

# Analys av modeller för simulering av nedreglering av aktiv effekt i vindkraftsanläggningar

Emil Andersson

15 juni 2015

## I. INLEDNING

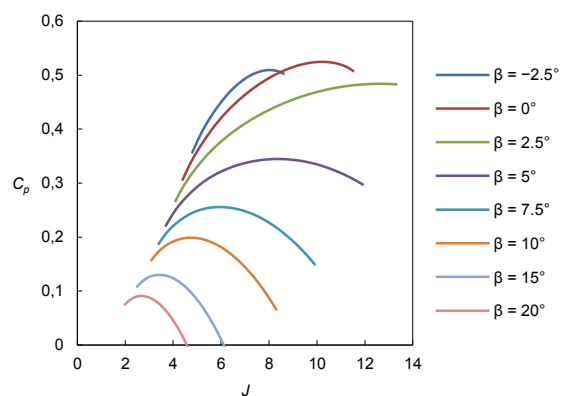
Vindkraftens utbyggnad kommer leda till att det i framtiden kommer ställas högre krav på nedstyrning av den aktiva effekten i vindkraftsanläggningar. Detta arbete har behandlat hur elproduktionen påverkas vid nedstyrning. Det är inte alltid självklart hur en anläggning påverkas då det är faktorer som turbinlayout, vindriktning och vindhastighet som spelar in.

För att kunna modellera nedreglering av den aktiva effekten har arbetet delvis gått ut på att skapa en aerodynamisk modell av Siemens SWT-2.3-93. Turbinen används i bl. a. anläggningarna Rödsand 2 i Danmark som ägs av E.ON och Lillgrund i Sverige som ägs av Vattenfall. Vidare utvecklades ett program för att kunna genomföra validering av wake-modeller och för att simulera nedstyrning av den aktiva effekten. Wake-modellerna som valideras är N.O. Jensens wake-modell och Larsens wake-modell. Valideringen gjordes mot data från Rödsand 2.

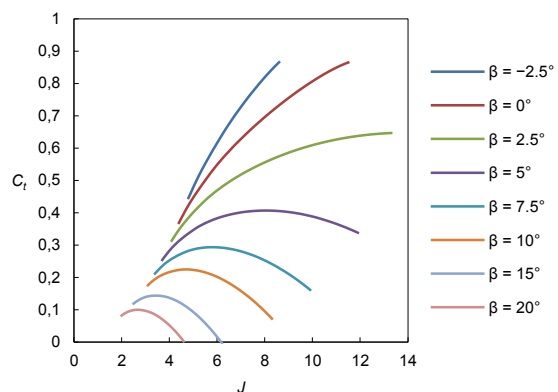
## II. METOD

Modellen för Siemens SWT-2.3-93 skapades på egen hand med Glauerts teori för vindturbiner där bladelementteorin och impulsteorin kombineras (eng. Blade Element Momentum Theory). Då strömningsfältet varierar periodiskt på grund av ett fixt antal blad, vilket minskar effekten turbinen extrahe-

rar, används Prandtls korrektions-faktor. Modellen i form av  $C_p$ - och  $C_t$ -kurvor som funktioner av pitchvinkel  $\beta$  och förhållandet mellan spets- och vindhastighet  $J$  (eng. tip speed ratio) visas i figur 1 och 2.



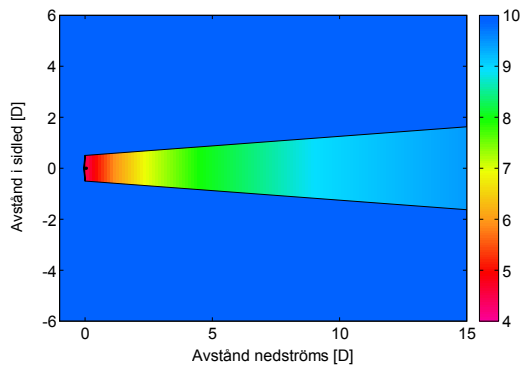
Figur 1. Framtagna  $C_p$ -kurvor för Siemens SWT-2.3-93.



Figur 2. Framtagna  $C_t$ -kurvor för Siemens SWT-2.3-93.

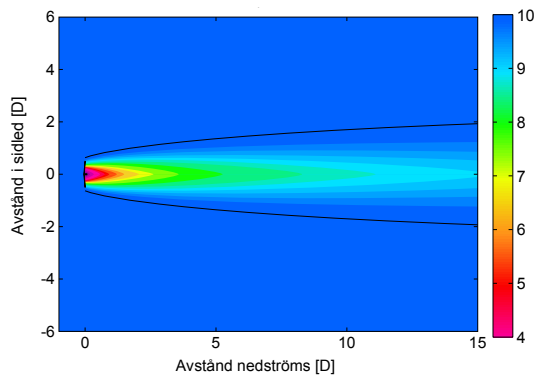
N.O. Jensens wake-modell har utgångspunkten att rörelsemängden i vaken bakom turbinen bevaras. Modellens syfte är att uppskatta vindens energiinnehåll snarare än att

beskriva hastighetsfältet i vaken. Den tar hänsyn till turbinens dragkoefficient  $C_t$  och innehåller en parameter  $k$  för hastighetsåterhämtning som är beroende av turbulensintensiteten.



Figur 3. Hastighetsfältet i N.O. Jensens wake-modell.

G.C. Larsens wake-modell baseras på Prandtls ekvationer för turbulenta gränsskikt. Strömningen antas vara stationär och inkompressibel. I arbetet används första ordningens lösning till gränsskiktsekvationerna. I figur 4 visas hastighetsfältet för Larsens wake-modell vid turbulensintensiteten 12 %.

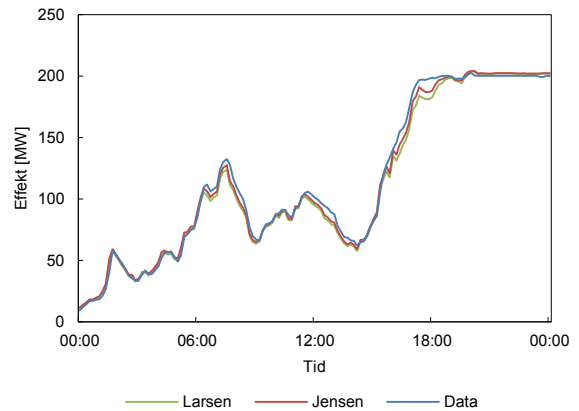


Figur 4. Hastighetsfältet i G.C. Larsens wake-modell.

### III. RESULTAT

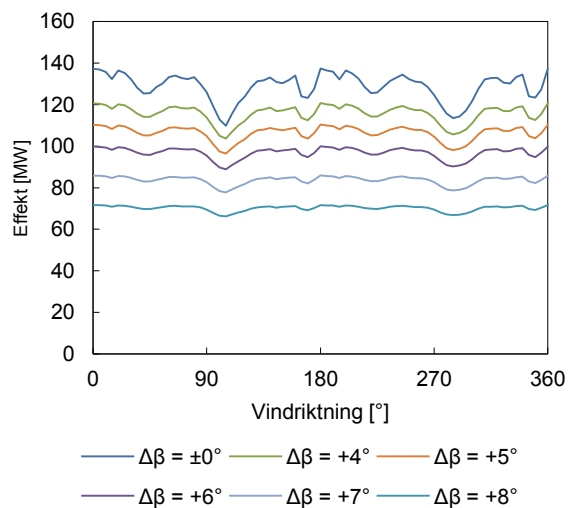
Validering utfördes av de båda wake-modellerna genom att simulera produktionen för hela anläggningen Rödsand 2. Vindriktning-

arna med standardavvikelser som användes i simuleringarna mättes av mätmasten. I figur 5 visas simuleringar av uteffekten för hela anläggningen för ett helt dygn. Effekten i varje mätpunkt är ett medelvärde över tio minuter.



Figur 5. Validering av produktionssimulering för Rödsand 2.

När modellerna validerats simulerades nedstyrning av den aktiva effekten i hela anläggningen. Pitchvinkeln ändrades lika mycket för alla vindkraftverk relativt den optimala. Dalarna slätas ut ju mer effekten styrs ner vilket är samma resultat som förväntas i fulleffekt-fallet då  $C_t$  är lågt för alla vindkraftverk.



Figur 6. Simulering av nedstyrning av den aktiva effekten i Rödsand 2 vid 10 m/s.

#### IV. SLUTSATSER

Wake-modellerna som studerats i detta arbete kan beräkna produktionen i en stor vindkraftsanläggning med väldigt liten felaktighet. Det innebär att modellerna kan användas vid beräkning av marginalen till maximal effekt vid nedreglering.

Vad gäller nedreglering av den aktiva effekten är viktigt att turbinmodellen stämmer väl överens med verkligheten för att även simuleringar av nedreglering ska ge goda resultat. Turbinmodellen som skapades i denna rapport är inte validerad men den förväntas ge en god bild av hur wake-effekten påverkas vid nedreglering. Modellen kan och borde vidareutvecklas. Än bättre är att data från tillverkaren används i framtida studier.

Resultaten visar att wake-modellerna kan beräkna produktionen för en större vindkraftsanläggning med liten felaktighet. Däremot blir felaktigheten vid beräkning av produktionen för enskilda turbiner i anläggningen större. Om modellerna ska användas för simulering i realtid måste de anpassas så att de blir tidsberoende.

En av de större utmaningarna är att utveckla vädermodellerna så att produktionsprognoserna blir bättre. Avvikelser på grund av felprognostisering kan vara så stora som  $\pm 19\%$  av den installerade vindkraftseffekten i Sverige. En metod för att gardera sig mot felprognostisering är att man tillåter anläggningar att inte alltid producera maximalt utan att det lämnas en marginal för tillfällig uppreglering vid behov.