

Optimering av effekten från vindturbin

Martin Eriksson och Jan Ottosson

I ett tidigare nummer av Ericsson Review har strömförsörjningssystem BZP 101, ERICSSON SUNWIND med sol och vind som energikällor beskrivits. Ett intressant inslag i den tekniska lösningen är effektreglersystemet för vindturbinen. Ett mikrodatorstyrt system söker kontinuerligt den arbetspunkt som motsvarar maximal energiproduktion under varierande vindförhållanden. Författarna beskriver de speciella krav och svårigheter som är förknippade med detta reglertekniska problem och de sätt, på vilka de har lösts.

UDK 620.9:681.3

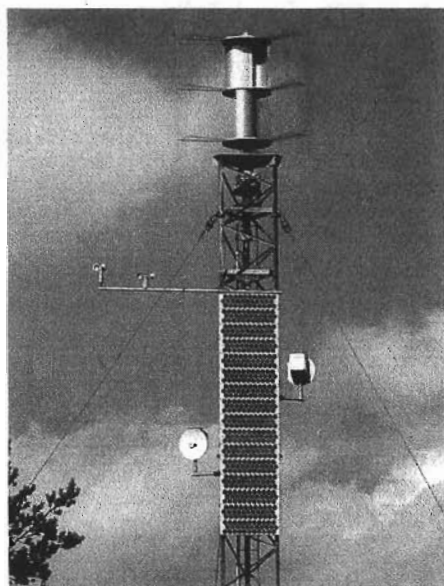


Fig. 1
Mast med vindgenerator och solpaneler

Strömförsörjningssystem BZP 101, ERICSSON SUNWIND är ett primärkraftsystem för låga effekter (upp till ca 500 W kontinuerlig belastning) avsett för utrustning på avlägsna platser. Det är i första hand avsett för telekommunikationsutrustning, men kan även användas för väderstationer, övervakningssystem, fyror och andra navigationshjälpmedel. På många platser kan vindkraft utgöra en viktig länk i sådana system. Tillgången på vindenergi varierar dock ofta sekundsnabbt och oregelbundet. Detta ställer stora krav på reglersystemet. Ingående apparater måste arbeta optimalt om energin skall kunna utnyttjas maximalt. Då energipriset är väsentligt högre för ett sådant litet system än för konventionella system måste även tillsatsapparaturen för reglering ha låg energiförbrukning.

Kraven på hög tillgänglighet nödvändiggör en dyrbar energireserv i form av batterier. Ett sätt att minska batteribehovet är att bygga ett kombinationssystem. Ett sådant system är BZP 101. Där ingår även solpaneler och minidieselaggregat. Solcellerna och vindkraften kompletterar varandra och ger en mera kontinuerlig sammanlagrad effekt, både för kortvariga och mera säsongsmässiga variationer.

Systemets tillförlitlighet och underhållsbehov påverkas starkt av det inbördes förhållandet mellan de olika energikällorna.

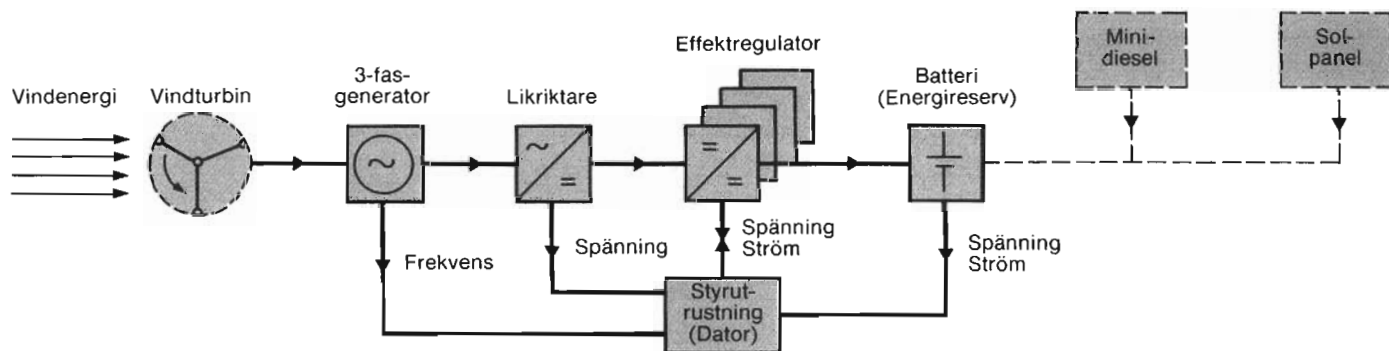
Systemets uppbyggnad

Strömförsörjningssystemet ERICSSON SUNWIND är tidigare beskrivet i Ericsson Review¹. Här beskrivs endast de delar som har samband med vindturbinens reglersystem, fig. 2. För att fånga upp vindenenergin används en vindturbin av Darrieustyp. En karakteristisk kurva för verkningsgraden hos denna typ av turbin visas i fig. 3. Där framgår att turbinens aerodynamiska verkningsgrad är starkt beroende av förhållandet mellan vindhastighet och bladhastighet. Effektuttaget måste avvägas, så att bladhastigheten blir ca 3,5 gånger vindhastigheten. Om effektuttaget görs något för stort retarderar turbinen mycket snabbt och stannar slutligen helt. Ett för lågt effektuttag ger en stabil arbetspunkt med lägre verkningsgrad till höger om den optimala arbetspunkten.

En annan egenskap av stor betydelse för reglerbarheten är den roterande massans tröghet. Denna avgör hur snabbt den optimala arbetspunkten kan uppnås vid en ändring av vindhastigheten. Samtidigt utgör trögheten en energibuffert mellan turbin och batteri. Fig. 4 visar det roterande systemet med tillhörande formler.

För omvandling av den mekaniska energin till elektrisk har en speciell generator framtagits. Den har permanentmagneter i rotorn och järnfri statorkrets och är en mångpolig s.k. PM-generator i tresfasutförande.

Fig. 2
Vindkraftsystemets schematiska uppbyggnad





MARTIN ERIKSSON
JAN OTTOSSON
Strömförsörjningsavdelningen
Telefonaktiebolaget LM Ericsson



Generators växelspanning omvandlas med en enkel oreglerad likriktare till likspänning. Via en mättransformator lämnas information till reglerdatorn om generatorspänningens frekvens.

Dessa funktioner utförs bäst med ett mikrodatorstyrt system. En annan mycket viktig egenskap utrustningen måste ha är en minimal egenförbrukning av effekt. Ett sätt att möta detta krav är att göra utrustningen interaktiv. För detta ändamål har en mikroprocessorlösning valts, där datorn stänger av sin strömförsörjning när effekttillgången är lägre än dess egenförbrukning.

Effektregulatorn

Effektregulatorn, som är placerad mellan likriktare och batteri, består av ett antal parallellkopplade enheter. Dessa enheter, s.k. hackare (*chopper*) med gemensam plusledare, har en nominell toppeffekt på vardera 200 W vid 50 V utspänning. Varje hackare har en analog styrgång för spänning, VC (*Voltage Control*), och en för ström, CC (*Current Control*), samt en digital ingång för aktivering (start/stop). Fig. 7 visar regulatorns utgångskaraktistik. Styrgångarna används av datorn vid regleringen, för att bestämma utnivåerna och för att påverka antalet inkopplade enheter. Belastningen av turbinen styrs genom att välja antal aktiva hackare och deras utström.

Dator, styrgränssnitt och anpassningsdon

Datorn består av en åtta bitars mikroprocessor med minne och in- och utorgan. Programmet för styrningen lagras i ett EPROM på totalt 4 k ord. Dataminnets består av ett RAM på 1 k ord.

För kommunikation med omvärlden och för inhämtning respektive utstyrning av data används ett antal gränssnittkretsar. Dessa har konstruerats med hänsyn till tillämpningens krav på effektsnålhet, noggrannhet och tillförlitlighet. Data för vidarebefordran sänds till externa enheter antingen via en seriekanal av standardsnitt eller i parallell form, när hög överföringshastighet eftersträvas. Denna kanal används även när datorn samarbetar med andra enheter i kombinerade sol/vind/diesel-anläggningar.

Systemets funktion

Mätvärdesinsamling

Mätdata kan delas upp i två kategorier:

- Data som behövs i datorn för att fatta beslut angående regleringen.
- Data som först och främst är avsedda som information för externa mottagare.

Exempel på mätdata är batterispänning, likriktarspänning, generatorspänningens frekvens och ström från effektregulatorn. Beräknade värden, som ingår i beslutsunderlaget, är olika verkningsgrader, generatorimpedanser, rotationshastighet och acceleration.

Övriga data, som kan insamlas, är sådana som ligger till grund för statistik eller

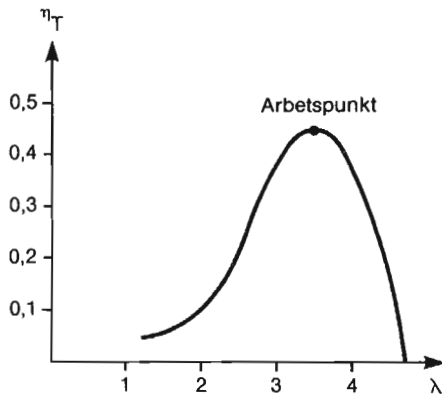


Fig. 3
Verkningsgraden för Darrieus turbinen $\eta_T = f(\lambda)$ där
 $\lambda = R\omega/v$
 λ är förhållandet mellan bladhastighet och vindhastighet
 R är turbinens radie

Inspänningen till hackarna varierar kraftigt beroende på förändringar i vindstyrkan, medan utspänning respektive utström är styrbara.

Uppdelningen av regulatorn på flera parallella enheter ger fördelar bl.a. ur tillförlitlighetssynpunkt. Dessutom kan antalet aktiva hackare styras så att regulatorn arbetar så nära sin maximala verkningsgrad som möjligt. Hackarens verkningsgrad vid de vanligast förekommande belastningsfallen är 94%. Detta höga värde uppnås bl.a. genom att den arbetar vid relativt höga spänningar och utan isolertransformator.

Styrustrutningen

Systemet fordrar många olika styrfunktioner:

- insamling av analogdata (ström, spänning, frekvens)
- bearbetning av data
- reglering av effekten
- kontroll av funktioner
- sändning av larm
- avstängning vid för låg vindstyrka.

Fig. 4
För det roterande mekaniska systemet gäller momentekvationen:

$$M_v + M_m + M_{el} = 0, \text{ där}$$

M_v är vindens moment på axeln
 $M_m = J d\omega/dt$ är massans moment på axeln
 M_{el} är momentet från generatorn

$$J = \int_0^R r^2 dm \text{ är masströghetsmomentet}$$

$$W = 0,5 J \omega^2$$

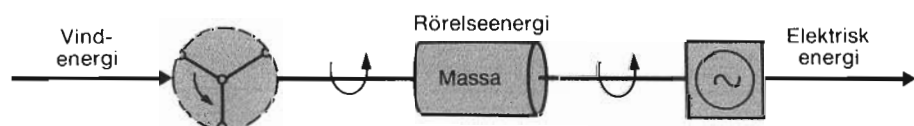
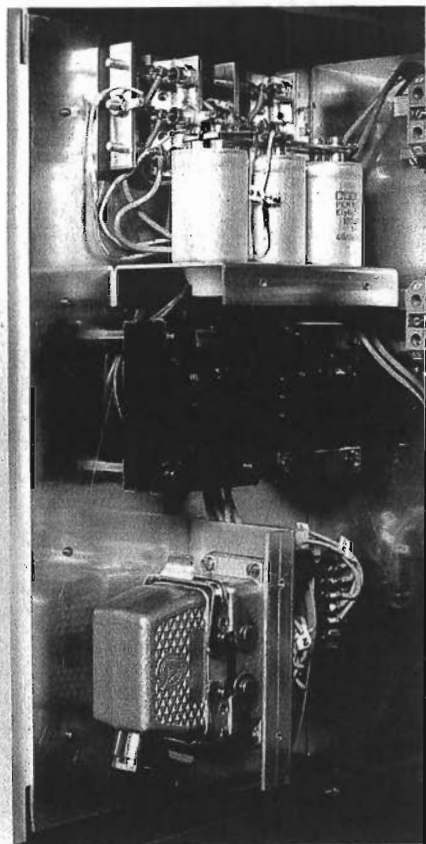


Fig. 5
De två likriktarna är uppbyggda för trefaslikritning



som av annat skäl är intressanta för externa mottagare. Dessa data kan erbjudas då datorn har kapacitet kvar sedan styruppgifterna har utförts. Temperaturer, vindriktning, ljusintensiteter och vätskenivåer är exempel på sådana data.

Inhämtning av data sker via anpassningsdon och gränssnitt till datorn. I gränssnittet omvandlas de analoga storheterna till digital form. Datorn överför sedan dessa till flyttalsform för smidig vidarebehandling. Skalfaktorer väljs så att mätvärdena uttrycks i grundenheter-na volt, ampere, ohm osv. För mätning av frekvens används tidkretsar, som mäter periodtiden.

Styrning via datorns utorgan

För att fattade beslut skall komma till utförande behöver datorn sända styrsignaler. Signalerna kan vara digitala eller analoga. De analoga signalerna kan vara spänningsnivåer, som styr effektomvandlarnas ström- respektive spänningsvärden. Gränssnittet låser styrsignalernas tillstånd under beslutsinterval-len.

Digitala signaler kan vara från/till för effektomvandlarna och larm/icke larm för larmgivningsenheten.

Intern strömförsörjning

Den interna strömförsörjningen är uppdelad på två skilda DC/DC-omvandlare. Den ena omvandlaren är liten och försörjer de enheter som måste försörjas utan avbrott. Den andra försörjer övrig utrustning inklusive datorn med kraft.

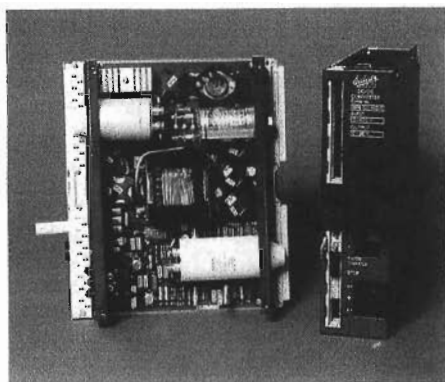
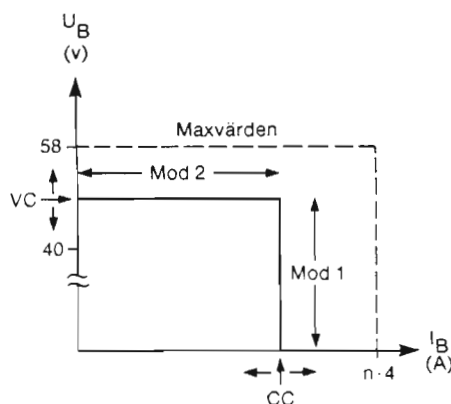


Fig. 6
Hackarregulatorns maximala effekt är 225 W. Via styringångar kan utström respektive utspänning varieras

Fig. 7
Effektregulatorns karakteristik

U_B Batterispänning (Utspänning)
 I_B Batteriström från regulator (Utström)
 n Antalet hackare
CC Strömstyrvärdet
VC Spänningsstyrvärdet



Reglering av uteffekten

Systemet kan arbeta i tre olika moder:
Mod 1, laddning med effektmaximering
Mod 2, underhållsladdning
Mod 3, ingen laddning, datorn inaktiv.

Mod 1, laddning med effektmaximering

Mod 1 är den mest omfattande och ställer de största kraven på datorns kapacitet. Turbinen måste belastas så att dess blad hastighet blir ca 3,5 gånger högre än vindhastigheten för att kunna ta tillvara 45% av den vindenergi som passerar genom dess "fönster" mot vinden. Även mindre avvikelser från detta värde innebär sänkt verkningsgrad. För regleringen gäller ett ärvärde, den faktiska belastningen, och ett börvärde, den önskvärda belastningen. Skillnaden mellan dessa kan bestämmas och styrningen kan minska skillnaden. Man har tillgång till ärvärdet, som på ett enkelt sätt kan beräknas av datorn. Däremot är börvärdet svårare att bestämma. Man skulle kunna mäta vindstyrkan och programmera datorn med sambandet mellan vindstyrka och uttagbar effekt. Dock uppstår i detta tänkta fall flera problem. Det är svårt att mäta vindstyrkan tillräckligt exakt i turbinens omedelbara närhet. Dessutom innebär införandet av en vindmätare nackdelar bl.a. ur tillförlitlighetssynpunkt. Man har därför valt en lösning där vindstyrkan inte behöver mätas.

Metoden för effektmaximering går ut på att bestämma arbetspunktens läge och rörelse på turbinens effektkurva. Tiden närmast efter en ändring av effektuttaget görs en bestämning av turbinens rotationshastighet och acceleration. Med hjälp av dessa värden kan sedan det mekaniska systemets underskott respektive överskott på effekt beräknas, fig. 13. Om turbinen accelererar, tillåts detta, så länge överskottet ökar, medan en minskning av överskottet omedelbart måste följas av en ökning av effektuttaget, så att accelerationen avbryts. Det senare motsvaras av att den optimala arbetspunkten har uppnåtts.

Om turbinen i stället retarderar tillåts detta så länge underskottet på effekt minskar, medan en ökning av underskottet omedelbart måste följas av en minskning av effektuttaget, så att retardationen avbryts. På detta sätt optime-

Fig. 8
Datorprogrammets beståndsdelar

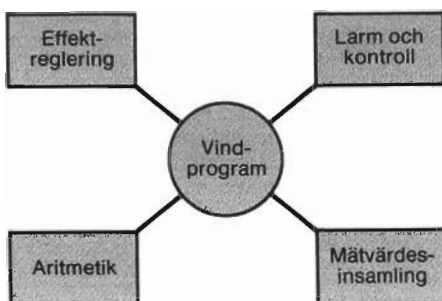
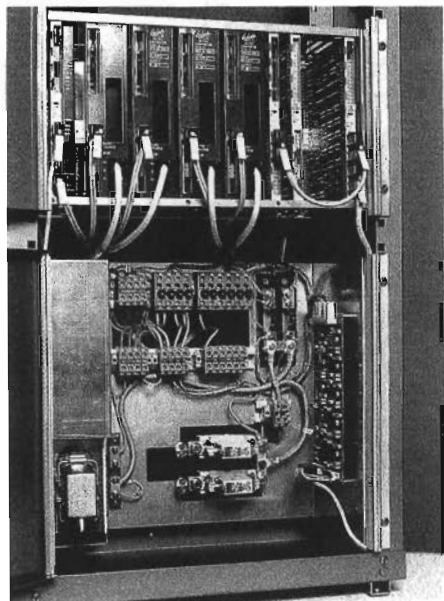


Fig. 8
Vindelektronik för den maximala uteffekten 900 W



ras den uttagna effekten från turbinen kontinuerligt genom korrigeringar av arbetspunktens läge.

Fig. 14 ger en uppfattning om hur regler-systemet arbetar i ett aktuellt fall med byig vind.

Medan datorn sköter uppgiften som regulator har den även kontrollerande och övervakande funktion. Den totala effekten från vinden kontrolleras och likaså batteriets laddningsgrad. Dessutom sker vissa tester av maskinvaran. T.ex. kontrolleras om hackarnas totala utström följer sitt styrvärde.

Om den totala effekten från vinden är lägre än datorns egenförbrukning ges signal till den interna strömförsörjningen att stänga av, varvid övergång sker till mod3.

Om batteriets laddningsgrad är nära 100% övergår utrustningen till mod2, underhållsladdning.

Mod 2, underhållsladdning

Mod2 inträder när batteriet har fulladdats och bibehålls så länge vindeffekten är större än den effekt batteriet och lasten kräver. Om andra energikällor (sol, diesel) är kopplade till batteriet påverkar detta vindkraftens styrmod. Datorn, som i mod2 saknar reglerande uppgift, stegar i inledningsskedet långsamt ned styrvärdet för spänning till nivån för underhållsladdning. Denna spänningsnivå är vald så att batteriet behåller sin fulla laddningsgrad. När spänningsnivån för underhållsladdning har uppnåtts sätts strömgränsen till full ström. Regulatorn befinner sig därefter i spänningstyrt till-

stånd dvs. spänningen följer VC-ingången. Ingen speciell laddningsautomatik behövs normalt i vindkraftsammanhang beroende på att den maximala ström man har tillgång till för laddning är låg. Det tar ca 50 h att få ett urladdat batteri fulladdat och med denna långsamma laddning nås fulladdning redan vid 56 V. Om i något fall laddningsautomatik skulle krävas, kan sådan införas utan ändringar i maskinvaran.

Återgången från mod2 till mod1 sker normalt automatiskt när spänningsskillnaden mellan batteri och likriktare har nått ned till ett visst värde eller under vissa omständigheter om inte batterispänningen har kunnat bibehållas.

Mod3, ingen laddning, datorn inaktiv

Mod3 innebär att datorn har stängt av sin egen spänningsmatning. Endast larmfunktionerna och kretsarna för återaktivering är aktiva. Övergång till mod3 sker då medelvinden är mindre än 4 m/s. Effektförbrukningen i mod3 är ca 200 mW. Då vinden är byig kan utrustningen ganska snabbt pendla mellan mod1 och mod3. Detta innebär att den tillgängliga vindenergin tas tillvara med en mycket låg egenförbrukning av effekt. Återgången från mod3 sker med hjälp av en spänningsvakt, som är kopplad till frekvensgivarens transformator. När spänningen har uppnått ett värde som motsvarar 4,3 m/s ($\lambda = 4,7$) ges signal att koppla in datorns spänningsmatning. Datorn kan inte stängas av från programmet så länge denna signal kvarstår.

Larm och kontrollfunktioner

Eventuella fel i maskinvaran skall upptäckas snabbt, och information om fel skall kunna sändas vidare t.ex. via radiolänk till en larmcentral. För larmsändning används fyra reläutgångar. Dessa är isolerade från utrustningen i övrigt för att undvika potentialproblem vid anslutningen till sändaren. Varje sådan utgång kan ge upplysning om flera olika typer av fel i utrustningen, s.k. samlingslarm. Mera detaljerad information kan sedan ges genom att data sänds via en seriedatautgång.

För kontroll av programexekveringen finns en vippa, som måste triggas med

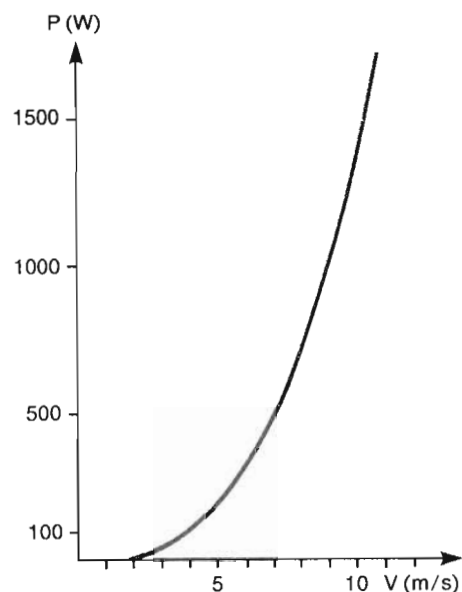


Fig. 11
Vindens energiinnehåll ökar med tredje potensen av vindhastigheten, $P = f(v^3)$

Fig. 9
Vindturbinens karakteristik

$$P_T = f(v, \lambda)$$

P_T Turbineffekt
 v Vindhastighet
 λ Hastighetsförhållandet blad/vind

$$P_{opt} = K v^3 \text{ är den optimala turbineffekten}$$

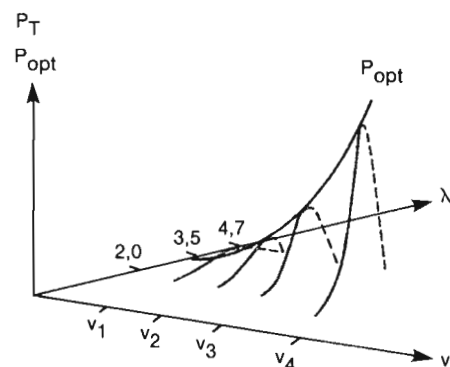


Fig. 12
Den elektriska kretsens ekvivalenta schema

- E Emk
- R Inre resistans
- Ch Effektregulator
- U_R Likriktarens utspänning
- U_B Batterispänning
- U_w Spänning mellan batteriminus och likriktarminus
- 0 V Mättnolla

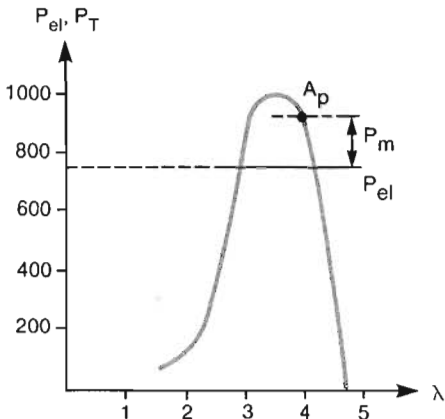
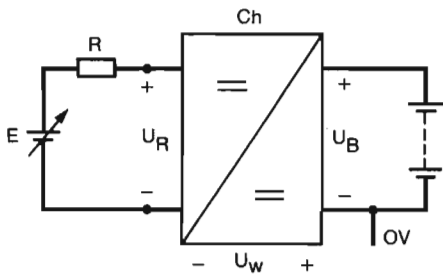


Fig. 13
Vindturbinens normaliserade karakteristik

$P_T = f(\lambda)$

- P_T Turbineffekt
- λ Hastighetsförhållandet blad/vind
- P_{el} Elektriskt effektuttag
- P_m Överskott på effekt
- A_p Arbetspunkt

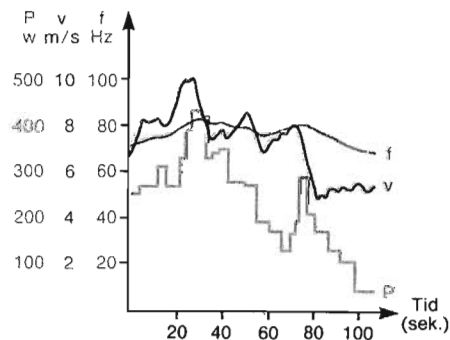
jämna tidsintervall. Uteblir triggingen så återstartas datorn. Dessutom finns en programövervakning, som innebär att programavverknigen avbryts och datorn återstartas om programmet adresserar ett otillåtet minnesutrymme, varvid larm sänds.

Effektregulatorns funktion kontrolleras genom att programmet undersöker om hackarna följer sitt strömstyrvärde (Mod 1). Om avvikelsen mellan styrvärde och utström är för stort, spåras den felaktiga hackaren, varefter den tas ur drift. Larm sänds och enda skillnad mot tidigare är att den maximala effekten har sänkts i motsvarande grad. Med en hackare bortkopplad minskar reglerområdet och den mekaniska reglerutrustning som vid hög vindstyrka, genom omställning av turbinbladen bromsar turbinen, måste träda i kraft vid lägre vindstyrka.

Sammanfattning

Erfarenheten har visat att snabba förändringar i vindhastigheten förekommer. Motsvarande förändringar i den tillgängliga effekten är stora eftersom vindenergin är proportionell mot kuben på vindstyrkan. För att kunna ta tillvara de höga effekttopparna krävs hög systemverkningsgrad och ett sofistikerat regler-system. ERICSSON SUNWIND, BZP 101, har dessa egenskaper. Systemet uppfyller dessutom mycket höga krav på tillförlitlighet och underhållsfrihet. Dessa egenskaper gör det möjligt att placera systemet på avlägsna och otillgängliga platser, där ett mindre tillförlitligt system inte skulle kunna användas på grund av kostsamma och tidsödande underhållsresor.

Fig. 14
Vindeffekten till batteriet, P, generatorfrekvensen, f, och vindhastigheten, v, som funktioner av tiden. Det är påfallande med vilken snabbhet systemet anpassar uteffekten till rådande vindstyrka. Till och med vindbyar av varaktigheten 20 s kan utnyttjas för ökat effektuttag. Kurvorna i figuren visar en upptagning med ljusskrivare (UV) vid provanläggningen i Kungens Kurva utanför Stockholm 1982-07-06



Referenser

1. Åkerlund, J.: ERICSSON SUNWIND. Ericsson Rev. 59 (1982):1, s. 40-47.