



Växlar i vattenkraftverk

Elforsk rapport 94:06



Växlar i Vattenkraftverk

Elforsk rapport 94:06

Sammanfattning

För anpassning av varvtalen för turbin respektive generator i mindre vattenkraftverk används normalt mekaniska kuggväxlar. Vanligen är det fråga om standardiserade med industriväxlar. Under senare år har från flera företag rapporterats om fel och diverse problem med kraftverksväxlarna. Inom VAST tillsattes därför en arbetsgrupp med uppdrag att klarlägga orsakerna till detta. Efter VASTs upphörande vid årsskiftet 92/93 slutfördes uppgiften i Elforsks regi och i föreliggande rapport redovisar arbetsgruppen sina synpunkter.

Huvuduppgiften var att insamla drifterfarenheter från kraftverksväxlar, utvärdera dessa och utarbeta rekommendationer. Under arbetet har kontakter tagits, utöver med kraftföretagens driftpersonal, med representanter för tillverkare, smörjoljeleverantörer och konsulter.

Som bakgrund beskrivs de olika växeltypen som används, deras uppbyggnad och dimensionering. Växlarnas smörjning är mycket viktig och helt avgörande för tillförlitlighet och livslängd. Därför beskrivs vilka krav man måste ställa på smörjmedlets kvalitet och hur det skall filtreras från slitagepartiklar.

Val av olja inverkar också på växelns verkningsgrad. Arbetsgruppen har genomfört ett fältprov i ett kraftverk där förlusternas beroende av val av olja jämförts. Fältprovet vidimerade att syntetolja ger lägre förluster än mineralolja även om provet inte visade lika stor skillnad som teoretiska beräkningar och tidigare prov indikerat.

Drifterfarenheter från 67 växelförsedda aggregat inrapporterades till arbetsgruppen. Växlarnas installationsår varierade från 1910 till 1989. 20 st växlar hade varit utsatta för haveri eller allvarliga fel. Anmärkningsvärt är att samtliga inrapporterade 20 haverier gällde växlar installerade efter 1975. Vidare att flertalet drabbats innan de uppnått 25000 timmars drifttid. De flesta skadorna gällde växlarnas kuggar och lager. Orsakerna till dessa skador är troligtvis uppriktningssfel som antingen beror på bristfällig noggrannhet vid montaget eller på underdimensionerade fundament. En annan trolig orsak är otillräcklig oljekvalitet eller alltför grova oljefilter. Erfarenheterna från industriväxlar visar nämligen vilken helt avgörande betydelse detta har på växelns livslängd.

Arbetsgruppen rekommendationer för att öka kraftverksväxlarnas tillförlitlighet är:

- följ den i rapporten föreslagna kravspecifikationen vid köp av nya växlar
- vid montaget måste särskild uppmärksamhet ägnas uppriktningen
- stabila fundament erfordras
- oljekvaliteten är mycket viktig. Helst bör syntetolja väljas
- växellådan måste vara underhållsvänligt utförd, speciellt måste möjligheterna att lätt utföra oljeprover och att byta olja vara tillgodosedda
- underhållsprogram i form av temperaturövervakning, vibrationsmätning och uppföljning av oljekvaliteten bör upprättas

Arbetsgruppen har slutligen berört frågan om alternativ till mekaniska växlar för varvtalsanpassning. I vissa fall är det tänkbart att frekvensomriktare är ett sådant alternativ. Prototypanläggningar med varvtalsvariation med hjälp av frekvensomriktare finns utomlands. Arbetsgruppen har dock ej haft tillfälle att i detalj studera teknikens för och nackdelar utan föreslår att detta utreds annat sammanhang.

Summary

In small hydroplants mechanical gears are normally used for adjusting the rotation speed of the turbine to the speed of the generator. In most cases standardized gear-boxes of industrial type are used. Lately many faults and damages on these gears have been reported. Therefore a working-group with members from the companies within the Swedish Power Association was appointed. In this report the opinions and recommendations from this group are described.

The main aim of the group was to collect data concerning experiences from the operation of gears in hydro plants, to evaluate these experiences and to give recommendations. During the work the group has been in contact, besides with the operational staffs at the power plants, with representatives of the manufacturers of gear-boxes, with representatives of oilcompanies and with representatives of consulting engineerfirms.

The various types of gears which are used are described. The choice of lubricant is very, important for the length of life of the gears. Therefore the demands you have to put on the lubricants are specified.

The choice of lubricant is also important from the point of view of efficiency. A test has been made which attests that synthetic oil gives less losses than mineral oil does. However, the difference is not as great as earlier theoretical calculations have indicated. 67 plants equipped with gearboxes have been reported. The gears were installed from the year 1910 to the year 1989. 20 gears were reported failed. Remarkably all reported failures have occurred on gears installed after 1975. Most of the faults were on the cogs and the bearings. The most probable causes of the faults are negligence in the erection and/or insufficient quality of the lubricant.

In order to raise the availability of plants equipped with gear-boxes the group gives the following recommendations:

- when purchasing a new gear-box, follow the specification given in the report
- at the erection special attention has to be applied to the alignment of the gear
- a solid fundament is necessary to avoid vibrations
- the quality of the lubricant is important synthetic oil is to be preferred
- the possibilities easily to make service on the gearbox must be taken into account, especially concerning oiltests and ex-change of oil
- a maintenance program has to be established including surveillance of temperatures, vibrations and oil quality

Innehållsförteckning

1	UPPDRAGET	1
2	BAKGRUND	2
3	TEKNISK BESKRIVNING AV VÄXLAR	4
3.1	VÄXELTYPER.....	4
3.2	DIMENSIONERING	5
3.3	SMÖRJNING.....	8
3.4	VERKNINGSGRADER.....	10
3.5	UTVECKLING.....	12
3.6	UPPSTÄLLNINGAR OCH UPPBYGGNAD.....	12
4	DRIFTERFARENHETER	15
4.1	FAKTAINSAMLING.....	15
4.2	KOMMENTARER TILL HAVERISTATISTIKEN	17
5	UPPHANDLING OCH INSTALLATION	19
5.1	VÄXEL KONTRA DIREKTDRIFT	19
5.2	UPPHANDLINGAR	21
5.3	MONTAGE.....	23
6	DRIFT OCH UNDERHÅLL	24
6.1	OLJA	24
6.2	KOPPLING.....	25
6.3	KYLNING	25
6.4	KUGGAR.....	26
6.5	LAGER	26
7	REKOMMENDATIONER	28
8	REFERENSER.....	29

1 Uppdraget

Inom VAST uppdrogs i slutet av 1991 åt en arbetsgrupp att samla in och utvärdera erfarenheterna av kuggväxlar i vattenkraftverk. Anledningen var den allmänna uppfattningen att ett onormalt stort antal växlar havererat och menligt inverkat på tillgängligheten kraftverk försedda med växlar. Arbetsgruppen skulle samla in data om förekommande växlar och speciellt om de fel och haverier som förekommit under den senaste perioden. Felen skulle utvärderas och mot bakgrund av denna utvärdering skulle rekommendationer om åtgärder utarbetas med syfte att minska haveririskerna och förlänga livslängden för växlar i aktuell tillämpning. Man skulle också ge allmänna rekommendationer beträffande upphandling, installation samt drift och underhåll. I uppdraget ingick även att granska alternativa möjligheter till varvtalsanpassning mellan turbin och generator i vattenkraftverk.

Verksamheten i VAST upphörde vid årsskiftet 1992/93. Färdigställandet av denna rapport har skett i regi av Elforsk.

I arbetsgruppen har ingått:

Åke Grahn, Sydkraft Konsult AB (sammankallande)

Per Forssell, Skellefteå Kraftverk

Sune Olsson, Gullspång Kraft AB

Sten Lasu, VAST / Kraftverksföreningen

2 Bakgrund

I allmänhet är generatorerna i svenska vattenkraftverk direktdrivna, dvs turbin och generator går med samma varvtal.

Turbinens verkningsgrad är varvtalsberoende. Sambanden mellan varvtal, vattenflöde och verkningsgrad brukar illustreras i sk musseldiagram. Utgående från musseldiagrammet fastställs optimalt varvtal för turbinen vid dimensionerande vattenflöde och fallhöjd. Normalt blir de dimensionerande värdena de flöden och fallhöjder som bedöms gälla under huvuddelen av aggregatets drifttid. I det direktdrivna fallet bestäms generatorvarvtalet av turbinvarvtalet, generatorm "skraddarsys" för turbinen. Detta gäller i vart fall för aggregat större än ca 5 MW. Konsekvensen blir att ett lågt turbinvarvtal ger en generator med högt poltal, alltså med större geometriska dimensioner än vad ett högre turbinvarvtal skulle ge.

Varvtalsanpassning blir aktuell när man vill begränsa generatorns dimensioner t ex rörturbiner av bulbtyp där generatorm måste inrymmas i bulben och därför bör vara relativt högvarvig.

Som antytts kan varvtalsanpassning också vara lämplig vid små vattenkraftverk där man av kostnadsskäl vill använda standardgeneratorer. I VASTs minikraftprogram låg oftast det optimala turbinvarvtalet i området 200-400 rpm. Optimalt var då att välja en 8-polig asynkrongenerator med det synkrona märkvarvtalet 750 rpm. Utväxlingen blev alltså ca 1 till 2. Kuggväxlar av standardtyp användes genomgående i minikraftverken.

I uppdraget ingick som nämnts att granska andra möjligheter till varvtalsanpassning, första hand rem- och kilremsdrift. Remdrift har tillämpats i kraftverksdrift mycket tidigt, dock för mycket begränsade aggregatstorlekar. Även om materialutvecklingen har gjort dessa driftformer mer säkra och mindre underhållskrävande än tidigare har ändå arbetsgruppen bedömt det inte vara meningsfullt att i detalj granska dessa möjligheter. Tekniken måste fortfarande anses vara begränsad till aggregatstorlekar mindre än åtminstone 0,5 MW.

Intressantare är alternativet med frekvensomriktare. Här kan generatorm vara direktdriven även även lågvarvig turbin. Frekvensomriktaren får omvandla generatorns lägre frekvens till 50 Hz.

I detta fall får man dessutom fördelen av att turbinen (och generatorm) kan gå med ett optimalt variabelt varvtal som hela tiden anpassas till aktuell fallhöjd och pådrag. Än så länge är omriktare av de effektstorlekar som är aktuella även för små vattenkraftverk troligen alltför dyra för att totalekonomin skall bli acceptabel. Utvecklingen går dock snabbt och förhoppningsvis kan priserna sänkas inom en inte alltför avlägsen framtid. I bilaga 1 har problematiken med varvtalsanpassning beskrivits och några olika lösningar skisserats liksom hänvisningar gjorts till utländska projekt. Arbetsgruppen har dock ej

haft möjlighet att detalj studera tekniken utan föreslår att detta får bli föremål för särskild utredning.

3 Teknisk beskrivning av växlar

3.1 Växeltyper

Mekaniska växlar kan indelas i ett flertal olika typer såsom:

Överföring via formelement:

cylindriska kuggväxlar inkl. planetväxlar

koniska kuggväxlar

skruvväxlar

snäckväxlar

kuggremsväxlar

kedjeväxlar

Överföring via friktion:

planremsväxlar

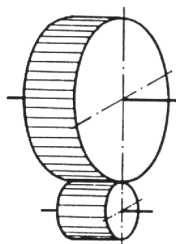
kilremsväxlar

rullväxlar

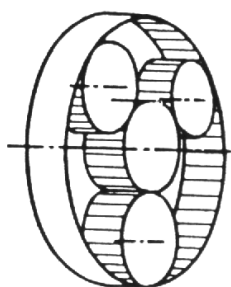
Inom vattenkraftindustrin förekommer flera av ovanstående växeltyper i olika sammanhang men för aggregatstorlekar över 250 kW är följande typer aktuella:

Cylindriska kuggväxlar är idag den vanligaste typen inom vattenkraftindustrin. Beroende på utväxlingsförhållandet och överförd effekt förekommer en- och tvåstegsväxlar. Tvåstegsväxlarna används vid högre utväxling men har något sämre rad än enstegsväxlarna.

Planetväxlar (cylindriska innerkuggväxlar) har en konstruktion som är mer komplicerad och medger högre effektöverföring. Ytermåtten är oftast mindre och in- och utgående axlar har samma centrumlinje. Detta är viktigt vid vissa inbyggnader som t ex koncept med turbin, växel och generator som en enhet. På grund av många roterande delar med höga krav på tillverkningstoleranser är planetväxlar dyra och används huvudsakligen för stora rörturbiner samt ifall med speciella inbyggnadskrav, som t ex Flygts aggregat.

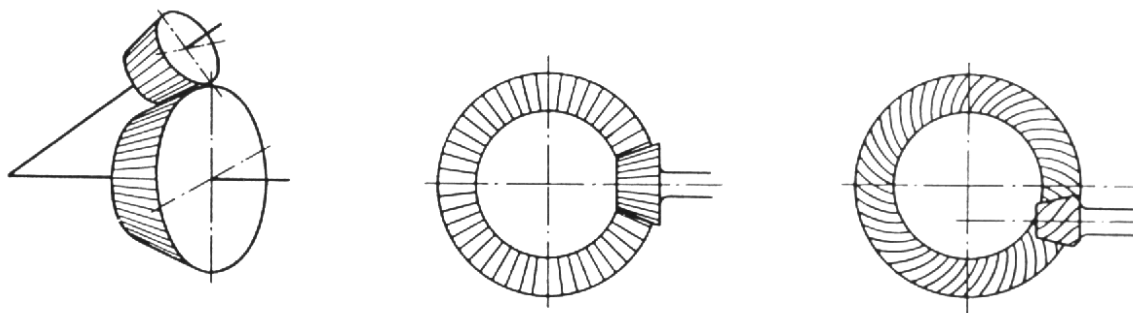


Figur 1. Cylindrisk yttrekuggväxel.



Figur 2. Planetväxel (cylindrisk innerkuggväxel).

Koniska kuggväxlar eller som de också kallas vinkelväxlar är ovanliga inom branschen i Sverige. Tillverkningen är mer komplicerad än för cylindriska växlar, dessutom är verkningsgraden sämre och priset högre. Växeltypen kan dock motiveras om stora fördelar för aggregatuppställningen erhålles.



Figur 3. Vinkelväxel (konisk kuggväxel).

3.2 Dimensionering

De växlar som idag används till vattenturbiner är standardiserade industriväxlar vilka tillverkas i ganska stora serier vilket medför relativt korta leveranstider och konkurrenskraftiga priser. Växeltillverkarna har idag god kvalitet på konstruktion och tillverkning. Den ökade precisionen medför dock att allt större krav ställs på inbyggnaden, montaget samt på oljans kvalitet och renhet.

Som underlag för dimensionering av växel erfordras uppgift om:

- Turbintyp och montageposition
- Turbineffekt, nominell och max
- Turbinvarvtal och rotationsriktning
- Turbinens rusningsvarvtal och rusningens tidslängd
- Generatoreffekt
- Generators infasnings- och kortslutningsmoment
- Generatorvarvtal
- Axialkraft på lågvarvsaxeln, storlek och riktning vid normaldrift

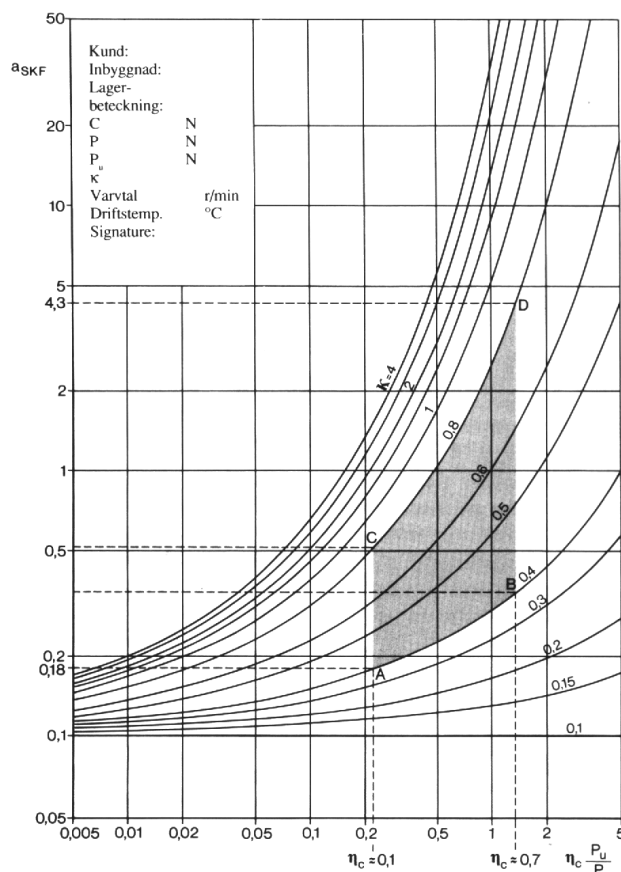
Axialkraft på lågvarvsaxeln vid snabbstopp och vid ev motordrift av aggregatet med stängd ledkrans (eller inloppsventil)

Drifttimmar per år

Antal start/stopp per dygn

Driftfaktor: Driftfaktorn är ett mått på de dynamiska lasterna på växeln. Utifrån driftförhållande räknas en driftfaktor fram som multipliceras med turbinens effekt och då anger hur kraftig växeln skall vara, dess storlek. Som exempel kan anges att många start och stopp per dygn kräver en något kraftigare växel. För dimensionering av växeln med hänsyn till momenttoppar vid infasning och kortslutning måste det moment som skall överföras via växeln beräknas. Detta moment blir normalt bara någon bråkdel av moment mellan stator och rotor generatoren. En för låg driftfaktor (liten storlek) kan leda till att önskad livslängd ej uppnås och en för hög driftfaktor (stor storlek) medför sämre verkningsgrad samt risk för lagerskador p.g.a. underbelastning. Vanligt förekommande driftfaktor för växlar till vattenturbiner är 1,6 till 2,2. Vid intagande av anbud på aggregat med växlar bör driftfaktorn efterfrågas för att anbuden skall kunna jämföras.

Livslängd: Dagens växlar är vanligtvis försedda med rullningslager vilka dimensioneras för en livslängd på mer än 100000 timmar enligt internationell kalkyleringsmetod, L_{10} . Detta innebär genomsnittligt att 10% av ett större antal lager kommer att haverera inom 100000 timmar och resterande 90% kommer att leva vidare ytterligare en tid. Medianlivslängden är ungefär fem gånger så stor som den nominella livslängden, L_{10} , dvs ca 500000h.



Radialrullager

A = ursprungliga förutsättningar ($\eta_c \approx 0,1$ och $\kappa = 0,4$)

B = förbättrad renhet - η ökad från 0,1 till 0,7

C = förbättrad κ - värde från 0,4 till 0,8 (tjockare olja, bättre kylning o.s.v.)

D = förbättring av både renhet och κ - värde

Ovanstående är ett exempel på hur man kan uppskatta de olika faktorernas inverkan på livslängden för ett visst radialrullager i en bestämd inbyggnad. Med ursprungliga förutsättningar blev livslängdsteorin 0,18 L_{10} . Genom att förbättra såväl smörjförhållandena som renheten skulle livslängden kunna ökas till

4,3 L_{10} , d.v.s. nästan 24 gånger så lång livslängd. Det är värt att undersöka möjligheterna till förbättring enligt ovan. Be därför SKF utföra lämpliga beräkningar för att få förslag på hur man i varje enskilt fall kan erhålla optimal livslängd.

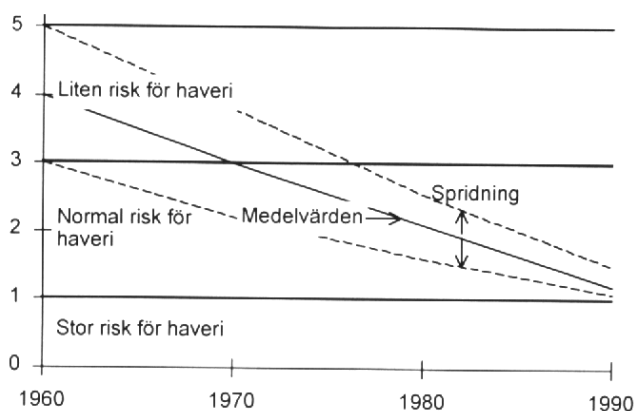
Figur 4. Lagerlivslängden påverkan av oljerenhet och smörjfilmstjocklek. P_u är utmattningsgränsen, P är den ekvivalenta lagerlasten η_c är en faktor som beskriver föroreningsgraden (ca 0,5 för kuggväxlar med cirkulerande filtrerad olja) och κ är relativa oljefilmstjockleken .ref.(6)

Speciellt för kuggväxlar är oljerenheten mycket viktig p.g.a. slitagepartiklarna från de härdade kuggarna. Att sätta in alltför kraftiga lager kan faktiskt orsaka kortare livslängd p.g.a. smetning i lagerbanorna om lagerlasten emellanåt är alltför låg. Den senaste livslängdsteorin från SKF visar på att oljerenhet och oljefilmstjocklek har synnerligen stor betydelse för lagerlivslängden, se figur 4.

Glidlager kan förekomma och har i princip obegränsad livslängd men är känslig för avbrott i smörjningen. Glidlager används ibland istället för stora rullager vid höga rusningsvarv. På kugghjulen bör minst 200000 timmar erhållas om lagerspelen är

intakta samt temperatur och oljerenhet/kvalitet acceptabel. Viktigt för kugghjulen är att uppriktning av axlar är perfekt så att kuggingreppet blir optimalt och lasten sprids på så stor area av kuggarna som möjligt. Annars ökar det risken för genombrott av oljefilmen.

Tack vare bättre material, bättre tillverknings- och beräkningsmetoder samt ökad forskning har de moderna växlar för varje generation blivit alltmer kompakta men med samma eller ökad prestanda. Denna utveckling har dock medfört att säkerhetsmarginalerna har reducerats, se figur 5, som visar utvecklingen för industriella kuggväxlar.



Figur 5. Förändring av skaderisken för nya kuggväxlar åren 1960-1990. Ref. (3).

3.3 Smörjning

3.3.1 Typer

Samtliga kuggväxlar som levereras till vattenkraftaggregat är idag helt avtätade och oljesmorda. I mindre växlar förvaras oljan i växelhuset med oljenivån en bit upp på kugghjulet/en. Vid rotation transporteras oljan via kugghjulen till de olika smörjställena. Denna typ av smörjning kallas för dopp- eller plasksmörjning. Plasksmörjningen används inte vid högre periferihastigheter (över 10-15 m/s) beroende på höga energiförluster.

För högre periferihastigheter måste trycksmörjning användas. Vanligtvis är då en oljepump monterad på den snabbgående axeln. Vid start och som reserv kan en elmotordriven pump svara för oljecirkulationen. Oljecirkulationssystemet förses med övervakningsutrustning och kylare om så erfordras.

3.3.2 Oljor

Dagens industriella kuggväxlar är maskinelement med hög precision, som ofta utsätts för i det närmaste ofattbara påfrestningar. Mellan två kuggar kan tryck på över 4000 MPa (40000 bar) råda. Under dessa förhållanden med hög belastning i kombination med både glidande och rullande rörelser mellan kuggarna är det av största vikt att samverkande ytor hålls isär av smörjmedlet. Det är här kuggväxeloljorna kommer in för att förhindra nötning och slutligen förstöring av kuggar och lager.

Påkänning i kuggar

När kraft överförs från ett kugghjul till ett annat utsätts kuggytorna för ytterst stora tryckpåkänningar. Detta yttryck närmar sig ofta kuggmaterialets hållfasthetsgräns. Dessutom alstras skjuvpåkänningar under ytan som kan uppgå till ca 30% av påkänningarna vinkelrätt mot ytan. Det är i dessa skjuvningsplan som sprickor kan bildas, vilket leder till slitage i form av små flagor som lossnar, så kallad pitting. Det kan vara svårt att föreställa sig att en oljefilm kan bildas under dessa betingelser, med höga hastigheter och belastningar. Lika svårt är att förstå varför inte all olja slungas eller pressas ut från ingreppspunkten. Förklaringen är att de extremt höga tryck det är fråga om ökar oljans viskositet i så hög grad att den ingreppet närmar sig fast tillstånd (solidifiering). Detta fenomen plus kuggmaterialets elastiska deformation gör att en fast oljefilm med tjockleken 0,1-2 µm kan bildas när de båda ytorna glider och rullar mot varandra.

Ytojämnheter

De flesta kuggytor ser ut att vara släta och jämna. En mikroskopisk undersökning visar emellertid att det finns en rad ojämnheter, toppar och gropar, från bearbetningen av kuggarna. En del av topparna kan tränga igenom smörjoljefilmen, så att metallytorna kommer i kontakt med varandra och blir så heta att de svetsar ihop.

Det är därför viktigt att man väljer en smörjolja som bildar en film som är tjockare än topparnas genomsnittliga höjd. Detta förutsätter noggrant val av viskositet för varje driftsfall. Smörjoljan skall dessutom förhindra skärning genom att bilda en tunn oxidhinna som motverkar tendensen till hopsvetsning. Detta sker genom val av rött högtryckstillsats (EP-tillsats)

Temperaturer

Temperaturen i en kuggväxels oljesump bör regel vara 40 - 60°C. Friktionsarbetet när en kugge rör sig över den samverkande kuggen kan höja temperaturen i oljefilmen upp till 200°C. Värmeutvecklingen samt mekanismens verkningsgrad beror i hög grad på det använda smörjmedlets molekylära struktur och dess traktionstal. Traktionstalet är beteckningen på friktionsmotståndet i den solidifierade oljefilmen.

Syntetiska oljor kan ha traktionstal på ca 0,03 medan mineraloljor har mellan 0,05-0,07. Lägre traktionstal betyder lägre ingreppstemperatur, högre verkningsgrad och mindre risk för skador på kuggetorna.

Smörjmedel

För dagens kuggeväxlar krävs expertkunskap för val av rätt smörjmedel. Smörjoljorna skall klara de höga krav de utsätts för i en modern växel. Bland kraven kan nämnas höga effekter, höga drifttemperaturer, låga förluster, långa underhållsintervall m.m.

Moderna smörjmedel för kuggeväxlar är resultat av avancerad forskning och utveckling i samarbete mellan oljeleverantörer och växeltillverkare. Smörjoljornas egenskaper ingår numera som hållfasthetsfaktorer moderna normer för kuggeväxeltillverkare. Normerna anger bl a att t ex vissa syntetiska lågfriktionsoljor medger upp till 40% ökad belastning med oförändrad säkerhet.

En bra kuggeväxelolja måste ge följande fördelar:

- Stor slitageskyddsförmåga.
- Beständighet mot oxidation.
- Skydd mot korrosion av såväl järnhaltiga som inte järnhaltiga material.
- Bevara kuggetornas hållfasthet i närvaro av fukt.
- Hög verkningsgrad och tålighet för höga temperaturer.
- Lång livslängd för kuggeväxeldelar.
- Långa bytesintervall för oljan.

Mineraler – eller syntetolja

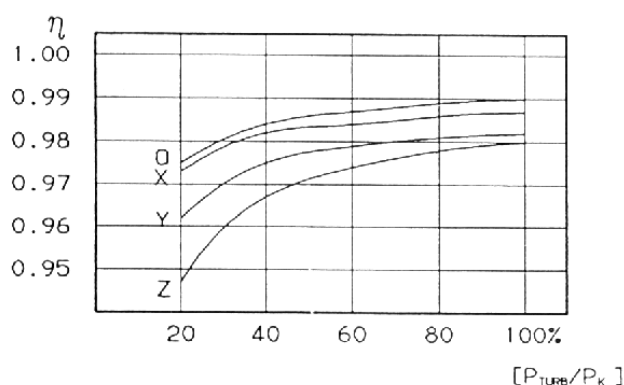
Syntetiska kuggeväxeloljor har mer homogen molekyluppbyggnad än mineraloljor och innehåller mindre temperaturkänsliga kolväten. Det ger oljan goda flytegenskaper även vid temperaturer ner under fryspunkten. God termisk stabilitet, dvs lång livslängd och låg koksning vid höga temperaturer, 150-200°C ,är ett annat kännetecken. Den termiska stabiliteten kan medge upp till 3 gånger längre bytesintervall. Även vid höga eller låga temperaturer är funktionen god och stabilare än hos mineraloljor, samtidigt som traktionstalet gör att energiförlusterna minskar.

Ur teknisk synpunkt är syntetoljorna ofta att föredra tack vare deras högre belastbarhet, längre livslängd, högre temperaturområde och att de kan vara bättre ur miljösynpunkt. Vid eventuellt byte till någon typ av syntetolja bör kontakt tas med växelfabrikanten, för dennes godkännande. Vissa tätningar kan t.ex. vara olämpliga i kombination med syntetoljor.

3.4 Verkningsgrader

3.4.1 Beräkningar

Det finns idag standardiserade beräkningsmetoder för växlars verkningsgrader. Exempel på verkningsgradens variation med avseende på last och utväxling visas i figur 6.



Figur 6. Växlarverkningsgraden vid olika utväxlingar som funktion av lasten för en typisk växel med generatorvarvtal 750 rpm. Utväxling 2:1 kurva 0, 4:1 kurva X, 6:1 kurva Y 8:1 kurva Z. Ref. (2).

3.4.2 Fältprov

För att verifiera uppgifterna om växlarverkningsgrader lät arbetsgruppen genomföra ett fältprov i Frykfors kraftstation som ägs av Gullspångs KraftAB. Man ville också undersöka förlusternas beroende av val av olja i växeln. Provet utfördes av Vattenfall Utveckling och är dokumenterat i ref. (11). Turbinen och växeln i Frykfors har märkeffekten 2500 kW. Utväxlingen är 3,96 med varvtalen 608 resp 156 rpm. Mätningarna gjordes med kalorimetrisk metod. Hela växeln med oljekylare isolerades med isolermattor. Precisions-termometrar anbringades på till- och avloppsrör från oljekylaren. Fältprovet utfördes under två dagar. Första dagen var växeln fylld med mineralolja och andra dagen med syntetolja. Själva mätningarna genomfördes under två timmar varje dag sedan stabila temperaturförhållanden uppnåts.

Med mineralolja uppmättes förlusterna vid märklast till 19,4 kW, dvs verkningsgraden var 99,2%.

Med syntetolja blev förlusterna 17,1 kW, verkningsgrad 99,3%.

Skillnaden blev betydligt mindre än vad teoretiska beräkningar indikerat. Ekonomiska kalkyler visar dock att förlustminskningen och syntetoljans längre bytesintervall motiverar den dyrare syntetoljan Frykforsfallet.

Arbetsgruppen har också haft tillgång till förlustmätningar som tidigare utförts av Sydkraft i Hemsjö Nedre Kraftstation. Dessa mätningar visade att syntetolja minskade förlusterna i växeln med ca 20% medan vårt försök sålunda endast gav 10% lägre förluster. Det bör dock beaktas att Hemsjö mätningarna med mineralolja resp syntetolja gjordes med relativt långt mellanrum vilket kan innebära att de yttre förhållandena inte var jämförbara.

3.5 Utveckling

3.5.1 Historik

De allra tidigaste växlar var gjorda helt trä eller av metallpinnar fastsatta i periferin på ett trähjul. Varvtalen var låga och effekterna små. Med tiden ökade krafterna som skulle överföras liksom kraven på rotationshastighet vilket gjorde att trähjulen övergavs.

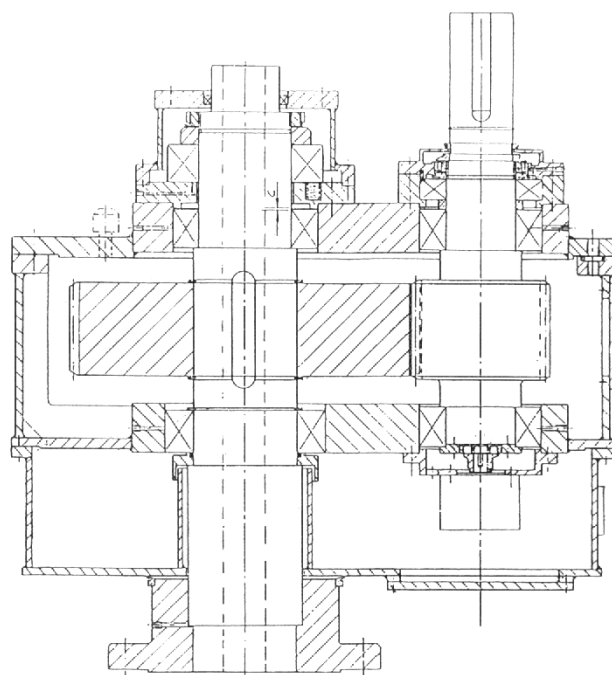
Tidigare fanns många växeltillverkare i landet men med ökande krav på precision och masstillverkning har de flesta upphört med sin tillverkning. Under årens lopp harväxlarnas storlek minskats med bibehållen prestanda. Det har kunnat ske med hjälp av bättre stålqualiteter (härldningsteknik), bättre olja och lämpligare utformning av kuggarna.

3.5.2 Pågående utveckling

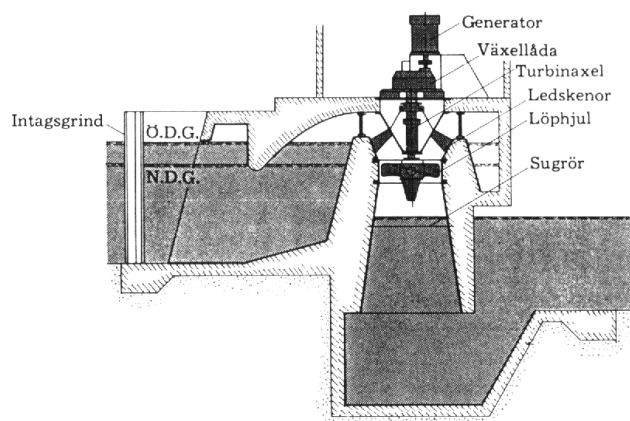
Utveckling pågår av den cylindriska kuggväxeln som medför att den ska kunna överföra ännu högre moment men med samma mått. Detta kommer dock troligtvis ej att medföra någon ökning av tillgängligheten för vattenkraftaggregat eftersom det ställer ännu högre krav på inbyggnaden och på oljekvaliteten/ renheten.

3.6 uppställningar och uppbyggnad

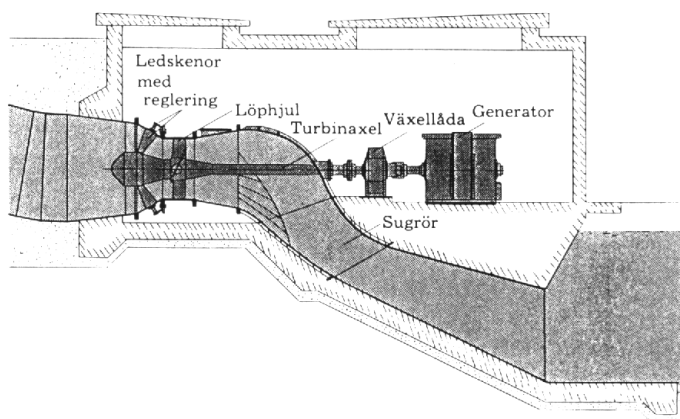
I det följande visas några figurer som visar uppbyggnader av kraftstationer med växlar. typexempel på några uppställningar och



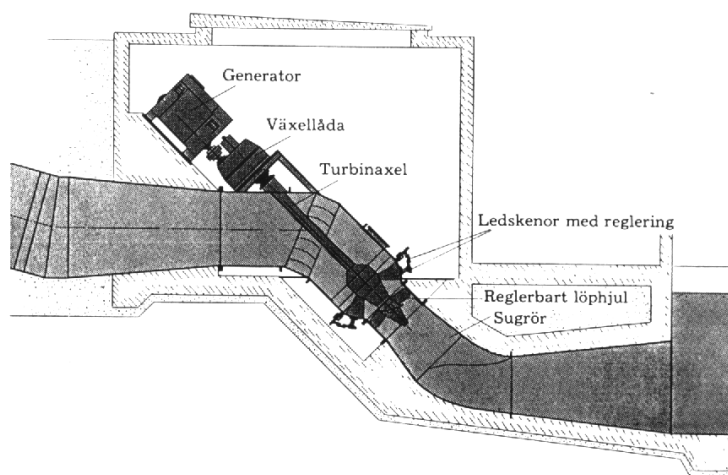
Figur 7. Sektionsritning vertikalväxel. Ref. (2).



Figur 8. Vertikal aggregatuppställning. Ref. (8)



Figur 9. Horisontell aggregatuppställning. Ref. (8)



Figur 10 Vinklad aggregatuppställning

4 Drifterfarenheter

4.1 Faktainsamling

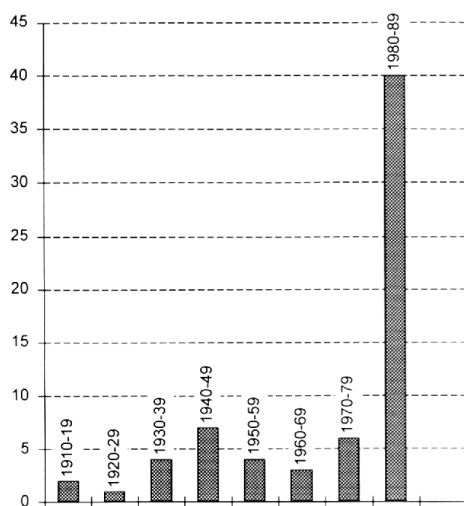
Enkätundersökning utfördes under 1991/92. Totalt inrapporterades 67 aggregat med växlar. Installationsår varierade mellan 1910-1989. Dessa 67 växlar representerar alltså 80 år och totalt ca 6.500.000 drifttimmar. Fördelning på installationsår enligt figur 11 och på växeltillverkare enligt figur 12.

Av de 67 aggregaten har 20 st rapporterats havererade/skadade. Samtliga dessa 20 har installerats efter 1975. 13 växlar havererade/skadades före 25000 (tjugofemtusen) drifttimmar.

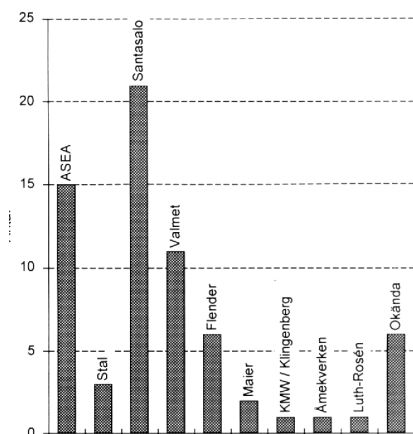
Denna rapport grundar sig på de drifterfarenheter som samlats in i Sverige och eftersom inga planetväxlar och endast en vinkelväxel blivit inrapporterad har de ej särskilt utvärderats. Dock kan sägas att det mesta som sägs även gäller för dessa typer.

Utöver insamlingen av drifterfarenheter har kontakter tagits med leverantörer, tillverkare av växlar, turbiner, lager och smörjolja samt med vibrationskonsulter, se referenslista.

Rapporterade växlar installerade efter 1975 med haveri eller allvarliga skador visas i tabell 1. Skadetyperna på dessa visas i tabell 2.



Figur 11. Rapporterade växlar i drift fördelade på installations år



Figur 12. Rapporterade växlar i drift fördelade på åxeltillverkare.

Rapporterade skador på växlar installerade efter 1975.

	<u>Inst. år</u>	<u>Växelfabrikat</u>	<u>Drifttimmar</u> <u>totalt</u>	<u>Drifttimmar</u> <u>vid haveri</u>	<u>Skador</u>
Sydskraft					
Östanå 2	1982	Asea	28000	10000	Axelbrott
Horkoneryd 1	1984	Santasalo	35000	4000	Kuggskador
Hemsjö Nedre 1	1982	Asea	74000	16000	Kuggskador
Knäred Nedre 2	1985	Flender	40000	15000	Lagerskador
Knäred Nedre 3	1985	Flender	40000	20000	Lagerskador
Knäred Övre 2	1985	Flender	40000	20000	Lagerskador
Knäred Övre 3	1985	Flender	40000	25000	Lagerskador
Fröslida	1983	Asea	55000	45000	Lagerskador
Gullspångs Kraft					
Kolsäter 1	1976	Santasalo	80000	60000	Lagerskador
Åmotfors 1	1979	Santasalo	60000	20000	Kuggskador
Skellefteå Kraft					
Bygdsiljum 1	1986	KMW/Klingenberg	41000	3900	Kuggskador
Sågfors 2	1979	Valmet	80000	80000	Lagerskador
Stormyrforsen 1	1977	Santasalo	42000	15000	Oljepump
Bruksfors 3	1982	Santasalo	70000	70000	Kuggghjul
Fredriksfors 2	1977	Santasalo	45000	25000	Lagerskador
Stora Kraft					
Dalstuga	1982	Santasalo	63000	45000	Koppling
Korsnäs AB					
Furudal 3	1977	Santasalo	65000	20000	Labyrinttätning
BGK					
Ekeby 1	1986	Santasalo	35000	33000	Kuggbrott
Skinnskatteberg 1	1982	Santasalo	59000	44000	Kuggbrott
Vattenfall					
Slagnäs	1989	Valmet	19000	15000	Oljepump
Summa	20st		1011000	585900	
Medelvärde			50550	29300	

Tabell 1. Rapporterade växlar installerade efter 1975 med haveri eller allvarliga skador.

Drifttimmarna är i vissa fall uppskattade värden

Skadetyper/årtal

Skadetyper/årtal

	SUMMA	KUGG-SKADA	LAGER-SKADA	AXEL-BROTT	OLJE-PUMP	KOPPLING	ÖVRIGT
0-5 år	13	5	4	1	2		1
5-10-år	6	2	1			1	
10-15 år	1		1				
15-20 år	0						

Skadetyper/drifttimmar

0-25000	13	4	5	1	2		1
5-50000	4	2	1			1	
50-75000	2	1	1				
75-100000	1	1					

Tabell 2. Skadetyper på rapporterade haverier/allvarlig skada fördelat på årtal respektive drifttimmar.

4.2 Kommentarer till haveristatistiken

Nedan görs ett försök till härledning av skadeorsakerna. Eftersom stationerna vanligtvis är obemannade och övervakningsutrustningen enklare än för större aggregat, har det i flertalet fall lett till omfattande skador på växellådorna innan aggregatet stoppats, vilket försvårat skadeutredningarna. För vissa av haverierna har det gjorts omfattande utredningar medan det för andra har gjorts mer eller mindre goda antaganden.

Oljepump och axeltätning (labyrinttätningen kring lågvarvsaxeln mot turbinen) är skador troligen orsakade av kvalitetsproblem på växeln.

Kopplingsskadan berodde troligtvis på dålig uppriktning.

Kugg- och lagerskadorna har troligen någon eller några av följande orsaker:

- Uppriktningsfel mellan turbin och växel eller mellan växel och generator.
- Fundament. Vissa betongfundament och stålstativ har varit underdimensionerade vilket orsakat uppriktningsfel, som varierar vid olika laster, och/eller skadliga vibrationer.
- Kopplingar med gummielement ska undvikas då de i några fall orsakat torsionsresonanser som skadat kugghjulen.
- Alltför löst påkrympt drev.
- Oljekvalitet och renhet kan ha varit otillräcklig i flera fall men detta är ej styrkt. Det finns däremot statistik från andra branscher och tester som visat att oljekvaliteten och oljerenheten har synnerligen stor betydelse för livslängden på kuggväxlar.

Flertalet av de skadade växslarna har under sin drifttid haft ytterligare haverier eller skador men detta är ej medtaget i statistiken. Orsaken till detta skulle kunna vara:

- Skadeorsaken har ej eliminerats, t ex underdimensionerat fundament.
- Skadan orsakade följdskador och skadade delar byttes ej ut eller åtgärdades.
- Växellådan rengjordes ej tillräckligt före återstart efter reparation.
- Kvalitetsproblem i växellådan.

5 Upphandling och installation

5.1 Växel kontra direktdrift

Vid projekteringen är det inte självklart om det skall vara växel eller direktdrift. Ofta måste priser tas in på huvudkomponenter för att möjliggöra en bedömning av alternativen. Det som kan påverka valet mellan växel och direktdrift är skillnad i kostnader för:

Generator

Asynkron eller synkron. Är generatoreffekten hög i förhållande till nätet måste man fasa asynkrongeneratoren. Värdering görs av reaktiv effekt, förluster, ljud nivå på högvarvig generator och av kylning. Observera att växel i vissa fall kan ge lägre generatorförluster.

Turbin

Turbin utan växel blir billigare eftersom växel, vissa fundamentbalkar och konsoler utgår. I vissa fall kan dock verkningsgraden skilja mellan ett direktdrivet utförande (varvtalet måste väljas med hänsyn till generatorvarvtalet) och växlat utförande (turbinvarvtalet kan väljas mer optimalt.).

Växel

Värdering av växelförlusterna.

El.utrustning

Övervakningsutrustning för växel tillkommer.

Byggekostnader

Det kan vara stora skillnader beroende på uppställning, fundament, byggtid, m m.

Traverskostnader

Erforderlig lyftkapacitet påverkar kostnaden. En högvarvig generator är vanligtvis den tyngsta enskilda delen och kan kräva ökad traverskapacitet (eller mobilkranskapacitet) jämfört med en direktdriven som ofta monteras i delar.

Montagekostnader

Montagetiden är vanligtvis längre för direktdrift och påverkar då hela byggtiden. Även avbrottstiden påverkas om det gäller förnyelse i befintlig station

Leveranstid

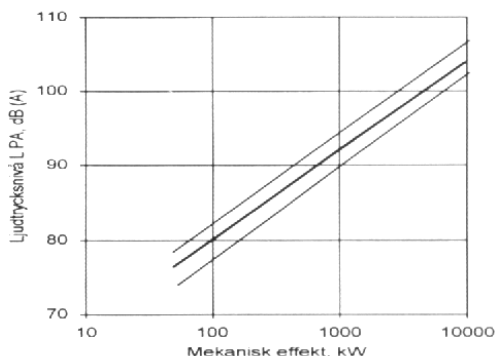
Vanligtvis är skillnaden i leveranstid för direktdriven resp växlad liten men kan ändå påverka valet.

Underhåll

Löpande underhåll, revisioner, åtkomlighet, tillgänglighet, m.m.

Ljudnivå

Inne i stationen såväl som utanför (se Naturvårdsverkets Råd och riktlinjer för externt industribuller!). Växel och högvarvig generator har betydligt högre ljudnivå vilket kan medföra kostnader för åtgärder beroende på olägenheten, t ex stomljudsisolering, ljudkåpor, m.m. Ljudkåpa kan medföra att kylsystemet måste upp dimensioneras. Buller kan också motivera att kontrollrum behövs som är delvis isolerat från ljudet. Diagram visande ljudnivån för olika effekter/storlekar visas i figur 13. Observera att ljudet kan påverkas av byggnad eller uppställningssätt. I vissa fall kan bullret bli högre på plats.



Figur 13. Exempel på växlars ljudnivå på 1 m avstånd i frifältsuppställning. Ref. (2).

Livskostnader, LCC

För att få fram ett bra beslutsunderlag bör en LCC-jämförelse göras. LCC (Life Cycle Cost - livstidskostnad) inkluderar investeringskostnader och underhållskostnader samt kostnader för förluster under t ex 40 år. Vid jämförelse mellan alternativ räcker det med att studera och värdera skillnaderna mellan alternativen vilket är relativt enkelt. Man får göra vissa antaganden för framtida kostnader men det blir ändå ett bra underlag för valet. Ett exempel visas i tabell 3.

Typ					
Varvtal	333,3 rpm				
Generator					
Pris	4 900 000 kr		1 850 000 kr		
Tomgångsförluster	594 000 kr		412 000 kr		
Belastningsförluster	551 000 kr		688 500 kr		
Reaktiv reglerförmåga	256 000 kr		255 600 kr		
Montage	155 000 kr		29 000 kr		
Driftsättning	38 000 kr		29 000 kr		
Lagerbyte vart 10: år ^{*)}	0 kr	150 000 kr/gång	157 000 kr	6%, 40 år	
Leveranstid 15 mån	0 kr	13 mån	0 kr		
Bygg					
Travers	0 kr		50 000 kr		
Fundament m.m.	75 000 kr		0 kr		
Ventilation lika	0 kr		0 kr		
Växel					
Prisdifferens	0 kr		450 000 kr		
Ljudisolering	0 kr		50 000 kr		
Tomgångsförluster	0 kr		183 000 kr		
Belastningsförluster	0 kr		425 500 kr		
UH varje år ^{*)}	0 kr		35 000 kr		
UH vart 3:e år(oljebyte) ^{*)}	0 kr	27 000 kr/gång	128 000 kr	6%, 40 år	
Lagerbyte vart 10:e år ^{*)}		293 000 kr/gång	306 000 kr	6%, 40 år	
Kuggbyte vart 20:e år ^{*)}		353 000 kr/gång	110 000 kr	6%, 40 år	
Totalt	6 569 000 kr		5 158 600 kr		
Merkostnad	1 410 400 kr				
*) Inklusive produktionsbortfall, materiell och arbetskostnader					

5.2 Upphandlingar

Nedan ges uppgifter som bör lämnas i anbudsförfrågan. Ofta levereras växellådan av turbinleverantören som då svarar för flera av nedanstående uppgifter:

- Turbintyp, montageposition, typ av kopplingar
- Turbineffekt, nominell och max
- Turbinvarvtal och rotationsriktning
- Turbinens rusningsvarvtal och tidslängd
- Generatoreffekt
- Generatorns infasnings- och kortslutningsmoment
- Generatorvarvtal
- Axialkraft och radialkraft på lågvarvsaxeln, storlek och riktning vid normaldrift
- Axialkraft på lågvarvsaxeln vid snabbstopp och vid ev. motordrift av aggregatet med stängd ledkrans eller inloppsventil
- Drifttimmar per år och antal start/stopp per dygn

Kravspecifikation/ minneslista

- Driftfaktor minst 1,6. För driftförhållanden med flera start/stopp per dygn bör denna ökas till 1,8 eller 2,0. Momenttoppar vid infasning och kortslutning som överförs via växeln skall beräknas
- Livslängden för lager min 100000 timmar. Övriga livslängder min 40 år kontinuerlig drift. Beroende på typ av uppställning av aggregat och därmed avstånd mellan växel och turbin bör man vara observant på vilken typ av lager som är lämpligt som turbinstyrlager för att minimera införandet av radiallast till växeln.
- Växeln skall klara kontinuerlig rusning utan kylvattencirkulation i 2 timmar utan att lagerlivslängden påverkas.
- Kugghjulen bör vara sätthärdade så att kuggarna är sega med härdad, slitstark yta. Toleransklass ISO 5 (slipade kuggar).
- Vibrationsnorm SS-ISO 2372, klass 4, vibrationshastighet max 2,8 mm/s RMS (leveransgräns), ska innehållas på hela aggregatet, turbin-växel-generator.
- Växeln skall vara förberedd för syntetolja (tätningar som ej påverkas).
- Koppling med gummielement skall undvikas.
- Krav på ljudnivå, behövs extra ljudkåpa?
- Kylsystem där cirkulationsoljan kyles med fläktkylare eller vattenkylare, öppen eller sluten cirkulation med termostatsstyrning för rätt arbetstemperatur. För vattenkylare kan syrafast material vara nödvändigt.
- Växeln ska vara försedd med lucka, tillräckligt stor för att kunna påföra märkfärg och inspektera kuggingreppen. Inbyggd oljepump måste kunna bytas genom lucka utan att demontera växeln.
- Övrig utrustning:
 - Växeln skall vara försedd med andningsfilter samt anslutningar som möjliggör enkelt oljebyte och enkel oljeprovtagning.
 - Smörjoljefilter med filtreringsgrad 20 μm .
 - Off-line filterkrets med filtreringsgrad 6 μm , fast monterad eller mobil om snabbkopplingar finns på aggregatet.
 - Mätning för stötpuls- alt. vibrationsmätning för periodisk tillståndskontroll. För vissa aggregat måste mätningarna dras till sidan av aggregatet för att möjliggöra mätning under drift.
 - Oljetrycksvakt, temperaturvakt och manometer ingår normalt. Komplettering kan göras med termostatsstyrd stilleståndsvärme, oljenivåvakt, termometer, oljeinflödesvakt. För stilleståndsvärmaren gäller att den måste vara placerad horisontellt min 60 mm under lägsta oljenivå samt ha en yteffekt av max 1 W/cm².
 - Rusningsvakt på aggregatets/växels lågvarvssida.
- Leveransen ska inkludera ritningar som visar växeln i sektion med uppgifter på antal kuggar och lagerdata för att bl.a kunna analysera vibrationsmätningarna. Dessutom ska övriga installations- och - driftsanvisningar som är framtagna av växel tillverkaren bifogas.
- Vid upphandling kan SMS Handbok 112, "Kugg- och snäckväxlar" användas som referens.

5.3 Montage

Vanligtvis har växeltillverkaren instruktioner för fundament, montage och uppriktning. Eftersom det oftast är turbinleverantören som monterar växellåda och generator är det viktigt att man som beställare/slutkund bevakar att dessa instruktioner följs. För att godkänna leveransen med avseende på tillverkning och installation är en grundlig vibrationsmätning av hela aggregatet att rekommendera. Vid en sådan mätning upptäcks om växellådan är felfri (korrekt monterad, inga lagerskador eller kugg-19 skador), dålig uppriktning, underdimensionerade fundament eller ståldetaljer, resonans i fundament och komponenter, dåliga eller felaktigt monterade kopplingar, m.m. samt motsvarande för turbin och generator. Dessutom bör en kontroll av kuggningreppsbilden efter körning med last göras för att spåra ev. uppriktningssfel eller deformationer av fundament.

6 Drift och underhåll

6.1 Olja

Normalt används mineralolja av typ ISO VG 220. I vissa fall används ISO VG 150. Syntetolja kan användas med tanke på längre bytesintervall och bättre pumpbarhet vid låga temperaturer.

Oljetemperaturen bör kontrolleras vid varje tillsynsronda och noteras. Temperaturen skall vara stabil och ej för hög vilket kan öka slitagerisken drastiskt. Man kan även notera hur mycket kylning man tillsätter för senare analys av växelns kondition.

Vid påfyllning av olja från fat eller dyl. skall oljan filtreras innan den påfylls växellådan. Vid påfyllningsstället skall det vara tydligt skyltat med vilken olja som finns i växellådan. Man skall redan vid installationen av en ny växel kontrollera att det finns en pluggbar tappkran i botten på växeln så att man kan tappa hela växeln på olja vid oljebyte.

Filtrering skall ske kontinuerligt "on-line" över ett filter där man strävar efter så hög filtreringsgrad som möjligt (20 µm eller mindre) för att skapa förutsättning för lång livslängd på lager och kuggar. Med fördel kan filtret vara så monterat att det går att byta under drift. Man bör rådgöra med olje- och växelleverantören vilket filter som är lämpligast. Oljeanalys kan utföras på olika sätt med varierande tillförlitlighet. En viktig sak vid oljeprovtagning är att alltid använda rena provflaskor, sprutor mm. Enklaste provet kan man göra genom att ta representativ olja från växellådan och fylla upp ett provglas och låta det stå. Efter en tid kommer de tunga partiklarna att sjunka till botten. Ett betydligt tillförlitligare sätt är att lämna in olja till något lämpligt labb t.ex. FFV, Vattenfall Utveckling eller något oljeföretag och låta göra partikelräkning varefter man gör en utvärdering om det verkar normalt. Man får även en kontroll att det stationära filtret fungerar. Mer om oljeanalys står i underhållsbok för kraftföretag kapitel G2.

Gränsvärden för byte av olja kan erhållas av växelleverantören. Exempel visas i figur 14.

VALMET

910709 JK

CHEMICAL OIL EXAMINATION

SOME LIMIT VALUES FOR INDUSTRIAL GEAR OILS:

1. VISCOSITY:

- CHANGES WITHIN ONE ISO-GRADE IS ALLOWED
- REASONS FOR THIS HAS TO BE EXAMINED

2. PERCENTAGE OF WATER

- LESS THAN 0,5 % IS COMMONLY ALLOWED IF SAMPLE IS OTHERWISE ACCEPTABLE
- 1,0 % IS ABSOLUTE MAXIMUM

3. TAN mg KOH/g NEUTRALIZING-/ACIDFIGURE

- MAX. 2,0

4. INSOLUBLE PARTICLES (all silt including metal particles):

- MAX. 200 mg: Cu: 50 ppm MAX
Fe: 200 ppm (500 ppm absolute max.)
Ni, Cr, Al, Mg, others: 50 ppm/metal
Si: 100 ppm

5. APPEARANCE:

- AS COMPARED WITH UNUSED OIL
- UNEXPECTED CHANGES MAY INDICATE WEAKENING OF OIL

Figur 14. Exempel på gränsvärden för oljeföroreningar i kuggväxel. Ref. (1).

6.2 Koppling

Kopplingarna mellan växel och turbin, växel och generator kontrolleras lämpligast vid den årliga översynen av växeln. Man undersöker om det finns t.ex. onormala glapp, oljeläckage, deformationer, missljud mm. Bultar och muttrar kontrolleras så att de är åtdragna.

6.3 Kylning

Luftkylares luftvägar rengörs med tryckluft och trasor. Var särskilt noga med att rengöra fläktvingarna eftersom de kan skapa vibrationer på grund av obalans. Kontrollera om det finns sprickor och oljeläckage. Där vatten används som kylmedia skall man vara observant på rost (metallvandring) vid kopplingar och skarvar. Det är inte ovanligt att olika metaller blandas (spänningskedjan!). Tubkylare rengörs vanligtvis med nylonborste. Kontrollera att inget läckage mellan vatten och olja finns vilket vore förödande för växeln. Om man har ett högre tryck på oljan över kylaren undviker man risken att vatten kommer in i växeln men man riskerar att oljan kommer ut i vattendraget i stället vid öppet system.

6.4 Kuggar

Vid oljebyte, årlig inspektion eller vibrationsmätning bör man kontrollera förslitning av kuggarna och skador på kuggflankerna. Har dessa skador eller vibrationsnivåer ökat markant måste man snarast undersöka orsaken och åtgärda felet. Sådana fel kan komma från felaktig olja, vatten i oljan, defekt oljesmörjning, att fundamentet gett vika, tillverkningsfel, fel uppriktning, felaktigt val av växel mm.

6.5 Lager

Man skall redan vid upphandling av växeln begära data på lagren. Dessa uppgifter kan t ex vara till hjälp vid planerat lagerbyte eller vid vibrationsmätning.

6.6 Vibrationsmätning

Med dagens mätteknik erbjuds flera bra verktyg för att mäta vibrationer i växellådor. Detta gäller både vibrationer från rullningslager och kuggingrepp. Lagerslitage från glidlagraade växellådor kan däremot vara svårupptäckt med vibrationsmätning.

Det finns idag metoder där vibrationer från de olika maskinelementen kan särskiljas. Detta gör att man kan detektera tillväxande skador utan att luras av belastningsvariationer. Växellådor och deras kuggsteg uppvisar av naturliga skäl stora förändringar vibrationsnivå när belastningen varierar mellan mätningarna.

Detekterbara fenomen i/vid växellådor som man kan se vid vibrationsmätning är t.ex.:

- Kuggslitage. Vid flera kuggsteg kan man avläsa vilket eller vilka av dem som är slitet.
- Felaktigt kuggspel.
- Råa kuggflanker (ex under inkörning av nytt kuggsteg).
- Lagerglapp.
- Defekter hos inbyggda oljepumpar.
- Defekta axelkopplingar.
- Uppriktningsfel.

Erfarenheter visar att uppriktningsfel tycks ha stor betydelse för livslängden, i synnerhet för vinkelväxlesteg och lager som dimensionerats för att ta radiell last. Det är nämligen så att många uppriktningsfel orsakar axiella vibrationer hos axlarna. Dessa vibrationer har en stor negativ inverkan på de nämnda komponenterna.

När det gäller förvarningstid för fel innan de leder till haveri så kan man som tumregel säga att vid normalt åldrande (ex växande pittingskador i lager och kuggflanker) syns skadan ofta minst 3 månader innan den leder till haveri. Detta gäller för maskiner som går i kontinuerlig drift.

Förenklade periodiska stötpulsmätningar eller vibrationsmätningar bör göras med intervall på ca 3 månader. Det finns idag flera bra system på marknaden som underlättar utvärderingen.

7 Rekommendationer

Den genomförda undersökningen visar att tillförlitligheten på de under senare år levererade växlar inte varit tillfredsställande. Arbetsgruppen menar att följande speciellt måste beaktas för att öka tillförlitligheten till acceptabel nivå.

- Vid inköp av nya växlar bör kravspecifikation enligt avsnitt 5.2 följas. Speciellt bör kraven avseende växelns driftfaktor, lagrens livslängd, lagrens förmåga att klara rusning och materialval för kugghjul observeras.
- Vid montaget måste uppriktningen göras mycket noggrant. Stabila fundament och stålstativ erfordras så att uppriktningen blir bestående och resonanser undviks.
- Val av oljekvalitet är viktig. Ur teknisk synpunkt är syntetolja att föredra. Den har högre belastbarhet, bättre åldringsbeständighet, bättre temperaturegenskaper, ger lägre förluster och är mer hanteringsvänlig än mineralolja. Största möjliga renhet hos oljan är viktigt liksom hög filtreringsgrad. Vid byte av oljekvalitet och filtreringsgrad bör växeltillverkaren kontaktas.
- Serviceanpassat utförande måste eftersträvas, speciellt måste det vara lätt att utföra oljebyte och att ta oljeprover. Vidare bör det finnas möjlighet att inspektera kuggingrepp.
- Underhållsprogram enligt avsnitt 6 bör upprättas. Speciellt viktigt är:
 - Oljeanalys med partikelräkning
 - Vibrationsmätning med frekvensanalys
 - Inspektion av kuggingrepp
 - Filtreringsgrad mindre än 20 µm
 - Temperaturövervakning

8 Referenser

Uppgiftslämnare

1. Valmet OY
2. Santasalo Svenska AB
3. Mobil Oil AB
4. Cantribo AB
5. Statoil
6. SKF
7. Nåiden Teknik AB
8. Waplans Mekaniska Verkstads AB
9. ABB Generation
10. Kvaerner Turbin AB
11. Frykfors kraftstation, jämförelse av växelförluster.
Vattenfall Utveckling AB. 1993-10-04.

A Frekvensomriktare för varvtalsanpassning i vattenkraftverk

A.1 Allmänt

Genom att i vattenkraftstationer tillämpa modern kraftelektronik i form av frekvensomriktare erhålls frihet att driva turbingeneratoraggregatet med det för varje driftsituation lämpligaste varvtalet. En frekvensomriktare kan exempelvis under vissa betingelser ersätta en mekanisk växel. Generatorn måste då givetvis dimensioneras elektriskt och mekaniskt så att den kan drivas med det lägre turbinvarvtalet.

Fördelar med frekvensomriktare kan vara:

- Förlusterna kan minskas genom att aggregatet drivs med ett för varje driftsituation lämpligt varvtal. Framförallt i kraftverk med varierande fallhöjd innebär variabelt varvtal att verkningsgraden kan höjas. Detta gäller för Francisturbiner, semikaplan och propellerturbiner (med fasta ledskenor och löphjulsblad). För Kaplanturbiner blir förlustminskningen mindre. Se följande avsnitt som i huvudsak bygger på en tidigare VAST-utredning.
- Bullernivån kan avsevärt minskas eftersom mekaniska växlar är en av de största bullerkällorna i vattenkraftverk. Även om växeln förses med en utrymmeskrävande och underhållsförsvårande ljudkåpa får man räkna med en bullernivå upp mot 80 dB (A) för aggregat av storleksordningen 1 MW. Se fig 13 i rapporten! Observera dock att frekvensomriktaren i sig själv också orsakar ljudstörningar.
- I de fall man av ekonomiska skäl vill välja enklast tänkbara turbintyp (propellerturbin) kan frekvensomriktare genom varvtalsvariation ge möjlighet till viss reglering av vattenflödet genom turbinen (och därmed av uteffekten från turbinen).
- Underhållskostnaderna kan sänkas eftersom frekvensomriktare torde vara mindre underhållskrävande än mekaniska växlar.
- Den relativt dåliga tillgänglighet för mekaniska växlar, som denna undersökning indikerar, pekar mot att frekvensomriktare kan medföra förbättringar även i detta avseende.
- Utrymme kan inbesparas och därigenom anläggningskostnader om det gäller nyanläggning. De elskåp som frekvensomriktaren med kring utrustning installeras i fordrar visserligen ungefär samma utrymme som växeln men placeringen är friare. Vid horisontella aggregat torde eliminering av en växel innebära en icke oväsentlig minskning av stationsbyggnaden medan man kan bortse från denna aspekt vid vertikala aggregat.

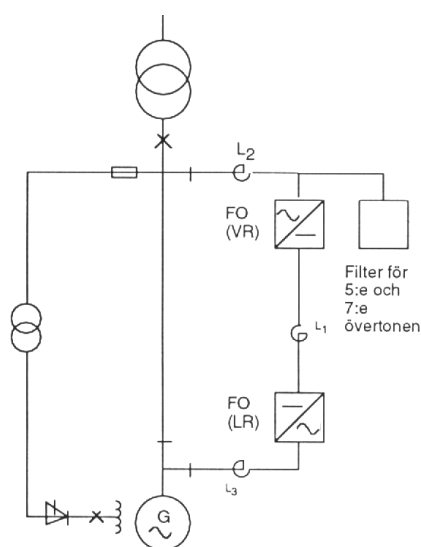
Allmänt gäller att förutsättningarna för att tekniken med varvtalsvariation skall vara ekonomisk givetvis är betydligt bättre om det gäller en helt ny station jämfört med om det gäller ombyggnad av en befintlig.

A.2 Teknik för variabelt varvtal

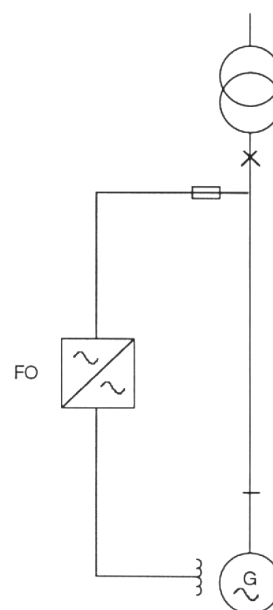
Frekvensomriktaren i den tänkta tillämpningen består egentligen dels av en likriktare, dels av en växelriktare i 6-pulskoppling. I likriktaren omvandlas den från generatormotorkommande strömmen av varierande frekvens till en likström. Denna likström omvandlas i sin tur i växelriktaren till en 50-periodig ström som matas ut på nätet. Förutom lik- och växelriktarna behövs strömbegränsnings- och glättningsreaktorer liksom ett filter mot övertoner.

Frekvensomriktarens förluster är vid fullast 1-1,5%.

Nedanstående två alternativ torde bli mest aktuella.



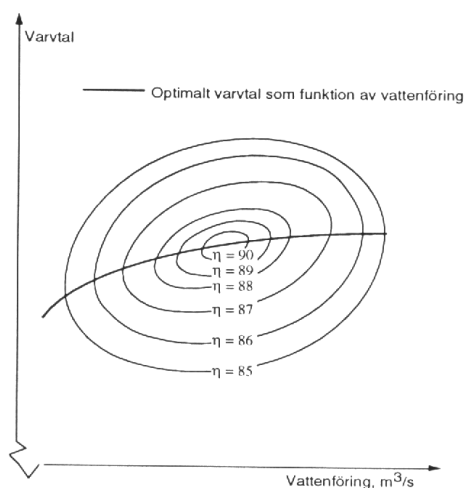
Alternativ 1: Konventionell synkron- eller asynkrongenerator. Frekvensomriktare in-kopplas mellan generator och nät. Aggregatet kan köras även om frekvensomriktaren havererar, dock givetvis med konstant varv.



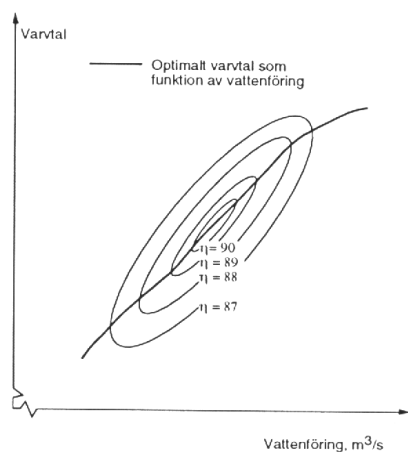
Alternativ 2: Generator med cylindrisk rotor med trefaslindning som magnetiseras från frekvensomriktaren med variabel frekvens. Omriktaren behöver bara dimensioneras för ca 20% av generatoreffekten.

A.3 Samband mellan varvtal och verkningsgrad

Sambanden mellan turbinens verkningsgrad, vattenflöde och varvtal brukar illustreras i sk musseldiagram. Dessa diagram grundas normalt på prov av modellhjul. Resultaten räknas om till fullskaleturbiner med hjälp av särskilda formler. Utgående från musseldiagrammen fastställs optimalt varvtal och pådrag (vattenförlust), dvs det varvtal och pådrag som ger maximal verkningsgrad för den aktuella turbinen vid nominell fallhöjd.



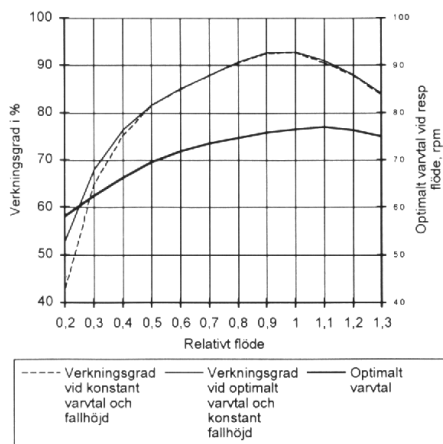
Musseldiagram för kaplanturbin



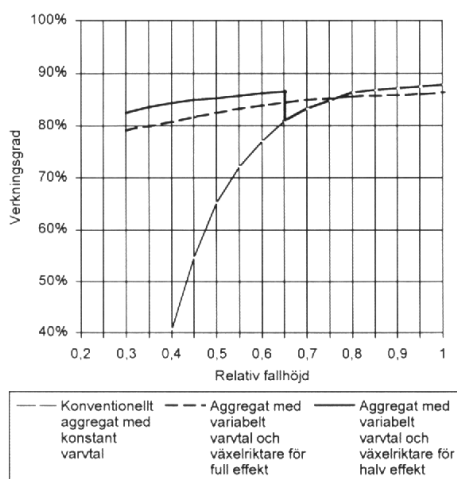
Musseldiagram för propellerturbin

Utgående från några typiska musseldiagram och genom att utnyttja de samband som gäller mellan de olika variablerna har diagrammen nedan konstruerats. Diagrammen är endast avsedda att ge en kvalitativ bild av de tendenser som gäller när varvtalet varieras. Viktigt är också att beakta att utgångsmaterialet bygger på turbinkonstruktioner avsedda för konstant varvtal. Om konstruktören får frihet att från början designa turbinen för variabelt varvtal kan möjligen bättre resultat uppnås.

Exempel på samband mellan flöde, varvtal och verkningsgrad för en Francisturbin med nominella varvtalet 75 rpm vid konstant fallhöjd



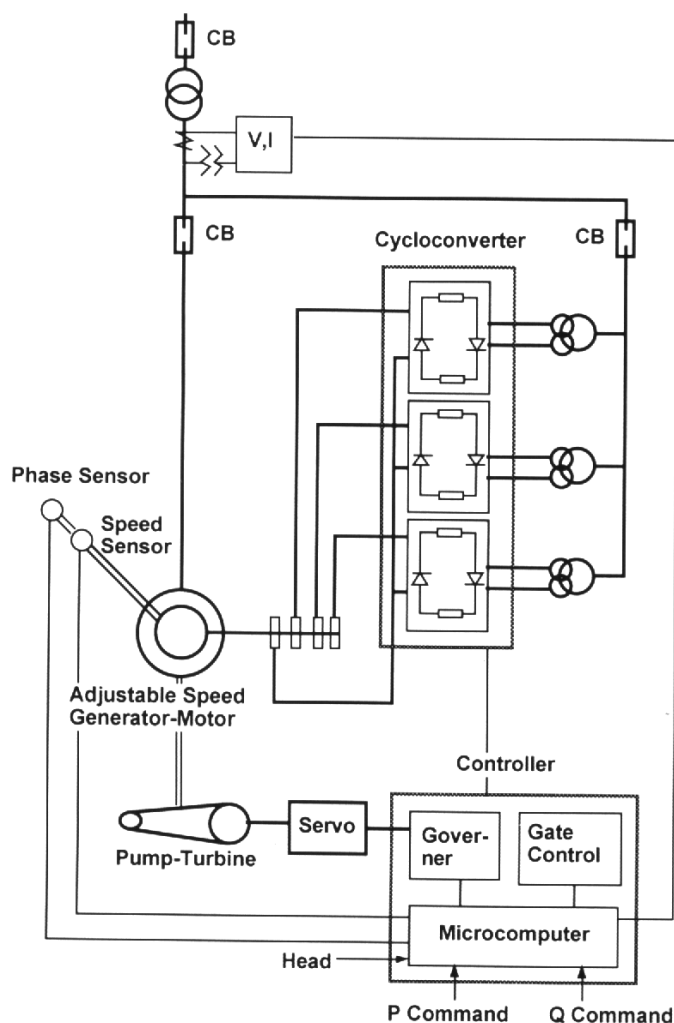
Exempel på verkningsgrad som funktion av fallhöjd för aggregat med konstant resp variabelt varvtal



A.4 Kända tillämpningar på varvtalsvariation

För ett japanskt pumpkraftverk (Narude) har en teknik enligt alternativ 2 ovan tillämpats. Kraftverket är på ca 20 MW. Lösningen med variabelt varvtal har valts eftersom optimalt varvtal vid pumpning resp produktion skiljer sig, 210 resp 190 rpm. Frekvensomriktaren är i detta fall på 3,8 MVA. Se nedanstående principschema. Avsikten är att tillämpa tekniken på ett betydligt större pumpkraftverk på 300 MW (se Cigré-rapport 11-03 1988).

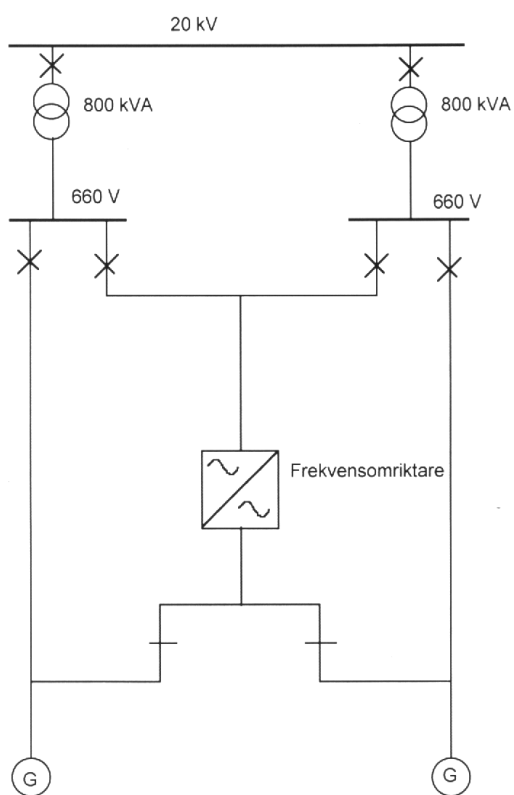
I Finland har ett speciellt kompakt aggregat utvecklats av företaget Waterpump OY. Turbin, växel och generator byggs samman i en enhet. Upp till storleken 500 kW är generatören direkt driven medan för större enheter turbinaxeln via kuggväxel driver flera generatorer.



Narude Kraftstation

I ett tyskt minikraftverk (Rottenburg) på ca 1 MW fördelat på två aggregat har frekvensomriktare enligt alternativ 1 installerats. Trots att kraftverket har Kaplan-turbiner med dess stora reglerområde bedömer man att varvtalsvariation ger en verkningsgradshöjning framförallt vid max vattenföring då fallhöjden p g a hög nedre vattenyta blir kraftigt reducerad. Varvtalsvariationen är 600-900 rpm, (se Wasserwirtschaft nr 5, 1992)

I Kina har ett stort pumpkraftverk på 400 MW (Panjiakon) försetts med frekvensomriktare för att höja verkningsgraden både vid pumpning och generering. Fallhöjden varierar mellan 35 och 86 m. Vid den lägre nivån är optimalt turbinvarvtal 107 rpm och vid den högre 125 rpm (se proceedings of conference – 4 April 1990, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London).

**Rottenburg kraftstation**

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se