



Vindkraftens tillgänglighet vid hög elförbrukning

Tekn. Lic. Lennart Söder
Institutionen för elektriska energisystem
Elkraftcentrum
Kungliga Tekniska Högskolan
100 44 Stockholm

May 1987

FÖRORD

Det har i diskussionen angående vindkraftens introduktion i det svenska kraftsystemet framförts att när det är riktigt kallt är vindhastigheten ofta låg. Detta bygger bl.a. på statistik publicerat i "Klimatdata i Sverige", Stockholm 1972. Eftersom vi i Sverige för närvarande har en relativt stor andel elvärme (27 % av elenergiförbrukningen 1985), så blir elförbrukningen extra hög vid låga temperaturer. Detta skulle medföra att vindkraften knappast är något att räkna med för att klara toppbelastningar.

Men frågan är dels hur starkt sambandet mellan stark kyla och låga vindhastigheter är, dels om förbrukningstoppar inträffar precis då det är som kallast. Denna rapport är avsedd att belysa frågeställningen och visar en sammanställning av tillgänglig statistik för sambandet mellan vindstyrka och lasttoppar i det svenska kraftsystemet. Hypoteserna "Det är vindstilla vid förbrukningstoppar" och "Det är ofta vindstilla vid förbrukningstoppar" undersöks. Utredningen är utförd på uppdrag av Statens Energiverk.

SAMMANFATTNING

Vindkraftens tillgänglighet vid hög elförbrukning har undersökts för 10 förbrukningstoppar under tidsperioden vintern 1979/80 - vintern 1986/87. En antagen installation av vindkraftverk vid 3 platser i Sverige har studerats. Genomsnittseffekten för dessa vindkraftverk vid studerade förbrukningstoppar skulle ha varit ungefär densamma som genomsnittseffekten under hela perioden jan 1980- dec 1985. Hypotesen "Det är vindstilla vid förbrukningstoppar" kan uteslutas. Hypotesen "Det är ofta vindstilla vid förbrukningstoppar" kan inte bekräftas. Resultaten tyder på att det inte föreligger någon större skillnad mellan vindstyrkan vid förbrukningstoppar och vindstyrkan under det övriga året.

RESULTAT

Kraftsam publicerar i sin årliga rapport tidpunkten för det högsta timmedelvärdet för effektförbrukningen (bilaga 1). SMHI mäter kontinuerligt vindhastigheten på ett antal platser i Sverige. Med hjälp av dessa data samt vind-effekt funktionen för aggregatet i Maglarp (bilaga 2) kan den genomsnittliga vindeffekten vid lasttoppar beräknas. Nedan visas denna sammanställning.

| Tidpunkt | Ringhals Effekt kW | Näsudden Effekt kW | Maglarp Effekt kW |
|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 1980-02-05 | ej v-mätn. | 70 | 2820 |
| 1981-12-17 | 0 | 0 | 0 |
| 1982-01-08 | 0 | 740 | 0 |
| 1983-12-12 | 80 | 460 | 180 |
| 1984-12-17 | 440 | 2200 | 0 |
| 1985-02-08 | 700 | 0 | 40 |
| 1986-01-17 | 0 | 0 | 0 |
| 1986-02-20 | 1040 | 1360 | 1200 |
| 1987-01-12 | 1580 | 3000 | 2940 |
| 1987-01-13 | 1960 | 1860 | 2940 |
| medel | 644 kW | 969 kW | 1012 kW |
| total-medel | | 875 kW | |

Som en jämförelse har genomsnittseffekten för samma period (ej 86-87) beräknas. Medeleffekten i tabellen nedan är beräknade enligt metoden beskriven i bilaga 3. Vinddata har erhållits från SMHI, Norrköping.

| | Ringhals | Näsudden | Maglarp |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| mätperiod för vindstyrka | 8007-8512 | 8001-8512 | 8001-8512 |
| medianvind | 7.3 m/s | 7.6 m/s | 7.8 m/s |
| formparameter | 2.07 | 2.18 | 2.27 |
| medeleffekt med Maglarps-verk | 817 kW | 868 kW | 902 kW |
| total-medel | | 862 kW | |

HYPOTESPRÖVNING

Ordet "vindstill" antas här ha innebörden att vindhastigheten är lägre än startvinden för det studerade Maglarps-aggregatet vid samtliga mätplatser samtidigt. Ordet "ofta" antas innebära betydligt oftare än under övriga året.

Vid 8 av 10 mättillfällen erhöles effekt från minst ett aggregat vid de studerade förbrukningstopparna. Detta innebär att hypotesen "Det är vindstill vid förbrukningstoppar" kan uteslutas.

Vid 2 av 10 mättillfällen erhöles effekten 0 MW från samtliga aggregat samtidigt. (Vid det ena tillfället var vindhastigheten 5.2 m/s vid Näsudden vilket är densamma som startvinden för Maglarpsverket. Eftersom vinden även har en lokal spridning så fanns det troligen någon plats i närheten av mätmasten vid Näsudden, aktuell för vindkraftinstallation, med en vindhastighet högre än 5.2 m/s.) För hela tidsperioden 800801-810731 var det vindstill under 6 % av tiden, se bilaga 1. Vid studerade förbrukningstoppar var det vindstill (10-) 20 % av tiden. Om dessa värden gäller även vid en studie av mer data finns det alltså ett visst belägg för hypotesen "Det är ofta vindstill vid förbrukningstoppar". Det bör dock påpekas att om även övriga resultat i denna studie kan generaliseras så skulle även hypotesen "Det blåser ofta mycket vid förbrukningstoppar" få ett visst belägg, eftersom medeleffekten är ungefär densamma vid förbrukningstoppar som det årliga genomsnittet.

För att belägga eller förkasta de två sista hypoteserna måste mer data studeras.

SLUTSATS

Antagandet att det skulle blåsa mindre vid förbrukningstoppar än under det övriga året kan inte beläggas. Hypotesen "Det är vindstill vid förbrukningstoppar" kan uteslutas. Hypotesen "Det är ofta vindstill vid förbrukningstoppar" kan inte beläggas. Resultatet tyder på att det inte råder någon större skillnad mellan vindstyrkan vid förbrukningstoppar och under resten av året. För att få en fullständig bild av vindkraftens tillgänglighet vid förbrukningstoppar måste mer statistik studeras.

Bilaga 1

Högsta elbelastningar (timmedelvärden) i Sverige 1979 - 1987

| Max-period | datum | kl | MW | källa |
|------------|----------------|-----|--------|----------------------------------|
| 1978/79 | To 1979-feb-15 | 8-9 | 17 753 | CDL, "Elförsörjn. i Sv 1979/80" |
| 1979/80 | Ti 1980-feb-05 | 8-9 | 17 708 | CDL, "Elförsörjn. i Sv 1979/80" |
| 1981 | To 1981-dec-17 | 8-9 | 19 641 | Kraftsam, "Elkraftf. i Sv 1982" |
| 1982 | Fr 1982-jan-08 | 8-9 | 19 263 | Kraftsam, "Elkraftf. i Sv 1982" |
| 1983 | Må 1983-dec-12 | 8-9 | 20 862 | Kraftsam, "Elkraftf. i Sv 1983" |
| 1984 | Må 1984-dec-17 | 8-9 | 20 666 | Kraftsam, "Elkraftf. i Sv 1984" |
| 1985 | Må 1985-feb-18 | 8-9 | 23 987 | Kraftsam, "Elkraftf. i Sv 1985" |
| 1986 | Fr 1986-jan-17 | 8-9 | 23 800 | Teddy Palm, V-fall, Tfn 87-01-21 |
| 1986 | To 1986-feb-20 | 8-9 | 23 800 | Teddy Palm, V-fall, Tfn 87-01-21 |
| 1987 | Må 1987-jan-12 | 8-9 | 25 700 | "Vi i Vattenfall" 1/87 |
| 1987 | Ti 1987-jan-13 | 8-9 | 25 700 | Vattenfall-annons, DN 1987-01-15 |

Anm: 1986 registrerades två lika höga förbrukningstoppar. 1987 har hittills (mars 1987) samma nivå uppnåtts vid två tillfällena.

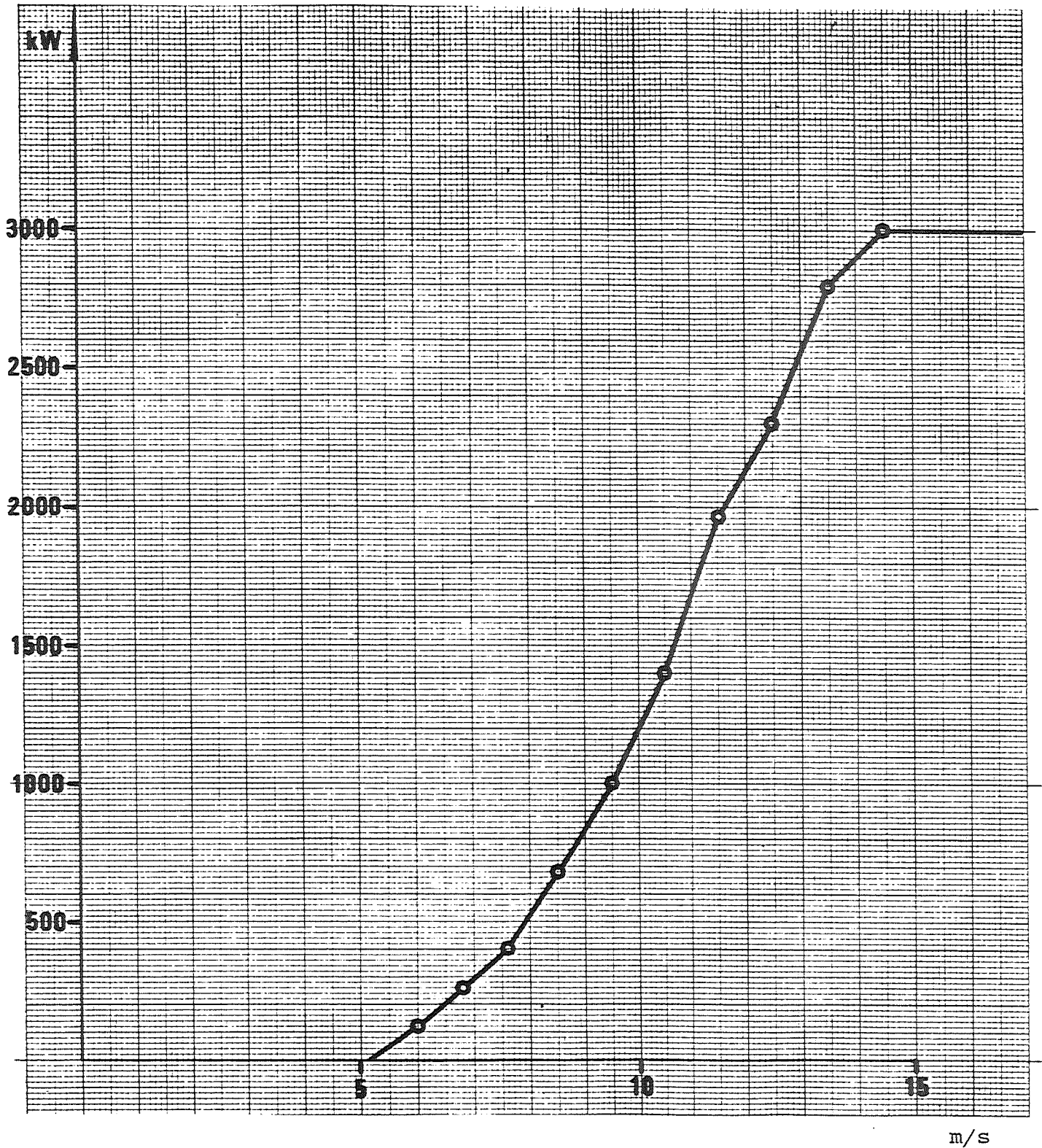
Vindhastigheter (timmedelvärden) vid ovanstående tidpunkter som registrerats på 75 m höjd i mätmasterna i Ringhals, Näsudden och Maglarp för tiden 08-09. Uppgifterna är hämtade ur SMHI:s kvartalsrapporter samt från Tord Kvick vid SMHI, Norrköping.

| Tidpunkt | Ringhals Vind m/s | Näsudden Vind m/s | Maglarp Vind m/s |
|------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 1979-02-15 | ej börjat | ej börjat | ej börjat |
| 1980-02-05 | ej börjat | 5.6 | 13.6 |
| 1981-12-17 | 0.0 | 4.6 | 4.4 |
| 1982-01-08 | 2.7 | 8.7 | 4.4 |
| 1983-12-12 | 5.7 | 7.8 | 6.4 |
| 1984-12-17 | 7.7 | 12.2 | 4.5 |
| 1985-02-08 | 8.6 | 4.4 | 5.4 |
| 1986-01-17 | 4.8 | 5.2 | 4.5 |
| 1986-02-20 | 9.6 | 10.4 | 10.0 |
| 1987-01-12 | 10.8 | 15.3 | 14.2 |
| 1987-01-13 | 11.5 | 11.3 | 14.2 |

Samtida vindtidsserier har endast funnits tillgängliga för tidsperioden 800801-810731 (8369 timmedelvärden) och mätthöjden 96m för Ringhals, Näsudden och Maglarp. Vid 497 av dessa tillfällen, motsvarande 6 % av tiden, var vindhastigheten lägre än 5.2 m/s (Maglarp-verkets startvind) vid samtliga platser samtidigt.

Bilaga 2

Vind-effekt funktion för vindkraftverket i Maglarp



Vindstyrkan är uppmätt vid navhöjd, 80 m. Vindkraftverket stängs av vid vindstyrkor större än 22 m/s. Kurvan har erhållits från Sydkraft, vindkraftprojektet : Huvudrapport från fullskaleförsöken i Maglarp, 1984-10-15.

Bilaga 3

Ett vindkraftverks medeleffekt

Vinden

Vindhastighetens fördelning vid en plats kan beskrivas med hjälp av en Weibull-fördelning. Weibull-fördelningens fördelningsfunktion $F_W(v)$ beskriver sannolikheten att en viss vindhastighet underskrids på platsen.

$$F_W(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{\alpha}\right)^\beta} \quad v \geq 0 \quad (1)$$

$F_W(v)$ = Weibullfördelningens fördelningsfunktion

v = vindhastighet

α = skalparameter

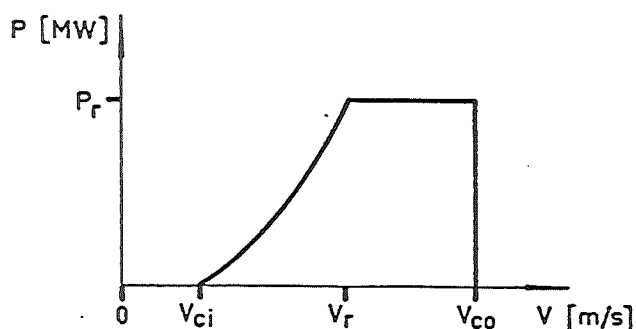
β = formparameter

Med given medianvind ($F_W(v_m) = 0.5$, v_m = medianvind) och formparameter, kan α beräknas enligt

$$\alpha = v_m [\ln 2]^{-\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

Vindkraftverket

Ett vindkraftverk har en vind-effekt funktion enligt figur 1



Figur 1 Vind-effekt funktion för ett vindkraftverk

Vid vindhastigheter lägre än v_{ci} eller högre än v_{co} är effektproduktionen noll. Mellan v_{ci} och v_r kan effekten beskrivas enligt en funktion, $P_v(v)$. Mellan v_r och v_{co} ger aggregatet märkeffekt, P_r .

Vindkraftens medeleffekt

Vindeffektens fördelningsfunktion beskriver sannolikheten att en viss producerad effekt underskrids. Sannolikheten att en viss effekt underskrids = sannolikheten att motsvarande vindstyrka underskrids.

$$F_p(P_v) = \begin{cases} 0 & \text{om } P_v < 0 \\ 1 - e^{-\left[\frac{1}{\alpha} V_p(P_v)\right]^\beta} + e^{-\left(\frac{v_{co}}{\alpha}\right)^\beta} & \text{om } 0 \leq P_v < P_r \\ 1 & \text{om } P_r \leq P_v \end{cases} \quad (3)$$

$F_p(P_v)$ = Vindeffektens fördelningsfunktion vid Weibullfördelad vindhastighet

$V_p(P_v)$ = Inversen till $P_v(v)$ dvs $V_p[P_v(v)] = v$, $V_p(0) = v_{ci}$, $V_p(P_r) = v_r$

Genom att derivera fördelningsfunktionen erhålls frekvensfunktionen för effekten från ett vindkraftverk

$$f_p(P_v) = \frac{d}{dP_v} F_p(P_v) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} e^{-\left[\frac{1}{\alpha} V_p(P_v)\right]^\beta} V_p(P_v)^{\beta-1} \frac{dV_p(P_v)}{dP_v} \quad (4)$$

$P_v \in]0, P_r[$

$f_p(P_v)$ = frekvensfunktion för effekten från ett vindkraftverk

Till denna kontinuerliga fördelning kommer två diskreta sannolikheter i punkterna $P_v = 0$ och $P_v = P_r$. Uteffekten = 0 när vindhastigheten underskrider v_{ci} och när vindhastigheten överskrider v_{co} .

$$P(P_v = 0) = 1 - e^{-\left(\frac{v_{ci}}{\alpha}\right)^\beta} + e^{-\left(\frac{v_{co}}{\alpha}\right)^\beta} \quad (5)$$

$P(P_v = 0)$ = sannolikheten att $P_v = 0$

Uteffekten = P_r , erhålls då vindstyrkan är högre än v_r och lägre än v_{co} .

$$P(P_v = P_r) = e^{-\left(\frac{v_r}{\alpha}\right)^\beta} - e^{-\left(\frac{v_{co}}{\alpha}\right)^\beta} \quad (6)$$

$P(P_v = P_r)$ = sannolikheten att $P_v = P_r$

Med vindens fördelning samt vindkraftverkets vind-effekt funktion given kan den producerade effektens väntevärde beräknas :

$$E(P_v) = \int_{-\infty}^{\infty} P_v f_p(P_v) dP_v = 0P(P_v = 0) + \int_0^{P_r} P_v f_p(P_v) dP_v + P_r P(P_v = P_r) \quad (7)$$

$E(P_v)$ = förväntat effektmedelvärde

Approximation av $P_v(v)$

Antag att funktionen $P_v(v)$ kan approximeras med en styckvis linjär funktion mellan punkter på funktionen, se t.ex. bilaga 2. Dessa punkter kan betecknas (v_i, P_i) ; $i \in [1, N]$ där N är antalet punkter. Även den inverterade funktionen $V_p(P_v)$ blir då en styckvis linjär funktion. Derivatans av en styckvis linjär funktion är en trappstegsfunktion med konstant värde för de olika linjära segmenten. I intervallet $P_v \in [P_i, P_{i+1}]$ kan frekvensfunktionen skrivas som

$$f_p^i(P_v) = \frac{\beta}{\alpha} e^{-\left[\frac{1}{\alpha} V_p(P_i) + (P_v - P_i)k_i\right]^\beta} \left[V_p(P_i) + (P_v - P_i)k_i\right]^{\beta-1} k_i \quad (8)$$

$$k_i = \frac{v_{i+1} - v_i}{P_{i+1} - P_i}$$

Effektens förväntade medelvärde kan då skrivas som

$$E(P_v) = \sum_{i=1}^{N-1} \int_{P_i}^{P_{i+1}} P_v f_p^i(P_v) dP_v + P_r P(P_v = P_r) \approx P_r P(P_v = P_r) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M \left\{ \left[P_i + (j - 0.5) \frac{P_{i+1} - P_i}{M} \right] f_p^i \left(P_i + (j - 0.5) \frac{P_{i+1} - P_i}{M} \right) \frac{P_{i+1} - P_i}{M} \right\} \quad (9)$$

M = antal integrationssteg per linjesegment

Med antagen tillgänglighet för vindkraftverket om η procent, skall resultatet från ekvation 9 multipliceras med faktorn $\eta/100$.