hela

processen funnits en idé om att konceptet måste vara anpassat till just de personer som kan tänkas använda det. I denna kategori ingår även personer utan direkt teknisk utbildning, varför konceptet gjorts lättförståeligt. Konceptet skulle i framtiden kunna fungera som ett register, där akter skrivs ut och tas med på möten och dylikt.

## 6 Diskussion

I detta avsnitt är tanken att diskutera innebörden av de resultat som examensarbetet givit. Ett annat syfte med avsnittet är att sätta resultaten i relation till tidigare känd kunskap. Först och främst bör det påpekas att själva resultaten av den multipla regressionsanalysen inte nödvändigtvis måste ses som huvudpoängen med examensarbetet. Antalet observationer är lågt och examensarbetet har därför delvis karaktären av en pilotstudie. Den multipla regressionsanalysen måste ändå sägas träffa rätt i de flesta fall och problematiken är densamma även om andra former av multipel regressionsanalys används. Det är alltså inte i första hand i den matematiska metoden problemet ligger, utan i det faktum att antalet observationer är mycket lågt. Valet av matematisk modell har istället betydelse om linjära beroenden finns mellan parametrarna. I sådana fall fungerar nämligen inte multipel regressionsanalys alls. När det gäller detta examensarbete har dock den multipla regressionsanalysen givit relativt vettiga resultat, vilket är ett tydligt tecken på att linjära beroenden inte föreligger. Som redan nämnts pekar PCA i samma riktning. Det positiva med den multipla regressionsanalysen är emellertid att den ger ett slags fingeravtryck. Jämför gärna med The Economists Big Mac-index, där priset på en hamburgare används för att visa prisnivån i ett land (The Economist, 2006). Det finns i båda fallen en relativt lågt tillförlitlighet eller reliabilitet, men det är ändå bättre att ha ett värde att diskutera, än ingenting alls. Innan den multipla regressionsanalysen genomfördes fanns i praktiken ingen indikator över huvud taget att luta sina revisionsbeslut mot. Det enda som gjorts i den riktningen var de betyg som tagits fram av Hägglund & Karlsson (2003), och som i viss mån kan ses som en föregångare till den multipla regressionsanalysen. Användare av det nya koncept som föreslagits i examensarbetet, bör också tolka den multipla regressionsanalysen som lite av ett betyg. Det vill säga inte fokusera så mycket på exakt det årtal som en statorlindning fått som sitt *bäst före-datum*, utan mera använda den multipla regressionsanalysen som ett verktyg för att se om en statorlindning är bra, dålig, eller kanske någonstans mittemellan. Färgkodningen är ett steg i den riktningen.

Det är uppenbart att multipla regressionsanalysen, och för övrigt även PLS, har en relativt låg reliabilitet, RMSE ligger omkring 2. Detta beror med all sannolikhet snarare på det låga antalet observationer än valet av regressionsmetod. Antalet observationer måste därför bli avsevärt fler för att signifikant öka reliabiliteten. Att öka antalet observationer är dock svårt, eftersom konkurrerande kraftbolag ogärna delar med sig av sina data. Även om en sådan bredare datainsamling skulle vara möjlig, finns risken att olika bolags data inte är fullt jämförbara med varandra. Inom ett enskilt kraftbolag är det knappast möjligt att få fram mera data än i detta examensarbete, eftersom de andra kraftbolagen i Sverige är mindre än Vattenfall. Dessutom har Vattenfall god uppsikt över sina aggregat, vilket innebär fler observationer. Antalet observationer kommer dock att öka med tiden, då många statorer med asfaltisolerade statorlindningar kommer att bytas ut under det närmaste decenniet. Problem är dock att den ökade reliabiliteten i den multipla regressionsanalysen kommer att gå hand i hand med ett minskande antal asfaltisolerade statorlindningar. I takt med att RMSE sjunker och analysen blir träffsäkrare, kommer värdet av den att minska. Detta kan uttryckas som att den multipla regressionsanalysen på ett sätt är framåtsyftande, medan den på ett annat är raka motsatsen. Den blir bättre med fler observationer, men tappar samtidigt sin relevans. Validiteten är dock en stark sida för den multipla regressionsanalysen eller för den delen PLS. Det är med andra ord möjligt att göra en grov indelning av de asfaltisolerade statorlindningarna. En bra statorlindning visar alltid upp goda eller åtminstone medelgoda

resultat, eller mera precist lång eller medellång återstående teknisk livslängd, i den multipla regressionsanalysen. För en dålig statorlindning blir resultaten sämre.

Ett betraktelsesätt som fanns innan detta examensarbete, var de livslängdsfördelningar som redan nämnts. Dessa togs fram med hjälp av en algoritm baserad på Bayesianska metoder. Detta minskar problemen med få observationer, eftersom faktiska livslängdsobservationer kan kombineras med expertbedömningar. Som alla analysverktyg inom detta område har de Bayesianska livslängdsfördelningarna både sina för- och nackdelar. På den positiva sidan finns givetvis det faktum att de klarar av att hantera små mängder av observationer. Den visar också på ett överskådligt sätt hur olika typer av statorlindningars livslängdsfördelning kan se ut. På den negativa sidan finns det faktum att algoritmen saknar direkt koppling till de tre hörnen i tetraedern, eftersom den bara behandlar livslängder och expertbedömningar av livslängder. Sett genom tetraeder-perspektivet finns alltså klara validitetsproblem med livslängdsfördelningarna.

Detta tetraeder-perspektiv är mer eller mindre ekvivalent med låg validitet, det vill säga det att livslängdsfördelningarna inte fullt ut besvarar de riktigt viktiga frågorna som uppkommer vid ett revisionsarbete. Hur en statorlindningstyp beter sig rent generellt är sällan särskilt intressant, eftersom det alltid rör sig om enskilda statorlindningar som skall bytas eller inte bytas. Jämförelsen med en människas livslängdsfördelning illustrerar detta på ett tydligt sätt. På den positiva sidan finns dock livslängdsfördelningarnas goda reliabilitet. För att skapa ett heltäckande och användbart koncept bör alltså vara en tillämpning av både multipel regressionsanalys och de Bayesiskt baserade livslängdsfördelningarna. På så sätt uppnås, totalt sett, såväl god validitet som god reliabilitet. Dessutom vilar konceptet tryggt på alla tre benen i tetraedern samt fungerar som ett slags löst kopplad förbindelse mellan de tänkta brofästena. För de epoxiisolerade statorlindningarna är alla former av regression uteslagna på grund av att nästan inga bytts ut av tekniska skäl. Där får istället avvikelser och livslängdsfördelningar utgöra konceptet. Möjligen skulle avvikelserna hos epoxiaggregaten också kunna viktas, till exempel utifrån resultaten från den multipla regressionsanalysen för asfaltaggregaten. I så fall skulle ett slags betyg kunna skapas, men risken för låg reliabilitet är överhängande, eftersom asfalt- och epoxiaggregaten i sådana fall skulle behandlas som väldigt lika varandra. Annorlunda uttryckt skulle det i så fall gå lika bra, eller snarare lika dåligt, att tillämpa den multipla regressionsanalysens ekvationer även på de epoxiisolerade statorlindningarna.

Som en avslutning på diskussionen kan det vara lämpligt att bredda resonemangen något. Ett inneboende problem med all form av prediktion av statorlindningars livslängd, är att antingen fås fina resultat som inte säger så mycket, eller så resulterar analysen i skakiga men intressanta resultat. Ett koncept som det som presenterats ovan, kan vara ett sätt att täcka in så många synvinklar att dessa problem reduceras. En annan viktig diskussionspunkt, är detta examensarbets koppling till STS-programmet. Det är helt uppenbart att vattenkraften omfattar sociotekniska aspekter, samt dess driftsätt påverkas av andra teknikgrenar, främst kärnkraften. När det gäller de sociotekniska aspekterna måste givetvis protesterna mot utbyggnaden av älvarna nämnas. Detta är dock i många avseende en avslutad fråga, eftersom mycket av det som idag inte är utbyggt, är skyddat. Mer aktuellt idag, är problematiken att kombinera samhällseliga krav på hög tillgänglighet med ett mer marknadsekonomiskt synsätt på elsystemet. Detta är förövrigt något som går igen i många branscher.

## 7 Slutsatser

Avsikten med detta avsnitt är att mera kortfattat redogöra för de resultat som kommit fram under examensarbetets gång. Med andra ord är avsnittet tänkt att ge koncisa svar på de frågeställningar som satt ramarna för examensarbetet. Den första frågeställningen lydde:

- Är det möjligt att utifrån data från statorlindningens design, aggregatet drift, samt statorlindningens kondition prediktera en statorlindnings livslängd?

Trots det låga antalet observationer är det rimligt att säga att det är möjligt. Helt oproblematiskt är det dock inte och antalet observationer måste utökas om högre reliabilitet skall uppnås. När det gäller nyare statorlindningar, de med epoxiisolering, är antalet observationer nästan obefintligt. I dessa fall kan därför inte analyser i stil med multipel regressionsanalys användas. Avvikelse kan dock studeras även för epoxiisolerade statorlindningar. Nästa frågeställning formulerades på följande sätt:

- Är multipel regressionsanalys ett användbart verktyg för detta ändamål?

Även i detta fall kan svaret sägas vara försiktigt positivt. Multipel regressionsanalys har visat sig vara ett ganska användbart verktyg för detta ändamål. Om det är det bästa sättet, och inte bara ett relativt bra sätt, för att utifrån data från statorlindningens design, aggregatet drift, samt statorlindningens kondition prediktera en statorlindnings livslängd, är en fråga som inte behandlas djupare i detta examensarbete. Jämfört med Partial Least Square (PLS) står sig dock den multipla regressionsanalysen i detta fall väl. Problemet ligger i dagsläget inte i vilket metod som används, utan i att antalet observationer är lågt. Det är också viktigt att återigen poängtera att såväl multipel regressionsanalys som PLS och andra regressionsmetoder endast är möjlig för de asfaltisolerade statorlindningarna. Nästa frågeställning lydde:

- Vad ger den multipla regressionsanalysen för resultat?

Som framgått ovan i rapporten ger multipla regressionsanalysen något varierande resultat beroende på vilka parametrar som väljs. För en mer ingående redovisning av resultaten hänvisas läsaren till ovanstående avsnitt. På en direkt fråga kan det dock vara på sin plats att ge ett rakt svar, med andra ord att presentera den ekvation som kan sägas vara den mest relevanta. Eftersom parametern partiella urladdningar visat sig outhållbar, och åldern sannolikt har stor betydelse för den återstående livslängden, kan följande ekvation (3) ses som det bästa valet:

- $y$  – återstående livslängd (observerad)
- $x_1$  –  $\Delta \tan \delta$  [%]
- $x_2$  – partiella urladdningar [nC]
- $x_3$  – genomsnittlig drifttid per år [h]
- $x_4$  – genomsnittligt antal start och stopp per år
- $x_5$  – genomsnittlig elektrisk påkänning [kV/mm]
- $x_6$  – statorlindningens ålder [år]

$$y_{pred(1)} = -1,96x_1 - 0,065x_2 - 0,0014x_3 - 0,012x_4 - 2,69x_5 - 0,064x_6 + 27,38 \quad (3)$$

Resultaten som fås genom denna ekvation visar att många av de asfaltisolerade statorlindningarna inom Vattenfall är i relativt dåligt skick. De är statusmässigt ofta i nivå med de asfaltisolerade statorlindningar som bytts ut på grund av haveri eller andra tekniska orsaker. Med andra ord tar den predikterade återstående livslängden slut för många statorlindningar just i detta nu. Detta behöver dock inte vara så alarmerande som det låter, eftersom en hel del statorlindningar kan ha bytts ut av tekniska skäl relativt långt innan haveririsken var överhängande. Medelfelet (RMSE) visade sig vara omkring 2 både för multipel regressionsanalys (2,19) och PLS (2,17). Med så här få observationer handlar det alltså snarare om ett slags grov uppdelning än ett precist slutdatum för en statorlindnings tekniska livslängd. Att sätta exakta slutdatum kommer givetvis aldrig vara möjligt. Så deterministiskt är inte åldringsförloppet. Detta är också analogt med att statorlindningar ofta slås ut av transienter och inte genom att de lugnt och stilla slutar fungera.

Nästa frågeställning rörde följande:

- Är det möjligt att se vilka data som har störst betydelse för en statorlindnings livslängd?

Genom att sätta in ett slags typvärden skulle det i någon mening vara möjligt att approximativt få en bild av vilka parametrar som är viktigare än andra. Hur denna typ av analys håller i en strikt matematisk mening är oklart, men det bör åtminstone ge en fingervisning om hur viktiga de olika parametrarna är. Bland annat kan då ses att en start och stopp motsvarar cirka tio timmars kontinuerlig drift. Detta ligger helt i linje med de antaganden som gjorts av generatorexperterna på Swedpower. Parametern partiella urladdningar har dock visat sin vikt på annat, nämligen genom att visa sig oumbärlig för själva multipla regressionsanalysen. Detta trots att den inte har alltför stor inverkan på den predikterade återstående tekniska livslängden. Nästa frågeställning lydde:

- För vilka *andra* komponenter skulle Bayesianskt baserade livslängdsfördelningar kunna tänkas användas?

Transformatorer, rotorpoler, samt magnetisering, är komponenter där Bayesianska livslängdsfördelningar skulle kunna tillämpas. Nästa frågeställning formulerades på följande sätt:

- Vad behövs för att framtagna metoder för livslängdsbedömningar skall användas vid revisionsbeslut?

Det enkla svaret på denna fråga, är att de nya metoderna måste integreras i de rutiner som redan finns inom organisationen. En ny metod faller annars lätt i glömska. Den sista frågeställningen lydde:

- Hur skulle ett användbart koncept inkluderande flera olika analysmetoder kunna se ut?

Detta har relativt ingående beskrivits ovan. Det kan dock vara värt att poängtera att användaren och verksamheten försökts sättas i fokus, samtidigt som en kombination av olika synsätt skapats, för att se till att den totala livslängdsbedömningen vilar på alla ben i den tänkta tetraedern. Slutligen är det viktigt att poängtera att all livslängdsbedömning av statorlindningar måste utgå ifrån såväl drift och design som nuvarande kondition.

## 8 Fortsatt arbete

I och med att detta examensarbete delvis haft karaktären av en pilotstudie, finns flera exempel på fortsatt arbete. Att göra undersökningar om förändringar i driften av vattenkraftverk, är något som ligger i linje med STS-programmet och som tydligt påvisar vattenkraftens sociotekniska karaktär. Det skulle alltså vara intressant att göra djupare studier av den alltmer utbredda intermittenta driften. En sådan undersökning skulle hypotetisk kunna bygga på intervjuer med företagsledningar, drifttekniker, med flera, inom några utvalda kraftbolag. En annan sak som skulle kunna undersökas, är kostnaden för den intermittenta driften, bör vara betydande på grund av det ökade slitaget den medför.

Under förutsättning att fler data går att ta fram, skulle sannolikt en djupare matematisk analys av problematiken vara meningsfull. Det är inte säkert att multipel regressionsanalys är det bästa sättet att behandla dessa problem. Med en ökad mängd data skulle möjligen PLS vara något bättre än multipel regressionsanalys, men det är inget det går att uttala sig om idag. Eftersom inga linjära beroenden verkar finnas, talar dock mycket föra att multipel regressionsanalys och PLS är jämbördiga. Det fortsatta arbetet bör i detta fall antingen inrikta sig på att hitta en optimal regressionsmetod, eller att granska om olika typer av regression över huvud taget är en framkomlig väg. Kanske är det istället bättre att ta ett steg tillbaka och titta på avvikelser bland statorlindningarna, för att sedan utveckla mer förfinade betygsättningsmetoder. I och med att detta arbete skulle vara av nästan enbart matematisk och teknisk karaktär, krävs gedigen teknisk-matematisk kunskap. Det också vara svårt att få in tillräckligt med data, vilket är en indikation på att denna typ av utredning kan vara svår att utföra i form av ett examensarbete. Det är nämligen högst osannolikt att ett examensarbete kan vara tillräckligt för att få konkurrerande kraftbolag att släppa ifrån sig information till varandra.

En annan typ av frågor som snabbt bör beröras, är studier av accelererade åldring. Detta hör givetvis snarast hemma inom fysiken, vilket gör det vanskligt för en icke-fysiker att göra säkra bedömningar. På ett generellt plan handlar det dock om att delar av statorlindningar exempelvis skulle kunna utsättas för olika typer av påfrestningar, förslagsvis termiska och elektriska. Olika påfrestningar skulle i en sådan studie kunna kombineras med varandra, för att få på olika sätt simulera den verkliga åldringens komplexa förlopp. Det skulle också vara möjligt att göra en djupare undersökning av diagnostikmetoder såväl offline som online, det vill säga både diagnostik på stillastående aggregat och på aggregat i drift.

Sammantaget finns därmed följande mera konkreta förslag på fortsatt arbete:

- Genomföra livslängdsstudier för andra kritiska komponenter.
- Skapa nya underlag för analyser genom att undersöka accelererad åldring.
- Förbättrade analysmetoder inom offline- och online-diagnosik.

# Referenslista

- Adeen, L., (1997). Dielektrisk statordiagnostik, DSD – A G1 & G2 (anonymiserad). Swedpower AB.
- Adeen, L., (1999). Dielektrisk statordiagnostik, DSD – O G2 (anonymiserad). Swedpower AB.
- Alsyouf, I., (2004). Cost effective maintenance for competitive advantages. Acta Wexionensia, Terotechnology 33.
- Backlund, F., (1997). Riskanalys för underhåll. Examensarbete 1997:124 C, Luleå tekniska universitet.
- Backlund, F., (2003). Managing the Introduction of Reliability-Centred Maintenance, RCM. Doctoral thesis / Luleå University of Technology 2003:16, Luleå tekniska universitet.
- Energimyndigheten (2005). Vattenkraft, [http://www.stem.se/WEB/STEMEx01Swe.nsf/F\\_PreGen01?ReadForm&MenuSelect=8F8E4079475D9AA2C1256F640050788C&WT=Energitillförsel.Elproduktion.Vattenkraft](http://www.stem.se/WEB/STEMEx01Swe.nsf/F_PreGen01?ReadForm&MenuSelect=8F8E4079475D9AA2C1256F640050788C&WT=Energitillförsel.Elproduktion.Vattenkraft) (2005-10-14)
- Kaijser, A., (1994). I fädrens spår..., Carlssons bokförlag, Stockholm.
- Geladi, P. & Kowalski, B. R., (1986). "Partial Least-squares Regression: A Tutorial." Analytica Chimica Acta, 185 (1986), 1-17.
- Gulliksen, J. & Göransson, B., (2002). Användarcentrerad systemdesign, Studentlitteratur, Lund.
- Heath, M. T., (1997). Scientific Computing – An Introductory Survey, McGraw-Hill, Singapore.
- Holmgren, A., (2004). Ökad precision i bestämning av livslängdsfördelningar genom tillämpning av Bayesisanska metoder. Examensarbete, Kungliga Tekniska Högskolan.
- Holmgren, A., (2005). Swedpower – pilotstudie: livslängdsbedömningar för statorlindning. SwedPower AB.
- Hägglund, A. & Karlsson, A., (2003). Uppdatering av databasen för dielektrisk statordiagnostik (DSD). Swedpower AB.
- Nilsson, L. R., (2005) Svensk vattenkraft ur ett europeiskt perspektiv – några exempel. Linköping studies in science and technology, Thesis 1158.
- Nyström, E. & Ståhl, K., (1995). Arbetsmetodik vid investeringsbedömningar hos Vattenfall Vattenkraft produktionsenhet Lule älv. Examensarbete 1995:031 E, Tekniska högskolan i Luleå.

Stone, G. C., Boulter E. A., Culbert I. & Dhirani H. (2004). Electrical Insulation for Rotating Machines – Design, Evaluation, Ageing, Testing, and Repair. Wiley-Interscience, USA.

Storesund, J., (2004). Handbok för livslängdsarbete med energianläggningar. Värmeforsk, projektnummer A4-209, rapportnummer 885.

Strand, K., (2003). Energiförluster och potential i vattenvägarna i befintlig svensk vattenkraft. Examensarbete UPTEC W03 012, Uppsala tekniska högskola, Uppsala universitet.

Svensk Energi (2005). Så tillverkas el – vattenkraft,  
<http://www.svenskenergi.se/energifakta/vattenkraft.htm> (2005-10-25)

Swedpower (2005). Företaget, [http://www.swedpower.se/fakta\\_om\\_swp/foretaget.shtml](http://www.swedpower.se/fakta_om_swp/foretaget.shtml) (2005-10-25)

The Economist (2006). Big Mac index,  
[http://www.economist.com/markets/bigmac/displayStory.cfm?story\\_id=5389856](http://www.economist.com/markets/bigmac/displayStory.cfm?story_id=5389856) (2006-01-17)

Vattenfall (2005a). Stornorrfors kraftverk,  
[http://www.vattenfall.se/om\\_vattenfall/var\\_verksamhet/var\\_produktion/vara\\_anlaggningar/stornorrfors.asp](http://www.vattenfall.se/om_vattenfall/var_verksamhet/var_produktion/vara_anlaggningar/stornorrfors.asp) (2005-10-14)

Vattenfall (2005b). Från lokaldrift till nationellt nät,  
[http://www.vattenfall.se/om\\_vattenfall/var\\_verksamhet/om\\_oss/historia/historia5.asp](http://www.vattenfall.se/om_vattenfall/var_verksamhet/om_oss/historia/historia5.asp) (2005-10-25)

Vattenfall (2005c). Avreglering och bolagsbildning,  
[http://www.vattenfall.se/om\\_vattenfall/var\\_verksamhet/om\\_oss/historia/historia8.asp](http://www.vattenfall.se/om_vattenfall/var_verksamhet/om_oss/historia/historia8.asp) (2005-10-25)

Vattenfall (2006). Framtid,  
[http://www.vattenfall.se/om\\_vattenfall/energikunskap/vatten/framtid.asp](http://www.vattenfall.se/om_vattenfall/energikunskap/vatten/framtid.asp) (2006-01-30)

Wikipedia (2006a). Regression analysis, [http://en.wikipedia.org/wiki/Regression\\_analysis](http://en.wikipedia.org/wiki/Regression_analysis) (2006-02-15)

Wikipedia (2006b). Mean Squared Error, <http://en.wikipedia.org/wiki/RMSE> (2006-02-15)

Winstat (2006). Winstat, <http://www.winstat.de/swedish/index.htm> (2006-02-06)

Växjö universitet (2005). Systemekonomi (teroteknologi),  
[http://www.vxu.se/presscenter/pressreleaser/030206\\_balnajjar.html](http://www.vxu.se/presscenter/pressreleaser/030206_balnajjar.html) (2005-09-28)

Östberg, J., (2000). Dielektrisk statordiagnostik, DSD – I G1 (anonymiserad). Swedpower AB.

Östberg, J., (2001). Dielektrisk statordiagnostik, DSD – Q G1 (anonymiserad). Swedpower AB.

## Intervjuer

Berg, M., Swedpower, Älvkarleby, samtal under arbetets gång.

Carlsson, B., professor Uppsala universitet, samtal och mailkontakt under arbetets gång.

Gabrielsson, A., Swedpower, Stockholm, intervju 2005-09-21 samt mailkontakt vid senare tillfällen.

Karlsson, T., handledare, Swedpower, Älvkarleby, adjungerad professor Luleå tekniska högskola, samtal under arbetets gång.

Reis-Jende, G., Swedpower, Stockholm, mailkontakt under hösten 2005.

Östberg, J., Swedpower, Älvkarleby, samtal under arbetets gång.

# Bilagor

## Bilaga 1 - Begreppsdefinitioner

- Vattenkraftverk – Detta syftar på hela anläggningen. En anläggning med fler än ett aggregat definieras ändå som ett vattenkraftverk.
- Aggregat – Ett aggregat är en uppsättning generator, turbin och så vidare. Med andra ord kan ett vattenkraftverk ha flera aggregat.
- Effekt – Energiomvandling per tidsenhet, mäts i watt [W].
- Elektriskt fält – kraftfält som omger elektriskt laddade kroppar.
- Elektrisk spänning – elektrisk potentialskillnad, mäts i volt [V].
- Elektrisk ström – elektriska laddningar i rörelse, mäts i amperer [A].
- Energi – förmåga att utföra arbete, mäts i joule [J].
- Generator – Generatoren är den del av aggregatet där elektriciteten utvinns. Den sätts i rotation av vattnet via turbinen och turbinaxeln. Generatoren roterande del kallas rotorn, medan den stationära kallas statorn.
- Statorlindning – Utgör en del av statorn, som i sin tur är en del av generatoren. I statorlindningen finns den kopparkärna, där strömmen induceras.
- Revision – Större arbeten i form av reparation, underhåll eller dylikt i befintligt kraftverk. Notera att ordet revision i detta fall har en annan innebörd än i ekonomiska sammanhang.
- Reinvestering – Investering i form av reparation, underhåll eller dylikt i befintligt kraftverk. En reinvestering kan sägas vara de ekonomiska resurser som avsätts för en revision av ett kraftverk.

## Bilaga 2 – Vattenkraftens framväxt

Att använda vattenkraft för att exempelvis driva kvarnar och sågar, går att spåra mycket långt tillbaka i tiden. För förklara uppkomsten av den elproducerande vattenkraften, måste först en kortfattad historik över de tidiga elsystemen presenteras. I Sverige byggdes de första elsystemen i mitten av 1880-talet. Kraftproduktionen i dessa tidiga elsystem utgjordes till stor del av koleldade kraftverk. Distributionen skedde med likström vid låga spänningar, vilket medförde stora överföringsförluster. Detta innebar att de tidiga elsystemen hade mycket begränsad utsträckning, kanske till en stadskärna eller ett industriområde. Elsystemens lokala karaktär ledde till att de främst sågs som en angelägenhet för kommunala myndigheter eller industriföretag. Staten visade i detta skede mycket begränsat intresse (Kaijser, 1994).

Under 1890-talet fick växelströmtekniken sitt genombrott, vilket möjliggjorde lägre överföringsförluster, då växelspanning enkelt kan höjas med hjälp av transformatorer. Det var med andra ord växelströmtekniken, som möjliggjorde uppbyggnaden av regionala elsystem, baserade på exempelvis vattenkraft. För att utnyttja vattenkraften för elproduktion krävdes dock ny lagstiftning, och elsystemens expansion blev därmed en fråga för staten. Utan att gå in alltför djupt på lagstiftningsområdet, kan problemen med de då rådande lagarna sammanfattas till att enskilda strandägare kunde motsätta sig utbyggnaden av vattenkraftverk. Samma sak gällde byggandet av kraftledning. Ett annat juridiskt bekymmer för vattenkraften, var att det i många vattendrag av hävd fanns en så kallad kungsådra, vilket innebar att mittfåran skulle lämnas öppen för transporter, fiske och andra allmänna ändamål. Den här typen lagliga hinder för vattenkraften undanröjdes under 1800-talets sista år och början av 1900-talet (Kaijser, 1994).

En annan avgörande fråga för den svenska vattenkraften handlade om vad staten skulle göra med de vattenfall som var helt eller delvis statligt ägda. 1899 tillsatte regeringen en vattenfallskommitté, som 1903 lade fram ett betänkande där två alternativ diskuterades, nämligen att staten antingen skulle sälja eller arrendera ut de berörda vattenfallen. Kommittén förespråkade det senare alternativet och föreslog att ett nytt statligt organ, vattenfallskommissionen, skulle inrättas. Tanken var att detta organ skulle ha som uppgift att förvalta statens vattenfall och förhandla om utarrendering. På grund av de juridiska turerna kring moderniseringen av Trollhätte kanal, och byggandet av ett kraftverk i anslutning till denna, kom vissa förutsättningar att förändras. Vid Trollhätte kanal hade staten nämligen varit delägare, men för att lösa de juridiska svårigheterna gick staten in som ensam byggare av det planerade kraftverket. Därmed hade den svenska staten för första gången engagerat sig som en byggare av de svenska elsystemen. Att tala om ett svenskt elsystem skulle vid denna tid vara missvisande, fram till mitten av 1930-talet hade elsystemen endast regional utbredning. Någon vattenfallskommission blev dock inte av, istället ombildades styrelsen för Trollhättekanal och vattenverk den 1 januari 1909 till Kungl. Vattenfallsstyrelsen, det som idag heter Vattenfall AB (Kaijser, 1994). Ett av de allra första vattenkraftverk som byggdes av Kungl. Vattenfallsstyrelsen var Olidan i Trollhättan. Detta kraftverk kan ses på figur 13 nedan:



*Figur 13 – Olidans kraftverk.*

Allt detta skedde utan utländska förebilder; Sverige var vid den här tiden det enda landet i världen där staten i egen regi byggde ut stora vattenkraftverk. Det bör dock poängteras att de flesta vattenkraftverken, även i Sverige, byggdes i privat regi. På grund av att det var så kapitalkrävande att bygga vattenkraftverk, gick ofta kommuner och elintensiva industrier ihop och bildade kraftbolag. Medan Kungl. Vattenfallsstyrelsen och kraftbolagen stod för elproduktionen, skötte kommunala elverk och kooperativa distributionsföreningar distributionen till konsumenterna. Under Första världskriget rådde fotogenbrist i Sverige, vilket ledde till en snabb utbyggnad av elnäten, inte minst på landsbygden. Eftersom statens roll in byggandet av distributionsnät var liten, finansierades den svenska elektrifieringen till stor del av dessa kommunala elverk och kooperativa distributionsföreningar (Kaijser, 1994).

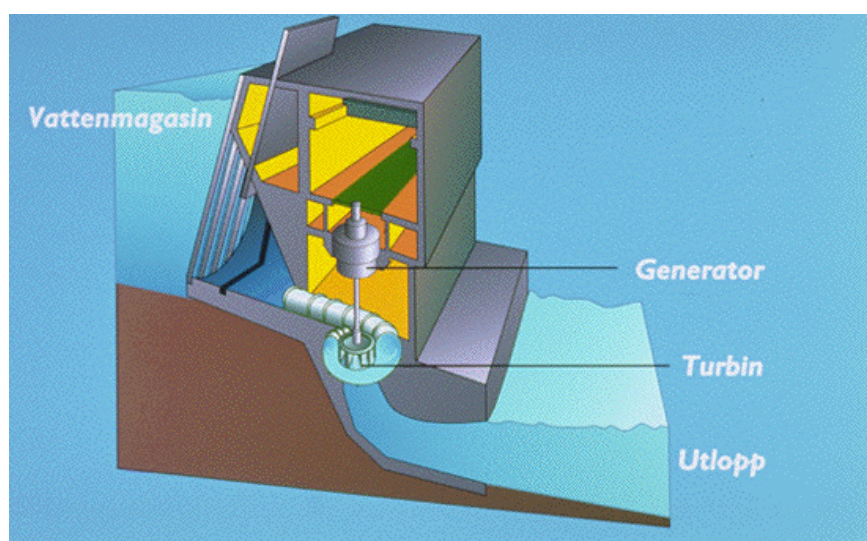
Det var alltså först på 1930-talet elsystemen i Sverige var så sammanlänkade, att det är möjligt att tala om ett elsystem. I samband med Andra världskriget bildades Centrala driftledningen, CDL, i syfte att samordna landet tio största kraftproducenter. Detta kom sedan efter kriget att permanentas, samtidigt som Kungl. Vattenfallsstyrelsen så småningom fick ensamrätt när det gällde det svenska stamlinjenätet (Kaijser, 1994). 1952 koppades så hela det svenska elnätet samman med hjälp av 400-kilovoltsledningen mellan Harsprånget och Hallsberg. Nu kunde konsumenterna i Syd- och Mellansverige få del av Luleälvens elproduktion (Vattenfall, 2005b). Det är också vid denna tid som den verkliga intensiva utbyggnaden av svensk vattenkraft sker. Denna period inleddes kring 1940 för att vara så gott som avslutad 1970, och sammanfaller med den tidsperiod då så många andra delar av samhällets infrastruktur utvecklades kraftigt både vad gäller storlek och omfattning. Som nämnts tidigare har det dock sedan 1970-talen har endast byggts några få vattenkraftverk i Sverige, vilket givetvis till största del har att göra med att riksdagen beslutat att genom lagstiftning skydda ett antal älvar och älvräckor. Detta har drastiskt minskat antalet platser, där vattenkraftsutbyggnad skulle vara möjlig (Energimyndigheten, 2005).

Avregleringen av elmarknaden kom delvis som ett svar på att elförbrukningen från 1980-talet och framåt stagnerat. Men viljan att avreglera hade också en bakgrund i en förändrad syn på infrasytemen i stort, ett synsätt som till stor del hade sin grund i politiska händelserna kring 1990: Berlinmurens fall, Sveriges kommande EU-medlemskap, etcetera. För att kunna hävda sig i konkurrensen på en fri marknad, måste Vattenfall bolagiseras och myndighetsrollen

flyttas över till andra myndigheter, såsom Svenska Kraftnät. Bolagiseringen av Vattenfall skedde 1992 (Vattenfall, 2005c).

## Bilaga 3 – Kortfattad teknisk beskrivning av vattenkraftaggregat.

Detta avsnitt är främst riktat till dem som inte är insatta i vattenkraftindustrin, men kan möjligen till någon del vara intressant även för mer insatta. Källan till all vattenkraft är solen. Solstrålningen avdunstar det vatten som finns på jordens yta och fördelar det i form av regn på olika platser med olika höjd över havet. Det finns alltså vatten med olika mängd lägesenergi. På nivåer högt över havsytan finns således de högsta lägesenergierna. Genom att vattnet strömmar från en högre nivå till en lägre, transformeras lägesenergin till rörelseenergi. Det är denna rörelseenergi som tas till vara i en vattenkraftsanläggning. På sin väg nedåt passerar nämligen vattnet en turbin, som sätts i rotation, vilket visas i figur 14 (Svensk Energi, 2005). Även om figur 14 visar en ovanjordsstation, är principen densamma för underjordiska kraftverk. Dock finns vanligtvis fler än ett aggregat i ett vattenkraftverk. Detta gäller oavsett hur kraftverket är placerat.



Figur 14 – Principskiss över ett vattenkraftverk med ett aggregat.

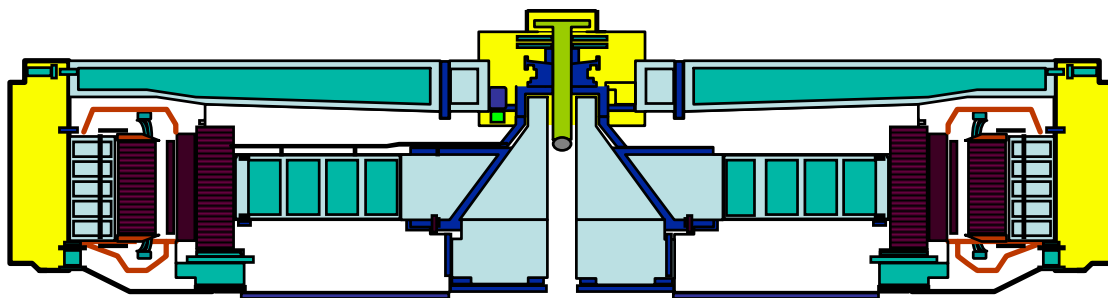
För att få en bredare bild av ett vattenkraftaggregat, kan det vara befogat att först titta närmare på turbinen. En turbin är inte bara dess löphjul, utan även eventuella inloppstuber, ett spiralformat inlopp samt ett sugrör. Sugröret är det rör som leder iväg vattnet ut ur aggregatet. Något förenklat kan turbinen sägas vara hela det system vattnet strömmar igenom i ett vattenkraftsaggregat. Vattnet når alltså löphjulet via det spiralformade inloppet, som har öppningar med jämna mellanrum, där vattnet i rätt riktning tillåts komma in till löphjulet. I dessa öppningar finns så kallade ledskenor som justerar vattnets riktning för att få högsta möjliga verkningsgrad, men som också helt kan utestänga vattnet vid ett driftstopp.

Beroende på fallhöjd och vattenflöde kan olika turbintyper väljas. Om fallhöjden är hög används med fördel aktionsturbiner. Dessa arbetar vid atmosfärstryck; vattnet behöver inte genomgå någon tryckförändring vid passagen genom turbinen. Aktionsturbiner kan därför placeras utan inneslutning i vattenkraftverket. Rent praktiskt fungerar de på så sätt att vattenstrålar skjuts mot en löphjul bestående av skovlar. Aktionsturbiner förekommer dock inte i Sverige, eftersom svensk vattenkraft nästan uteslutande använder sig av låga fallhöjder. Den andra huvudtypen av turbinen kallas reaktionsturbiner. Till skillnad från aktionsturbinerna är reaktionsturbinerna helt inneslutna i vatten och arbetar vid ett visst tryck. Reaktionsturbinerna kan sedan delas in i flera typer. De vanligaste är Francis- och Kaplan-turbiner. Francis-turbinerna används vid medelhöga fallhöjder och fungerar så att

vattnet leds radiellt genom ledskenorna in i löphjulet, för att sedan falla nedåt i sugröret. Vid låga fallhöjder används istället Kaplanturbiner. Dessa har propellerliknande löphjul och vattnet leds in via ledskenorna, men till skillnad från Francisturbinerna, är Kaplanturbinernas löphjul placerar något lägre än ledskenorna. Vattnet strömmar alltså ovanifrån ner på löphjulet.

För att utnyttja så stor del av bruttofallhöjden som möjligt, vill vattenkraftkonstruktörerna ha ett så stort tryckfall som möjligt över turbinen. Med andra ord är det önskvärt att ha ett lågt tryck i sugröret. Problemet är dock att trycket riskerar att sjunka under ångbildningstrycket och därmed skapa ångblåsor i vattnet. Detta fenomen kallas kavitation och ger upphov till skador på turbinen samt sänker verkningsgraden. Anledningen att konstruktörerna ändå är intresserade att skapa en så stor tryckskillnad som möjligt, är att vattnets kraft mot löphjulets blad blir större. Detta kan härledas ur Bernoullis ekvation, men är knappast något som är relevant för detta examensarbete. Efter turbinen strömmar vattnet som bekant genom sugröret. I början av sugröret, strax efter turbinen, är alltså ett lågt tryck önskvärt, om än inte så lågt att kavitationer uppstår. Vid sugrörets mynning vill konstruktörerna i stället ha atmosfärstryck. Sugröret mynnar antingen ut i en avloppstunnel eller i ett nedre magasin. Därifrån strömmar vattnet ner mot nästa vattenkraftverk eller mot havet (Strand, 2003).

I fokus för detta examensarbete ligger dock statorlindningen, vilken som bekant är en del av statorn som i sin tur är en del av generatoren. Kopplingen mellan turbin och generator fungerar på så sätt att det roterande löphjulet via en turbinaxel driver generatoren som omvandlar vattnets rörelseenergi till elektrisk energi. Denna elektricitet transformeras sedan upp till en högre spänning och transporteras vidare ut på elnätet (Svensk Energi, 2005). En generator består av en rotor som är magnetiserad och roterar med turbinaxeln. Denna rotor inducerar en ström i statorlindningen, som är en del av generators stationära del, statorn. Mera precist är det i statorlindningens kopparkärna strömmen induceras. Därifrån leds strömmen till transformatorer som höjder spänningen och skickar ut strömmen på elnätet. Figur 15 illustrerar en generator:



*Figur 15 – Principskiss över en generator.*

## Bilaga 4 – Uträkning av medelvärde för epoxiisolerade

Tabell 17 visar uträkningen för medelvärden hos epoxiisolerade statorlindningar. Medel 1 svarar mot alla noteringar (såväl de med svart som med brun text). Medel 2 svarar mot de senaste noteringarna (endast de med svart text).

Tabell 17 – Medelvärdesuträkningar för avvikelser hos epoxiisolerade statorlindningar.

| Epoxi<br>Aggregat | x1    | x2   | x3   | x4  | x5   | X6   |
|-------------------|-------|------|------|-----|------|------|
| U G1              | 0,32  | 8    | 5688 | 177 | 2,08 | 29   |
| U G1              | 0,26  | 28,9 | 5688 | 177 | 2,08 | 33   |
| V G1              | 0,34  | 11,8 | 5892 | 253 | 3,37 | 9    |
| V G1              | 0,38  | 1,8  | 5892 | 253 | 3,37 | 11   |
| Z G1              | 0,48  | 2,7  | 7512 | 25  | 1,96 | 32   |
| Z G1              | 0,52  | 0,8  | 7512 | 25  | 1,95 | 34   |
| Z G2              | 0,4   | 0,8  | 8112 | 27  | 1,96 | 32   |
| S G3              | 0,68  | 4,5  | 6036 | 216 | 1,66 | 31   |
| AA G1             | 0,18  | 7,4  | 7524 | 71  | 2,11 | 10   |
| AB G1             | 0,22  | 1,5  | 5628 | 142 | 2,04 | 29   |
| AC G1             | 0,48  | 4,9  | 6492 | 247 | 2,82 | 25   |
| F G3              | 0,38  | 5,8  | 5712 | 288 | 2,3  | 0    |
| F G3              | 0,34  | 0,8  | 5712 | 288 | 2,3  | 2    |
| AD G2             | 0,16  | 1    | 5928 | 216 | 2,14 | 16   |
| J G3              | 0,22  | 5,1  | 6480 | 67  | 2,06 | 9    |
| D G3              | 0,38  | 9,4  | 6048 | 254 | 3    | 18   |
| M G1              | 0,2   | 1,68 | 7104 | 72  | 1,95 | 19   |
| M G2              | 0,18  | 0,7  | 7284 | 156 | 1,95 | 12   |
| M G2              | 0,18  | 0,9  | 7284 | 156 | 1,95 | 15   |
| AE G3             | 0,92  | 1,6  | 6552 | 240 | 2,1  | 29   |
| AF G11            | 1,04  | 11,6 | 3636 | 482 | 2,89 | 26   |
| AF G11            | 1,02  | 11,6 | 3636 | 482 | 2,87 | 28   |
| AF G12            | 0,92  | 12,9 | 3576 | 426 | 2,89 | 21   |
| AG G1             | 0,34  | 7,3  | 5208 | 276 | 2,15 | 26   |
| AH G1             | 0,3   | 1,9  | 4824 | 149 | 2,78 | 18   |
| G G1              | 0,16  | 18,5 | 8136 | 24  | 1,62 | 39   |
| AI G1             | 0,24  | 1,5  | 5928 | 204 | 2,05 | 20   |
| AI G1             | 0,18  | 1,4  | 5928 | 204 | 2,05 | 20   |
| AJ G1             | 0,64  | 1,1  | 6492 | 264 | 2,6  | 20   |
| A G3              | 0,28  | 1,5  | 4704 | 193 | 2,68 | 18   |
| A G4              | 0,72  | 63,2 | 5964 | 145 | 3,03 | 18   |
| A G4              | 0,64  | 10   | 5964 | 145 | 3,03 | 10   |
| O G1              | 0,24  | 2,6  | 7032 | 36  | 2,19 | 8    |
| AK G1             | 0,54  | 3,6  | 6552 | 228 | 1,98 | 22   |
| AK G2             | 0,3   | 7,7  | 4056 | 312 | 2    | 26   |
| AL G1             | 1,08  | 4,8  | 5100 | 177 | 2,82 | 21   |
| AL G2             | 0,82  | 6,5  | 4932 | 178 | 2,82 | 23   |
| Medel 1           | 0,451 | 7,24 | 5993 | 197 | 2,37 | 20,5 |
| Medel 2           | 0,452 | 7,44 | 6005 | 191 | 2,34 | 21,4 |

## Bilaga 5 – Avvikelser för alla epoxiisolerade

Tabell 18 visar avvikelserna från medelvärdena när samtliga epoxiisolerade statorlindningar tagits med (jämför svart och brun text). Avvikelserna beräknas utifrån medel 1. Under förutsättning att alla sex parametrar har lika stor betydelse, skulle genomsnittsavvikelsen kunna ses som ett betyg.

Tabell 18 – Avvikelser hos epoxiisolerade statorlindningar utifrån medel 1.

| Epoxi<br>Aggregat | x1    | x2    | x3    | x4    | x5    | x6    | Genomsnitt |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| U G1              | -0,29 | 0,11  | -0,05 | -0,10 | -0,12 | 0,41  | -0,01      |
| U G1              | -0,42 | 2,99  | -0,05 | -0,10 | -0,12 | 0,61  | 0,48       |
| V G1              | -0,25 | 0,63  | -0,02 | 0,29  | 0,42  | -0,56 | 0,09       |
| V G1              | -0,16 | -0,75 | -0,02 | 0,29  | 0,42  | -0,46 | -0,11      |
| Z G1              | 0,06  | -0,63 | 0,25  | -0,87 | -0,17 | 0,56  | -0,13      |
| Z G1              | 0,15  | -0,89 | 0,25  | -0,87 | -0,18 | 0,66  | -0,15      |
| Z G2              | -0,11 | -0,89 | 0,35  | -0,86 | -0,17 | 0,56  | -0,19      |
| S G3              | 0,51  | -0,38 | 0,01  | 0,10  | -0,30 | 0,51  | 0,07       |
| AA G1             | -0,60 | 0,02  | 0,26  | -0,64 | -0,11 | -0,51 | -0,26      |
| AB G1             | -0,51 | -0,79 | -0,06 | -0,28 | -0,14 | 0,41  | -0,23      |
| AC G1             | 0,06  | -0,32 | 0,08  | 0,26  | 0,19  | 0,22  | 0,08       |
| F G3              | -0,16 | -0,20 | -0,05 | 0,46  | -0,03 | -1,00 | -0,16      |
| F G3              | -0,25 | -0,89 | -0,05 | 0,46  | -0,03 | -0,90 | -0,27      |
| AD G2             | -0,65 | -0,86 | -0,01 | 0,10  | -0,10 | -0,22 | -0,29      |
| J G3              | -0,51 | -0,30 | 0,08  | -0,66 | -0,13 | -0,56 | -0,35      |
| D G3              | -0,16 | 0,30  | 0,01  | 0,29  | 0,27  | -0,12 | 0,10       |
| M G1              | -0,56 | -0,77 | 0,19  | -0,63 | -0,18 | -0,07 | -0,34      |
| M G2              | -0,60 | -0,90 | 0,22  | -0,21 | -0,18 | -0,42 | -0,35      |
| M G2              | -0,60 | -0,88 | 0,22  | -0,21 | -0,18 | -0,27 | -0,32      |
| AE G3             | 1,04  | -0,78 | 0,09  | 0,22  | -0,11 | 0,41  | 0,15       |
| AF G11            | 1,31  | 0,60  | -0,39 | 1,45  | 0,22  | 0,27  | 0,58       |
| AF G11            | 1,26  | 0,60  | -0,39 | 1,45  | 0,21  | 0,36  | 0,58       |
| AF G12            | 1,04  | 0,78  | -0,40 | 1,17  | 0,22  | 0,02  | 0,47       |
| AG G1             | -0,25 | 0,01  | -0,13 | 0,40  | -0,09 | 0,27  | 0,04       |
| AH G1             | -0,33 | -0,74 | -0,20 | -0,24 | 0,17  | -0,12 | -0,24      |
| G G1              | -0,65 | 1,56  | 0,36  | -0,88 | -0,32 | 0,90  | 0,16       |
| AI G1             | -0,47 | -0,79 | -0,01 | 0,04  | -0,13 | -0,03 | -0,23      |
| AI G1             | -0,60 | -0,81 | -0,01 | 0,04  | -0,13 | -0,03 | -0,26      |
| AJ G1             | 0,42  | -0,85 | 0,08  | 0,34  | 0,10  | -0,03 | 0,01       |
| A G3              | -0,38 | -0,79 | -0,22 | -0,02 | 0,13  | -0,12 | -0,23      |
| A G4              | 0,60  | 7,73  | 0,00  | -0,26 | 0,28  | -0,12 | 1,37       |
| A G4              | 0,42  | 0,38  | 0,00  | -0,26 | 0,28  | -0,51 | 0,05       |
| O G1              | -0,47 | -0,64 | 0,17  | -0,82 | -0,08 | -0,61 | -0,41      |
| AK G1             | 0,20  | -0,50 | 0,09  | 0,16  | -0,16 | 0,07  | -0,02      |
| AK G2             | -0,33 | 0,06  | -0,32 | 0,59  | -0,16 | 0,27  | 0,02       |
| AL G1             | 1,40  | -0,34 | -0,15 | -0,10 | 0,19  | 0,02  | 0,17       |
| AL G2             | 0,82  | -0,10 | -0,18 | -0,09 | 0,19  | 0,12  | 0,13       |

## Bilaga 6 – Avvikelser för senaste mätning epoxiisolerade

Tabell 19 visar avvikelserna från medelvärdena när enbart de senaste noteringarna för epoxiisolerade statorlindningar beaktats (jämför svart text). Avvikelseberäkningen beräknas utifrån medel 2. Under förutsättning att alla sex parametrar har lika stor betydelse, skulle genomsnittsavvikelsen kunna ses som ett betyg.

Tabell 19 – Avvikelser hos epoxiisolerade statorlindningar utifrån medel 2.

| Epoxi<br>Aggregat | x1    | x2    | x3    | x4    | x5    | x6    | Genomsnitt |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| U G1              | -0,43 | 2,88  | -0,05 | -0,07 | -0,11 | 0,54  | 0,46       |
| V G1              | -0,16 | -0,76 | -0,02 | 0,32  | 0,44  | -0,49 | -0,11      |
| Z G1              | 0,15  | -0,89 | 0,25  | -0,87 | -0,17 | 0,59  | -0,16      |
| Z G2              | -0,12 | -0,89 | 0,35  | -0,86 | -0,16 | 0,49  | -0,20      |
| S G3              | 0,50  | -0,40 | 0,01  | 0,13  | -0,29 | 0,45  | 0,07       |
| AA G1             | -0,60 | -0,01 | 0,25  | -0,63 | -0,10 | -0,53 | -0,27      |
| AB G1             | -0,51 | -0,80 | -0,06 | -0,26 | -0,13 | 0,35  | -0,23      |
| AC G1             | 0,06  | -0,34 | 0,08  | 0,29  | 0,20  | 0,17  | 0,08       |
| F G3              | -0,25 | -0,89 | -0,05 | 0,51  | -0,02 | -0,91 | -0,27      |
| AD G2             | -0,65 | -0,87 | -0,01 | 0,13  | -0,09 | -0,25 | -0,29      |
| J G3              | -0,51 | -0,31 | 0,08  | -0,65 | -0,12 | -0,58 | -0,35      |
| D G3              | -0,16 | 0,26  | 0,01  | 0,33  | 0,28  | -0,16 | 0,09       |
| M G1              | -0,56 | -0,77 | 0,18  | -0,62 | -0,17 | -0,11 | -0,34      |
| M G2              | -0,60 | -0,88 | 0,21  | -0,18 | -0,17 | -0,30 | -0,32      |
| AE G3             | 1,03  | -0,78 | 0,09  | 0,26  | -0,10 | 0,35  | 0,14       |
| AF G11            | 1,25  | 0,56  | -0,39 | 1,52  | 0,22  | 0,31  | 0,58       |
| AF G12            | 1,03  | 0,73  | -0,40 | 1,23  | 0,23  | -0,02 | 0,47       |
| AG G1             | -0,25 | -0,02 | -0,13 | 0,44  | -0,08 | 0,21  | 0,03       |
| AH G1             | -0,34 | -0,74 | -0,20 | -0,22 | 0,19  | -0,16 | -0,25      |
| G G1              | -0,65 | 1,49  | 0,35  | -0,87 | -0,31 | 0,82  | 0,14       |
| AI G1             | -0,47 | -0,80 | -0,01 | 0,07  | -0,13 | -0,07 | -0,23      |
| AJ G1             | 0,41  | -0,85 | 0,08  | 0,38  | 0,11  | -0,07 | 0,01       |
| A G3              | -0,38 | -0,80 | -0,22 | 0,01  | 0,14  | -0,16 | -0,23      |
| A G4              | 0,59  | 7,49  | -0,01 | -0,24 | 0,29  | -0,16 | 1,33       |
| O G1              | -0,47 | -0,65 | 0,17  | -0,81 | -0,07 | -0,63 | -0,41      |
| AK G1             | 0,19  | -0,52 | 0,09  | 0,19  | -0,16 | 0,03  | -0,03      |
| AK G2             | -0,34 | 0,03  | -0,32 | 0,63  | -0,15 | 0,21  | 0,01       |
| AL G1             | 1,39  | -0,35 | -0,15 | -0,07 | 0,20  | -0,02 | 0,17       |
| AL G2             | 0,81  | -0,13 | -0,18 | -0,07 | 0,20  | 0,07  | 0,12       |

## Bilaga 7 – Uträkning av medelvärde för asfaltisolerade

Tabell 20 visar uträkningen för medelvärden hos de asfaltisolerade statorlindningarna. Medel 3 svarar mot alla noteringar (såväl de med svart som med brun text). Medel 4 svarar mot de senaste noteringarna för asfaltisolerade statorlindningar i drift (endast de med svart text).

Tabell 20 – Medelvärdesuträkningar för avvikelser hos asfaltisolerade statorlindningar.

| Asfalt<br>Aggregat | x1   | x2   | x3   | x4  | x5   | x6 |
|--------------------|------|------|------|-----|------|----|
| H G1               | 1,48 | 13,4 | 6936 | 168 | 1,56 | 41 |
| H G1               | 1,78 | 17,8 | 6936 | 168 | 1,56 | 48 |
| H G2               | 0,94 | 24,1 | 6000 | 132 | 1,56 | 40 |
| H G2               | 1,32 | 5,6  | 6000 | 132 | 1,56 | 47 |
| H G3               | 1,34 | 13,2 | 6468 | 132 | 1,56 | 39 |
| H G3               | 1,68 | 3,5  | 6468 | 132 | 1,56 | 43 |
| H G4               | 0,34 | 16   | 7356 | 72  | 1,56 | 34 |
| S G4               | 2,28 | 22   | 6612 | 204 | 1,4  | 38 |
| S G4               | 2,68 | 9    | 6612 | 204 | 1,4  | 45 |
| S G4               | 2,38 | 5,6  | 6612 | 204 | 1,4  | 48 |
| B G1               | 1,02 | 20,2 | 6444 | 117 | 1,3  | 42 |
| B G2               | 1,46 | 9    | 6108 | 190 | 1,3  | 40 |
| I G1               | 2,38 | 2,7  | 1224 | 204 | 1,72 | 48 |
| I G2               | 3,76 | 11,3 | 2004 | 378 | 1,72 | 48 |
| I G3               | 2,8  | 9,5  | 2976 | 473 | 1,72 | 48 |
| C G1               | 0,58 | 1,6  | 7992 | 60  | 2    | 37 |
| C G1               | 1,02 | 9,3  | 7992 | 60  | 2    | 42 |
| C G1               | 0,58 | 1,6  | 7992 | 60  | 2    | 37 |
| C G1               | 1,02 | 9,3  | 7992 | 60  | 2    | 42 |
| C G2               | 0,78 | 8,8  | 6204 | 216 | 2    | 37 |
| F G1               | 0,86 | 17,5 | 3528 | 420 | 1,74 | 40 |
| F G1               | 0,94 | 6,6  | 3528 | 420 | 1,74 | 48 |
| F G2               | 1,96 | 8,2  | 4440 | 372 | 1,74 | 47 |
| F G2               | 1,96 | 8,2  | 4440 | 372 | 1,74 | 47 |
| F G3               | 3,74 | 7,7  | 5712 | 288 | 1,74 | 39 |
| J G1               | 0,54 | 9,1  | 6492 | 63  | 1,8  | 35 |
| J G2               | 0,98 | 49   | 7632 | 45  | 1,8  | 41 |
| J G2               | 0,8  | 15,2 | 7632 | 45  | 1,8  | 43 |
| K G1               | 0,14 | 7,4  | 5508 | 168 | 1,07 | 53 |
| L G1               | 0,94 | 3,5  | 3240 | 331 | 1,64 | 45 |
| D G1               | 1,64 | 3,5  | 5079 | 282 | 1,97 | 39 |
| D G1               | 1,44 | 17,1 | 5079 | 282 | 1,97 | 35 |
| D G2               | 2,56 | 13,6 | 5148 | 307 | 1,97 | 36 |
| M G3               | 3,06 | 11,2 | 7560 | 96  | 1,55 | 43 |
| E G1               | 0,62 | 13,2 | 7524 | 60  | 1,27 | 41 |
| E G2               | 0,88 | 7,8  | 7932 | 72  | 1,27 | 41 |
| N G1               | 0,82 | 8,6  | 7644 | 131 | 1,86 | 33 |
| G G3               | 0,34 | 5,3  | 8208 | 48  | 1,41 | 43 |
| G G3               | 0,64 | 19   | 8208 | 48  | 1,41 | 49 |
| T G1               | 1,26 | 15,2 | 6648 | 183 | 1,76 | 35 |
| T G1               | 1,3  | 3,2  | 6648 | 183 | 1,76 | 41 |
| A G1               | 1,22 | 14,9 | 5436 | 153 | 1,66 | 39 |

|         |       |      |      |     |      |      |
|---------|-------|------|------|-----|------|------|
| A G2    | 0,96  | 4,6  | 5460 | 164 | 1,66 | 38   |
| O G2    | 3,12  | 6    | 7752 | 84  | 1,63 | 43   |
| P G2    | 0,3   | 7    | 6504 | 154 | 1,58 | 41   |
| Q G1    | 0,96  | 29   | 6324 | 136 | 1,39 | 44   |
| Q G2    | 0,52  | 19,3 | 6396 | 154 | 1,39 | 41   |
| R G1    | 0,16  | 2,75 | 4788 | 280 | 1,61 | 39   |
| Medel 3 | 1,381 | 11,4 | 6113 | 181 | 1,64 | 41,7 |
| Medel 4 | 1,402 | 10,6 | 5817 | 187 | 1,61 | 43,2 |

## Bilaga 8 – Avvikelser för alla asfaltisolerade

Tabell 21 visar avvikelserna från medelvärdena när samtliga asfaltisolerade statorlindningar tagits med (jämför svart och brun text). Avvikelserna beräknas utifrån medel 3. Under förutsättning att alla sex parametrar har lika stor betydelse, skulle genomsnittsavvikelsen kunna ses som ett betyg.

Tabell 21 – Avvikelser hos epoxiisolerade statorlindningar utifrån medel 3.

| Asfalt<br>Aggregat | x1    | x2    | x3    | x4    | x5    | x6    | Genomsnitt |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| H G1               | 0,07  | 0,18  | 0,13  | -0,07 | -0,05 | -0,02 | 0,04       |
| H G1               | 0,29  | 0,56  | 0,13  | -0,07 | -0,05 | 0,15  | 0,17       |
| H G2               | -0,32 | 1,11  | -0,02 | -0,27 | -0,05 | -0,04 | 0,07       |
| H G2               | -0,04 | -0,51 | -0,02 | -0,27 | -0,05 | 0,13  | -0,13      |
| H G3               | -0,03 | 0,16  | 0,06  | -0,27 | -0,05 | -0,07 | -0,03      |
| H G3               | 0,22  | -0,69 | 0,06  | -0,27 | -0,05 | 0,03  | -0,12      |
| H G4               | -0,75 | 0,40  | 0,20  | -0,60 | -0,05 | -0,19 | -0,16      |
| S G4               | 0,65  | 0,93  | 0,08  | 0,12  | -0,15 | -0,09 | 0,26       |
| S G4               | 0,94  | -0,21 | 0,08  | 0,12  | -0,15 | 0,08  | 0,14       |
| S G4               | 0,72  | -0,51 | 0,08  | 0,12  | -0,15 | 0,15  | 0,07       |
| B G1               | -0,26 | 0,77  | 0,05  | -0,36 | -0,21 | 0,01  | 0,00       |
| B G2               | 0,06  | -0,21 | 0,00  | 0,05  | -0,21 | -0,04 | -0,06      |
| I G1               | 0,72  | -0,76 | -0,80 | 0,12  | 0,05  | 0,15  | -0,09      |
| I G2               | 1,72  | -0,01 | -0,67 | 1,08  | 0,05  | 0,15  | 0,39       |
| I G3               | 1,03  | -0,17 | -0,51 | 1,61  | 0,05  | 0,15  | 0,36       |
| C G1               | -0,58 | -0,86 | 0,31  | -0,67 | 0,22  | -0,11 | -0,28      |
| C G1               | -0,26 | -0,18 | 0,31  | -0,67 | 0,22  | 0,01  | -0,10      |
| C G1               | -0,58 | -0,86 | 0,31  | -0,67 | 0,22  | -0,11 | -0,28      |
| C G1               | -0,26 | -0,18 | 0,31  | -0,67 | 0,22  | 0,01  | -0,10      |
| C G2               | -0,44 | -0,23 | 0,01  | 0,19  | 0,22  | -0,11 | -0,06      |
| F G1               | -0,38 | 0,54  | -0,42 | 1,32  | 0,06  | -0,04 | 0,18       |
| F G1               | -0,32 | -0,42 | -0,42 | 1,32  | 0,06  | 0,15  | 0,06       |
| F G2               | 0,42  | -0,28 | -0,27 | 1,05  | 0,06  | 0,13  | 0,18       |
| F G2               | 0,42  | -0,28 | -0,27 | 1,05  | 0,06  | 0,13  | 0,18       |
| F G3               | 1,71  | -0,32 | -0,07 | 0,59  | 0,06  | -0,07 | 0,32       |
| J G1               | -0,61 | -0,20 | 0,06  | -0,65 | 0,10  | -0,16 | -0,24      |
| J G2               | -0,29 | 3,30  | 0,25  | -0,75 | 0,10  | -0,02 | 0,43       |
| J G2               | -0,42 | 0,33  | 0,25  | -0,75 | 0,10  | 0,03  | -0,08      |
| K G1               | -0,90 | -0,35 | -0,10 | -0,07 | -0,35 | 0,27  | -0,25      |
| L G1               | -0,32 | -0,69 | -0,47 | 0,82  | 0,00  | 0,08  | -0,10      |
| D G1               | 0,19  | -0,69 | -0,17 | 0,55  | 0,20  | -0,07 | 0,00       |
| D G1               | 0,04  | 0,50  | -0,17 | 0,55  | 0,20  | -0,16 | 0,16       |
| D G2               | 0,85  | 0,19  | -0,16 | 0,69  | 0,20  | -0,14 | 0,27       |
| M G3               | 1,22  | -0,02 | 0,24  | -0,47 | -0,06 | 0,03  | 0,16       |
| E G1               | -0,55 | 0,16  | 0,23  | -0,67 | -0,23 | -0,02 | -0,18      |
| E G2               | -0,36 | -0,32 | 0,30  | -0,60 | -0,23 | -0,02 | -0,20      |
| N G1               | -0,41 | -0,25 | 0,25  | -0,28 | 0,13  | -0,21 | -0,13      |
| G G3               | -0,75 | -0,54 | 0,34  | -0,74 | -0,14 | 0,03  | -0,30      |
| G G3               | -0,54 | 0,67  | 0,34  | -0,74 | -0,14 | 0,17  | -0,04      |
| T G1               | -0,09 | 0,33  | 0,09  | 0,01  | 0,07  | -0,16 | 0,04       |
| T G1               | -0,06 | -0,72 | 0,09  | 0,01  | 0,07  | -0,02 | -0,10      |

|      |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A G1 | -0,12 | 0,31  | -0,11 | -0,16 | 0,01  | -0,07 | -0,02 |
| A G2 | -0,30 | -0,60 | -0,11 | -0,10 | 0,01  | -0,09 | -0,20 |
| O G2 | 1,26  | -0,47 | 0,27  | -0,54 | -0,01 | 0,03  | 0,09  |
| P G2 | -0,78 | -0,39 | 0,06  | -0,15 | -0,04 | -0,02 | -0,22 |
| Q G1 | -0,30 | 1,54  | 0,03  | -0,25 | -0,15 | 0,05  | 0,15  |
| Q G2 | -0,62 | 0,69  | 0,05  | -0,15 | -0,15 | -0,02 | -0,03 |
| R G1 | -0,88 | -0,76 | -0,22 | 0,54  | -0,02 | -0,07 | -0,23 |

## Bilaga 9 – Avvikelser för senaste mätning asfaltisolerade

Tabell 22 visar avvikelserna från medelvärdena när enbart de senaste noteringarna för asfaltisolerade statorlindningar i drift beaktats (jämför svart text). Avvikelseberäkningen utfördes utifrån medel 4. Under förutsättning att alla sex parametrar har lika stor betydelse, skulle genomsnittsavvikelsen kunna ses som ett betyg.

Tabell 22 – Avvikelser hos epoxiisolerade statorlindningar utifrån medel 4.

| Asfalt<br>Aggregat | x1    | x2    | x3    | x4    | x5    | x6    | Genomsnitt |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| H G1               | -0,59 | -0,85 | 0,37  | -0,68 | 0,24  | -0,14 | -0,27      |
| H G2               | -0,59 | -0,85 | 0,37  | -0,68 | 0,24  | -0,14 | -0,27      |
| H G3               | -0,44 | -0,17 | 0,07  | 0,15  | 0,24  | -0,14 | -0,05      |
| H G4               | -0,59 | -0,85 | 0,37  | -0,68 | 0,24  | -0,14 | -0,27      |
| S G4               | 0,40  | -0,23 | -0,24 | 0,99  | 0,08  | 0,09  | 0,18       |
| I G1               | -0,44 | -0,17 | 0,07  | 0,15  | 0,24  | -0,14 | -0,05      |
| I G2               | -0,39 | 0,65  | -0,39 | 1,25  | 0,08  | -0,07 | 0,19       |
| I G3               | -0,33 | -0,38 | -0,39 | 1,25  | 0,08  | 0,11  | 0,06       |
| C G1               | -0,90 | -0,30 | -0,05 | -0,10 | -0,34 | 0,23  | -0,24      |
| F G1               | 0,17  | -0,67 | -0,13 | 0,51  | 0,22  | -0,10 | 0,00       |
| F G2               | 1,67  | -0,27 | -0,02 | 0,54  | 0,08  | -0,10 | 0,32       |
| J G1               | -0,61 | -0,14 | 0,12  | -0,66 | 0,12  | -0,19 | -0,23      |
| J G2               | 1,18  | 0,06  | 0,30  | -0,49 | -0,04 | 0,00  | 0,17       |
| K G1               | -0,43 | 0,44  | 0,31  | -0,76 | 0,12  | 0,00  | -0,05      |
| L G1               | -0,90 | -0,30 | -0,05 | -0,10 | -0,34 | 0,23  | -0,24      |
| M G3               | -0,33 | -0,67 | -0,44 | 0,77  | 0,02  | 0,04  | -0,10      |
| E G2               | 0,17  | -0,67 | -0,13 | 0,51  | 0,22  | -0,10 | 0,00       |
| N G1               | 0,03  | 0,62  | -0,13 | 0,51  | 0,22  | -0,19 | 0,18       |
| T G1               | -0,13 | 0,41  | -0,07 | -0,18 | 0,03  | -0,10 | -0,01      |
| A G2               | 1,18  | 0,06  | 0,30  | -0,49 | -0,04 | 0,00  | 0,17       |
| O G2               | -0,56 | 0,25  | 0,29  | -0,68 | -0,21 | -0,05 | -0,16      |
| P G2               | -0,37 | -0,26 | 0,36  | -0,62 | -0,21 | -0,05 | -0,19      |
| Q G1               | -0,41 | -0,19 | 0,31  | -0,30 | 0,15  | -0,24 | -0,11      |
| Q G2               | -0,76 | -0,50 | 0,41  | -0,74 | -0,13 | 0,00  | -0,29      |
| R G1               | -0,54 | 0,80  | 0,41  | -0,74 | -0,13 | 0,14  | -0,01      |



## Estimating Lifetimes for Stator Windings in Hydropower Generators

# Estimating Lifetimes for Stator Windings in Hydropower Generators

Anders Karlsson, *and*, Thommy Karlsson

**Abstract**— Today the availability of a hydropower plant is more important than ever. In a high voltage power generator one of the most critical components is the stator winding. The cost of a stator winding breakdown is extensive, both when it comes to restoration and outage in production. However, nobody wants to change the stator winding if it is not necessary. During the last decades intermittent operation has increased, which has led to greater strains on the stator windings. Combined with the increased need for availability, this means that a good estimation of the lifetime of a stator winding is crucial. In this broad investigation, several methods are presented, such as an algorithm based on Bayesian method, multiple regression analysis, and various diagnostic methods. It has been found that generator design, diagnostic data, and power plant operation all are important parameters when estimating lifetimes, thus must several methods be considered.

**Index Terms**— Ageing, Bayesian methods, hydroelectric power generation, insulation, lifetimes, multiple regression analysis, PCA, PLS, stator winding, Sweden.

## I. NOMENCLATURE

Hydropower plants often consist of more than one hydropower unit. A hydropower unit is one set of generator and turbine. The stator winding is a part of the generator. Lifetimes mentioned in this paper are technical lifetimes, which refer to the time when a stator winding is changed either because of breakdown or due to poor technical condition. The later kind of decisions is based on estimations of technical and economical risks. Changing a stator winding is rarely done because of purely economical reasons. Nevertheless a unit is seldom unusable before renewal, but the risk of breakdown that grows by time.

## II. INTRODUCTION

For more than 100 years hydropower has been an important part of the Swedish energy mix. It all started in the late nineteenth century with small hydropower stations providing electricity to town centres or industrial estates.

---

This work was supported by Vattenfall Vattenkraft AB and was done at SwedPower AB in Älvkarleby, Sweden.

T. Karlsson is with SwedPower AB, SE-814 26, Älvkarleby, Sweden, and, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden (e-mail: [thommy.karlsson@swedpower.com](mailto:thommy.karlsson@swedpower.com)).

A. Karlsson is with SwedPower AB, SE-814 26, Älvkarleby, Sweden, and a student of Uppsala University, Uppsala, Sweden. (e-mail: [anders.karlsson2@vattenfall.com](mailto:anders.karlsson2@vattenfall.com) or [anka0495@student.uu.se](mailto:anka0495@student.uu.se) or [a81\\_uppsala@hotmail.com](mailto:a81_uppsala@hotmail.com)).

During the century that followed the size of the power plants grew, and the local networks in time fused to a national network. Eventually this national network has become more and more connected to the other countries in northern Europe, and an increasing amount of electricity is exchanged between the countries.

### A. Hydropower expansion

In the early days of hydropower, the Swedish government, like other governments, showed little interest. Power systems including hydropower plants were considered a matter for municipalities or companies. That however changed over time, because the Swedish state was in many cases either a part owner or the sole owner waterfalls suitable for hydropower production. This combined with an interest in the electrification of the railways, led the state to invest in own hydropower plants. In 1909, the State Power Board (Kungl. Vattenfallsstyrelsen, today's Vattenfall AB) was founded. The extension of Swedish hydropower increased during the following decades and the expansion peaked by the mid twentieth century. However, with each new hydropower station, the prospect of building new ones naturally grew smaller, and a decision in by the Riksdag (Swedish parliament) to protect a number of rivers and river parts, have further diminished the possibilities of building more large-scale hydropower stations in Sweden. As a result of this, few new stations have been built in Sweden since the 1970s, and on average hydropower stations in Sweden are rather old [1], [2]. Today about 50 percent of the Swedish electricity comes from hydropower.

### B. Deregulation

During the 1990s the Nordic power market underwent a major alteration. On January 1, 1992, the status of Vattenfall was changed from a state board to a state owned company, and four years later on January 1 1996, the Swedish power market was deregulated [4].

### C. The new era in Swedish hydropower

Like other industrial countries, Sweden has grown more and more dependent on reliable power production. Furthermore there has been a shift from base operation to peak operation, which implies that the hydropower units start and stop much more frequent than they did a few decades ago. All these factors point toward an increased rate of renewal in the hydropower business. However, a more market-oriented view on power production has emerged, and that has pushed in the

direction of less frequent renewals. The decline in maintenance during the 1990s could, at least partly, be explained a more market-oriented power industry.

#### *D. A wave of renewal*

The largest power companies on the Swedish energy market are: Vattenfall, E.ON, and Fortum. The hydropower reinvestments are likely to grow in the coming years, and Vattenfall alone plans to spend billions of Swedish crowns (SEK), equivalent to hundreds of millions of US dollars (USD), on hydropower reinvestments. Generators as well as turbines will be changed in many hydropower units all around Sweden. Roughly speaking there are two reasons to this wave of renewal. Partly it is needed because of the low level of reinvestments during the 1990s, partly the need for renewal originate in the fact that so many Swedish hydropower units happens to be in the age when major reinvestments are necessary.

### III. THE GENERATOR

The idea behind hydropower is to convert the kinetic energy of water into electrical energy. In a hydropower unit there is a turbine that starts spinning as it takes hold of this kinetic energy. Between the turbine and the generator there is a shaft, which makes the rotor of the generator to spin. Since the rotor is magnetized, an electric current is induced in the stator winding, which is a component in the stator, the stationary part of the generator. The generator has to endure large currents, which lead to large forces and of course high temperatures.

#### *A. A critical component*

The choice to focus on the stator winding can be motivated in several ways. It is obvious that the stator winding is a critical component in the hydropower generator, and of course in the hydropower unit as a whole. What makes the stator winding one of the most critical components, or perhaps the most critical component, is the fact that a failing stator winding causes considerable costs for the hydropower company. Partly the costs consist of expenses due to repairs or reconstruction, but the effects of fall in production also poses a great challenge for the company.

#### *B. The design of a stator winding*

The main concern when designing a stator winding is to make it sustainable. Generally stator winding are made to last for more than 40 years. In other words, it is very important to design it, so that it endures high currents and high temperature. As shown below, the interaction between the various strains is very complex. Thermal, electrical, and mechanical strains, as well as strains from the external environment have to be considered when designing a stator winding.

#### *C. The operation and its effects on the stator winding*

In recent years intermittent operation of hydropower units has increased, which means that the hydropower units perform

peak operation rather than base operation. This change has drastically increased the average number of starts and stops per year. Today this number is often many times higher than it was a few decades ago, and the number will likely increase even more during the years to come. This is because of the growing number of alternative energy sources, which often have low availability. A wind power plant, for instance, does not work when it is calm. The increase in intermittent operation has of course a big impact on the stator windings, even more so when it comes to older hydropower units with asphalt insulation. It is however not yet completely cleared up what the effects really are, but it is likely that the rate of mechanical ageing increase with the more and more intermittent operation of the hydropower units. One reason for that is that the stator winding is exposed to thermal expansion, which results in movements in the stator winding. These movements increase the mechanical strains on the stator winding.

#### *D. The ageing of a stator winding*

In general the ageing of a generator can be seen as a stream of stochastic processes with a certain statistical distribution, often Weibull or normal distribution. Another important thing to have in mind is that in a strict sense it is impossible to determine a clear relation between load and ageing. In other words, two hydropower units with similar design can age in very different ways even though they have been subjected to the same load. When it comes to the stator winding, which after all only is a part of a generator, finding a relation between load and ageing is perhaps somewhat easier, at least in a practical sense. When it comes how a stator winding ages, with no consideration why it deteriorates, the ageing can be categorized in different ways. It is however common to divide the ageing of a stator winding in four categories: thermal, electric, and mechanical ageing, and also ageing due to the external environment [5].

##### *1) Thermal ageing*

This type of ageing is likely the most common cause of stator winding breakdown. Roughly speaking the insulation of a stator winding is either made of asphalt or epoxy. Both these materials are made up of organic polymer molecules, which decompose over time. The velocity of these processes increase with an increasing temperature and the insulation gets weak and brittle. When that has occurred, there is a risk that the insulation either peels off the copper conductor, or cracks. Thermal ageing has several different causes, for example: overload operation, poor design, poor manufacture, and inadequate cooling. Inadequate cooling is often a result of dirt in the generator or in the cooling system. Another type of thermal ageing is thermal cycling, which has to do with the fact that every type material changes its volume depending on the temperature. This leads to a form of mechanical ageing and further to electrical ageing [3], [5]. Fig. 1 is a typical example of a thermally aged stator winding.



Fig. 1 Thermally aged stator winding

### 2) Electric ageing

The main origin of electric ageing of a stator winding is partial discharges. One of the problems with partial discharges is the mechanical damage it causes on the corona protection. The partial discharges also give rise to chemical ageing in the form of ionization and the formation of radicals. This of course damages the insulation. Furthermore partial discharges can cause secondary discharges, which also hurt the insulation. Because of the nitric oxides and ozone the partial discharges create from the air, the stator winding can get damaged in a more indirect way. This is because the nitric oxides react with water, which always is present in the more or less damp environment in the generator, and create nitric acid, which is highly corrosive. The ozone is by itself a powerful oxidizing agent and has of course a harmful effect on the stator winding [5]. Fig. 2 is a typical example of an electrically aged stator winding.



Fig. 2 Electrically aged stator winding

### 3) Mechanical ageing

The mechanical ageing of the stator winding insulation is in principal equivalent to metal fatigue. It often occurs in the interfaces between different materials, for instance: between

the copper conductor and the insulation, between the corona protection and the insulation, and also between the coil and the slot. A typical example of mechanical ageing is when the coils in the slots are loose. It resembles in many ways the problems of thermal cycling, but instead of thermal movements, it is caused by vibrations. First the coils begin to vibrate, which creates temporary air gaps in the stator winding. This leads to outbursts of smaller partial discharges. When the vibrations have been going on for a long time, the semiconductive coating gets damaged and bigger partial discharges occur and with them electrical ageing [3], [5].

### 4) Ageing due to the external environment

The environment in a generator can vary a lot. In for example a bulb unit, which is submersed and almost has the appearance of a submarine, the environment is damp. In other types of units the generator might be subjected to other strains like dirt. If there is a lot of dirt in a generator the cooling system may get clogged-up, which raise the temperature in the generator and increases the speed of thermal ageing. Another problem due to external environment is abrasive particles, which can be for example sand. This problem is most common at the end-windings, but it can occur in the slots as well. In some cases chemicals can damage the stator winding, especially if it is insulated with asphalt. The insulation then gets soft and weak, which reduces its mechanical and electrical strength [3], [5].

It is important to have in mind that ageing never is the sum of the factors that are involved and that there is an interaction between the different ageing factors. One concrete example is that the intensity of electric ageing increases with the temperature. A stator winding is never damaged by just one ageing factor, but still it is often possible to see which factor has had the biggest impact on a particular stator winding. The pictures above are examples of that.

## IV. ESTIMATING LIFETIMES

As described above, the design and operation of a hydropower unit have a great impact on the ageing of the stator winding. However design and operation are not the only important parameters. It is also crucial to diagnose the actual status of the stator winding, since two hydropower units with similar design can age in very different ways even though they have been operated in the same way. As mentioned above, it is a strict sense impossible to find a relation between load and ageing. Because of that, it is crucial to diagnose the status of the particular hydropower unit. The lifetime estimation of stator windings can metaphorically be seen as a tetrahedron with design, operation, and condition at the edges of the base, and lifetime estimation at the top. See fig. 3. There are quite a few different approaches to estimate the lifetime of a stator winding. It is desirable that all of them take at least one of the edges of the base in consideration.

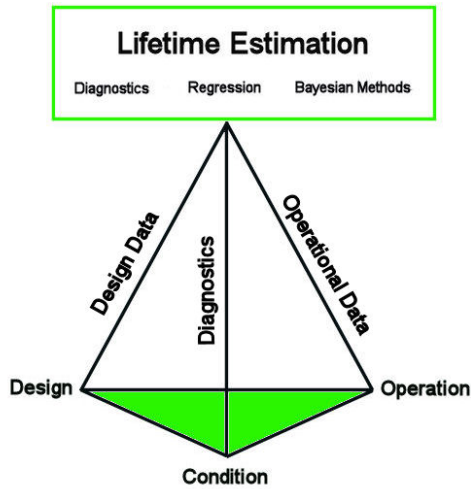


Fig. 3 The lifetime estimation tetrahedron.

The perhaps most obvious form of analysis is inspection. It is carried out by a hydropower specialist, who examines the stator winding and its environment. By doing an inspection, it is for example possible to find the reason behind unexplained problems with the generator in general and the stator winding in particular.

Often it is however desirable to get more solid data. To fulfill that need, a variety of diagnostic methods have been developed. Those collect data from measurements, and are either done online, when the hydropower unit is operating, or when it is offline. When it comes to the online diagnostics, there many different methods. Intech, PRPDA, and PDA (PD analysis) are examples of online methods based on electrical measurements, while VibroSystem and VIMOS are mechanical measurements done online. In this paper little attention is paid on online diagnostics. Instead offline measurement is more emphasized. Also when it comes to offline diagnostics, there are a number of different methods, for instance: hipot test, ozone measurements, and PD measurements. At SwedPower an offline diagnostics called DSD is used. It contains a number of different diagnostics, and is presented below.

The data from the different types of diagnostics give rather reliable information about the status of a stator winding. It shows signs of ageing and potential threats that may accelerate the ageing process. Traditionally hydropower investigations have heavily relied on data from diagnostic methods. This data have then been analyzed qualitatively and conclusions have been drawn from experience and general knowledge in hydropower technology. Often this work is about finding negative trends concerning the stator winding. The velocity of deterioration is often more important to consider than the level of deterioration. This means that if the ageing accelerates, the stator winding is likely to fail relatively soon.

Apart from analysis based on inspection and measurements, more theoretical work has been done. The connections between engineers working with a more practical approach and engineers creating theoretical models have though been weak. Metaphorically the two fields of lifetime estimation

could be characterized as two bridge abutments without a bridge between them. As shown later in this paper, there are problems at both abutments, but the problems are quite different and almost philosophical in their nature. From each abutment something can be done, it is likely never possible to fully complete the bridge.

#### A. The DSD database

At SwedPower AB a method called DSD, Dielectric Stator Diagnostics, has been developed. Without making any deeper explanation of the ideas behind the method, something could be said about the data that are obtained from its measurements. Following is measured in the DSD method: insulation resistance [M $\Omega$ ],  $\tan \delta$  [%],  $\Delta \tan \delta$  [%], capacitance [nF], maximum partial discharge [nC], and the temperature [°C]. A hipot test is also performed.

The data obtained from the DSD method is stored in a database. This database is mainly used as a basis of discussion when a decision should be made whether a unit should be renewed or not. If there is a decision to renew a unit, then the information in the DSD database of course also can be useful when comes determining the extent of the renewal. When it comes to more systematic and theoretical analysis, not so much has been done on the data in the DSD database.

In the summer of 2003 however, a project in that direction was carried out. The outcome of the project was an application that made it possible to compare the conditions, in other words the data, of different stator windings with each other. Further more the application made it possible to see trends for a chosen unit, or more correctly a chosen stator winding. The trends were calculated with respect to the averages of the actual changes over time for different data. This means that there was an assumption that all stator windings from their starting point deteriorated in the same way. The user of the database chose the number of years the trend would run. The results that were obtained were of course quite a rough and unreliable, but could serve as simple tool. A listing of the worst stator windings in the DSD database was also done [6].

Even though this project might have given the employees at SwedPower some assistance, it is insufficient and it does not really improve the reliability of their investigations. It is however possible to take the same type of investigations one step further with for example multiple regression analysis, principal component analysis (PCA), and partial least square (PLS). This could perhaps be a way to reduce the gap between theoretical forms of analysis and the qualitative analysis of data from measurements. All of this will be discussed below, but first it is appropriate to take a look on another more practically oriented form of lifetime analysis, the coil dissection.

#### B. Coil dissection

To determine what kinds of age related damages a stator winding has, it is possible to do a coil dissection. Apart from the DSD method, the coil dissections are quite a unique concept. The coil dissections are often performed late in the

life of a stator winding and are costly. The method is expensive because some of the stator coils has to be removed and replaced by new ones. The coils that are removed are taken from different part of the stator and have therefore been exposed to different voltage levels. They are examined in different ways, partly through electrical measurements, partly through inspection. The coil dissection often tells the engineer a lot about what type of ageing that is dominant in the particular stator winding. It is of course always more or less a combination of different types of ageing. It also shows how far the ageing has gone and it gives important hints about the risks involved with operating the examined hydropower unit.

### C. Multiple regression analysis and beyond

To use multiple regression analysis when estimating lifetimes of stator windings is a new method developed by the authors of this paper. The new method is perhaps somewhat unreliable, but the good thing about multiple regression analysis is that it uses all three edges of the tetrahedron: design, operation, and condition. The method can also bridge the gap between theoretical and practical forms of analysis. In the multiple regression analysis a set of data from DSD measurements, operational data, and data originating from the design of the stator winding, is matched up to the remaining lifetimes of each stator winding. This remaining lifetime is the number of years that passed from the data was obtained until the stator winding of the unit was changed.

The multiple regression analysis results in an equation. By inserting data from a DSD measurement, operational data, and design specific data, from a running hydropower unit into that equation, a prediction of the stator winding's remaining lifetime is obtained. This prediction gives us a hint about the number of years the stator winding could remain in service. The method can be used as a tool to grade the stator windings, but it is of course not able to precisely determine the remaining lifetime. Depending on the choice of parameters, the multiple regression analysis gives somewhat different results. However the results do not vary so much that it is motivated to present all of them in detail in this paper. All trials of multiple regression analysis have included DSD data and operational data. In some of the calculations also the average applied electrical field (a design parameter) and the age of the stator have been included. The data used from the DSD database were  $\Delta \tan \delta$  [%] and the maximum partial discharge [nC], while the operational data consisted of the average time in operation per year [h] and the average number of starts and stops per year. Apart from that the average applied electrical field [kV/mm] and the age of the stator [years] were included in most calculations. To make the equation more clear it is appropriate denote these parameters  $x_1$  to  $x_6$ , and call the observed remaining lifetime  $y$  [years]. The predicted remaining lifetime is denoted  $y_{pred}$  [years]. A list of the parameters then looks like this:

- $y$  – observed remaining lifetime [years]
- $x_1$  –  $\Delta \tan \delta$  [%]
- $x_2$  – maximum partial discharge [nC]
- $x_3$  – time in operation per year [h]
- $x_4$  – number of starts and stops per year
- $x_5$  – average applied electrical field [kV/mm]
- $x_6$  – age of the stator [years]

If all these parameters are used in a multiple regression analysis of asphalt insulated stator windings that have been changed due to technical reasons at Vattenfall AB, the following equation is obtained:

$$y_{pred} = -1.96x_1 - 0.065x_2 - 0.0014x_3 - 0.012x_4 - 2.69x_5 - 0.064x_6 + 27.38$$

It is now possible to see which parameter has the biggest impact on the predicted remaining lifetime of the stator winding.  $x_1$  is typically in the region of 1, while  $x_2$  has a magnitude around 10. The size of  $x_3$  is normally around 5000 and the number of starts and stops per year ( $x_4$ ) are generally about 200.  $x_5$  is in the region of 1.5, while  $x_6$  typically is around 40. For a typical hydropower unit, it might be something like this:

$$y_{pred} \approx -2 - 0.5 - 7 - 2.5 - 4 - 3 + 30 \approx 11$$

When looking at this, it becomes clear that diagnostic measurements do not give a complete picture of the life expectancy of a hydropower plant. Design and operation are also very important, perhaps even more important. There has been an assumption that one start and stop in an asphalt insulated unit is equivalent to ten hours of continuous operation. The results of the multiple regression analysis show that this assumption might be a plausible approximation. According to this multiple regression analysis one start and stop is equivalent to about 9 hours of continuous operation.

The main problem with multiple regression analysis concerns the insufficient amount of data and to some extent dependency. In a multiple regression analysis the data matrix must not be collinear. The parameters that are relevant when predicting lifetimes of stator windings are however, at least to some extent, dependent to each other. However, in our study such problems have never occurred.

If these problems should arise, it would be possible to deal with them by using principal component analysis (PCA) and partial least square (PLS). PCA determines the dependency between the parameters, while PLS can be characterized as a more sophisticated form of regression. PLS will, like the multiple regression analysis, give a form of equation that can be used to predict the remaining lifetime of a stator winding. Not much PCA and PLS have yet been done, but it might increase the accuracy of the regression approach. The very initial PLS results that have been obtained shows however a big resemblance to the results of the multiple regression analysis.

The insufficient amount of data is likely a bigger problem, which might distort the results of multiple regression analysis as well as the results of PCA and PLS. The problem with insufficient amount of data is most severe when it comes stator windings with epoxy insulation. Very few epoxy insulated stator windings has yet been changed due to ageing. They are instead either changed because of design flaws or perhaps due to economical reasons. Of course should also stator windings with poor design be considered in a lifetime analysis, but an analysis with only that kind of stator windings will give heavily distorted results. Multiple regression analysis, PCA and PLS, are in other words only possible to on stator windings with asphalt insulation, and even there the amount of data is limited. A wider international outlook might increase the quantity of data, but unfortunately the types of measurements and presence of operational data, varies over time and of course also between different companies and different countries.

#### D. Using Bayesian methods

Another approach is to use Bayesian methods that combine real lifetime observations with the subjective judgements of a components lifetime made by hydropower experts. In the years 2003 and 2004 Anna Gabrielsson (then Holmgren) created an algorithm based on Bayesian methods. This algorithm defines lifetime distributions for hydropower components [7]. Her pilot study from 2005 has a more practical approach and applies the algorithm on stator windings, which were divided up in their different insulation materials, which of course is the most straightforward choice of division [8]. The lifetime distributions that were obtained for the various insulation materials seem to be plausible and that of course indicates a high reliability with this approach. Fig. 4 is an example of that.

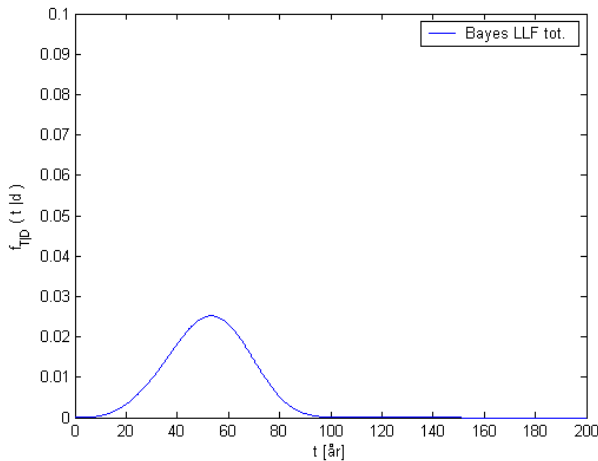


Fig. 4. Lifetime distribution of asphalt insulated stator windings with years as time unit.

Compared with the multiple regression analysis the Bayesian approach gives a better reliability. Instead there is a problem of validity and the practical use is limited, since there is no connection to specific hydropower units. If a comparison is made between the result of the algorithm and the life

expectancy of a human, the problem appears more clearly. Of course there is important to know the lifetime distribution of a human, but it is not a particularly useful tool for a physician when treating an ill patient.

However the lifetime distributions are useful as a check-up in a hydropower investigation. They give the engineer a kind of background information that might bring some sense of security to the engineer. In other words they may strengthen the confidence among those working with hydropower rehabilitation. The lifetime distributions support their vast knowledge in hydropower technology.

The lifetime distributions will grow more and more accurate as more real lifetime observations are made, but it could perhaps be even more accurate if equivalent lifetimes were used as input instead real lifetimes. This of course implies to both the lifetime observations and the subjective judgements. The equivalent lifetimes could for example be calculated by setting one start and stop of a hydropower unit as ten hours of continuous operation. Both estimations done by hydropower experts and the multiple regression analysis suggest that this approximation is plausible.

If all necessary data were available, it would be easy to calculate equivalent lifetimes. However there are problems finding data, since operational data is not collected in a systematic way. The implications of insufficient data are however smaller with Bayesian methods than it is in the regression approach. The question is though; if the smaller amount of real observations makes the result so much less reliable that the original algorithm would be more accurate. The original algorithm only deals with lifetimes and they are quite easy to find in relatively large numbers. Another difficulty with equivalent lifetimes is the subjective judgements. It may be an impossible task for the hydropower experts to make subjective judgements on equivalent lifetimes. To use equivalent lifetimes is however perhaps the only way to connect the algorithm and its lifetime distributions with the base of the tetrahedron mentioned above. It is very difficult to add for instance data from measurements into the algorithm.

#### V. DISCUSSION

To estimate the lifetime of a stator winding, design, operation, and of course the present condition, is important. In other words, it is not enough to examine the condition of the stator winding. Earlier in this paper a tetrahedron representing this philosophy was introduced. All three edges of its base must be considered in order to get an overall picture of the lifetime of a stator winding. Various methods have their advantages and disadvantages, but no method could alone give the full picture. This has to do with the complex and stochastic nature of ageing of a stator winding.

Both inspections and diagnostic methods (as well offline as online) have a weakness, namely that they only focus on the present condition of the stator winding. Design and operation are not considered. The multiple regression analysis method developed in this study, and of course also PCA and PLS, is in

many ways a theoretical continuation of the diagnostics mentioned above. However, there is one big difference. The regression approach also includes design and operation parameters, which could make it a powerful tool. However, there are problems with small amounts of data and to some extent dependency.

The algorithm presented in [7] gives high-quality background information to the decision-makers, since the problem with insufficient amounts of data is reduced by Bayesian methods. The lifetime distributions given by the algorithm are good illustrations of the expected lifetime of stator windings with different insulation materials. On the other hand, the result obtained by the algorithm is a little diluted. It is not so useful in practical work and has no connection at all to design, operation, and condition. On the other hand the whole idea with the algorithm is the fact that there is not a sufficient amount of data to do a reliable conventional statistical analysis.

To concretize both the problems and the advantages of various ways of analyzing the life expectancy of a stator winding, let us imagine that an engineer wants to evaluate a certain stator winding. At first he or she inserts the suitable data from the latest DSD measurement, operational data, the average applied electrical field and the age of the stator winding into the equation that has been obtained from the multiple regression analysis. The engineer then gets a prediction of the remaining lifetime as an answer. The precision of this answer is perhaps somewhat arguable and even if the multiple regression analysis is extended by PCA and PLS the result will be somewhat uncertain due to few observations. But unlike the algorithm presented above, there really is a connection between the particular stator winding and the predicted remaining lifetime. In other words this prediction depends on the condition, the operation, and to some extent the design, of the very stator winding that the engineer wants to evaluate. The lifetime distributions lack such a connection to the base of the tetrahedron. On the other hand they show better reliability, since their Bayesian origin makes them less vulnerable for small amounts of observations. Further more the algorithm has not the problems of dependency that could haunt a regression approach.

To ensure validity and reliability, a concept combining our regression approach with the lifetime distributions based on Bayesian methods must be developed. In other words, the validity of the multiple regression analysis must be merged with reliability of the lifetime distributions. A prototype of such a concept has been developed. Together with multiple regression analysis and lifetime distributions, diagnostics and inspection should also be included in the concept. The reason for this is to cover as much as possible of the base of the tetrahedron.

## VI. CONCLUSIONS

The discussion gives a wider summary of the result, but briefly the results can be summarize as follows:

- A method based on multiple regression analysis has been developed.
- To make an estimation of the lifetime of a stator winding both: design, operation, and the present condition, must be considered. This is obtained by using multiple regression analysis.
- The multiple regression analysis has high validity, but the low number of observations makes it somewhat unreliable.
- To achieve high reliability as well as high validity; a holistic concept involving several methods must be used. Lifetime distributions based on Bayesian methods have higher reliability (but lower validity), and could therefore be a compliment to multiple regression analysis.
- It is important to collect data from a hydropower unit through all its lifetime, not only when the reinvestment is near.

## VII. FUTURE WORK

It is important to have as much data as possible when it comes to both: design, operation, and the present condition. Today data from the operation are fragmented and not systemize. A project to systematically collect operational data would be desirable. Another thing that would be useful is an archive with the hydropower units as files. It would also be interesting use the methodology presented above on other components, such as the rotor pole coils, bearings, excitation system, and sliding elements. Furthermore, a complete study of PCA and PLS might improve the accuracy and generate new ideas. It could therefore be of interest to study further.

## VIII. REFERENCES

### Books:

- [1] Swedish State Power Board (Statens Vattenfallsverk) *Hydro Power in Sweden*. Vällingby, 1981, pp. 9-18.
- [2] A. Kaijser, *I fädrens spår...* Stockholm: Carlsson bokförlag, 1994, pp. 160-176.
- [3] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani. *Electric Insulation for Rotating Machines – Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004, pp. 137-179.

### Technical Reports:

- [4] N. Andersson and A. Mogren. (2002, Nov.). Elmarknadsrapport 2002. Vattenfall AB, Stockholm, Sweden. [Online]. Available: [http://www.vattenfall.se/downloads/koncern/elmarknadsrapport\\_2002.pdf](http://www.vattenfall.se/downloads/koncern/elmarknadsrapport_2002.pdf)
- [5] J. Storesund. (2004, Nov.). Handbok för livslängdsarbete med energianläggningar. Värmeforsk, Stockholm, Sweden.
- [6] A. Hägglund, and A. Karlsson (2003, Aug.). Uppdatering av databasen för dielektrisk statordiagnostik (DSD). SwedPower AB, Älvkarleby, Sweden.
- [7] A. Holmgren (2004, Apr.). Ökad precision i bestämning av livslängdsfördelningar genom tillämpning av Bayesianska metoder – En utgångspunkt för erfarenhetsåterföring inom Vattenfall Vattenkraft. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

- [8] A. Holmgren (2005, Jan.). SwedPower – Pilotstudie: Livslängdsfördelningar för statorlindning. SwedPower AB, Stockholm, Sweden.



**Tommy Karlsson** was born in Vattholma outside Uppsala in Sweden, on June 19, 1950. He studied at Uppsala University and got his Master of Science in Engineering Physics in 1980. In 1984 he became PhD in technology at Uppsala University. His employment experience includes ASEA Research and Innovation, ASEA Generation AB, ABB Generation AB, Alstom Power Generation AB, and SwedPower AB. He started as development engineer at ASEA Research and Innovation in 1985

and then he had different managerial positions until 2002 when he became consulting generator specialist at SwedPower AB. Two years earlier, in 2000, he was installed as adjunct professor at Luleå University of Technology.



**Anders Karlsson** was born in Löfstalöt outside Uppsala in Sweden, on February 22, 1981. He is studying at Uppsala University and will get his Master of Science in Systems in Technology and Society in 2006. He is working with his master thesis at SwedPower AB. During 2006 he is also planning to complete his business studies with a bachelor's degree.