



Sammanlagring av flicker från vindkraftverk

Elforsk rapport 05:16

Sammanlagring av flicker från vindkraftverk

Elforsk rapport 05:16

Sammanlagring av flicker från vindkraftverk

Elforsk rapport 05:16

Åke Larsson
Richard Larsson



Förord

Vindkraftverk ger dynamiska störningar på elnätet till följd av en varierande effektproduktion. Den ojämna effektproduktionen kan förorsaka variationer i ljusintensiteten från glödlampor, en störning som i elkraftsammanhang benämns flimmer eller flicker. I denna utredning studeras sammanlagringen av flicker från flera vindkraftverk eller vindkraftgrupper anslutna i olika anslutningspunkter både på en ledning och vid olika spänningsnivåer i samma nät.

Projektet (2346) har genomförts av SwedPower AB med finansiering från Elforsks vindkraftprogram 2002-2004 (projekt 2243) och särskild finansiering från nio elföretag, och Svenska Kraftnät. Vindkraftprogrammet finansieras av Falkenberg Energi, Göteborg Energi, Härnösands Elnät, Statens Energimyndighet via VindForsk, EBL-Kompetanse, Sydkraft, Umeå Energi, Vattenfall och Öresundskraft. Medverkande företag med särskild finansiering är C4 elnät, Energiverken i Halmstad, Göteborg Energi, Skellefteå Kraft, Sollentuna Energi, Sydkraft Nät, Umeå Energi, Varberg Energi och Öresundskraft.

Programmets styrgrupp består av Per Carlson, Göteborg Energi, Morten Henriksen, Statkraft, Helena Andersson, Svensk Energi, Sara Hallert, Energimyndigheten, Thomas Wiborg, EBL-Kompetanse, Jan-Åke Jacobson, Falkenberg Energi, Mattias Törnkvist, Vattenfall Utveckling och Jörgen Svensson, Sydkraft Vind.

Stockholm i maj 2005

Ulf Arvidsson
Elforsk AB
Programområde El- och värmeproduktion

Sammanfattning

Vindkraftverk ger dynamiska störningar på elnätet till följd av en varierande effektproduktion. Den ojämna effektproduktionen kan förorsaka variationer i ljusintensiteten från glödlampor, en störning som i elkraftsammanhang benämns flimmer eller flicker. Av det skälet är tillverkare skyldiga att deklarerar den störnivå som ett vindkraftverk genererar. Den uppmätta störnivån används för att beräkna det flicker som vindkraftverk genererar i anslutningspunkten. Metoden för flickerberäkningar finns preciserade i AMP.

Vid den praktiska tillämpningen av ovan nämnda beräkningar uppstår ofta frågeställningen hur flickeremissionen från flera vindkraftverk adderas om de ansluts i olika anslutningspunkter på en och samma ledning. Beräkningsmetoden i AMP preciserar endast beräkning av flickernivån om ett eller flera vindkraftverk ansluts till en och samma punkt. En annan närliggande fråga är om gränsvärdet för flicker skall vara detsamma oavsett spänningsnivå. Båda problemställningarna är vanliga och aktualiseras allt oftare då myndigheterna begränsar vindkraftutbyggnaden till vissa områden.

I denna utredning studeras sammanlagringen av flicker från flera vindkraftverk eller vindkraftgrupper anslutna i olika anslutningspunkter både på en ledning och vid olika spänningsnivåer i samma nät. Målet är att finna metoder att beräkna sammanlagring av flicker från flera vindkraftverk anslutna i olika anslutningspunkter i samma nät. Ytterligare ett mål är att studera om gränsvärdet för flicker skall vara samma oavsett spänningsnivå.

Utredningen baseras på dynamiska studier av vindkraftverk och nät i programvaran PSCAD/Emtdc. Studierna har utförts på typiska landsbygdsnät, för att på ett överskådligt sätt härleda resultaten presenteras beräkningar och simuleringar på ett fiktivt kabelnät som är representativt för en typisk distributionsradial på landsbygden.

Resultaten visar att flicker från flera vindkraftverk placerade längs en radial kan sammanräknas i en och samma punkt. Flickeremissionen från varje enskilt vindkraftverk fortplantar sig obehindrat längs en radial ut mot lägre kortslutningseffekt. Den totala flickernivån från samtliga vindkraftverk längs radialen kan räknas samman i punkten med lägst kortslutningseffekt. Denna totala flickeremission kan därefter transponeras till valfri punkt på radialen med högre kortslutningseffekt. Genom att tillämpa ovanstående beräkningsmetodik kan det flickret hos en abonnent beräknas. Beräkningar och simuleringar på relevanta nät visar på cirka 10% lägre flickernivå jämfört med en "värsta fallet beräkning" där vindkraftverken utmed radialen approximeras till en och samma punkt.

För större nät med flera olika spänningsnivåer gäller samma grundläggande teori med fortplantning och transponering. Skillnaden är dock att transponering från lägre spänningsnivåer till högre spänningsnivåer mer eller mindre kan betraktas som överflödiga eftersom flickernivån begränsas kraftigt över transformator. Detta beror på att transformatorns impedans är relativt stor och ökar kortslutningseffekten drastiskt, något som i sin tur verkar reducerande på det transponerade flickret. Då flicker fortplantar sig obehindrat i nätet har en hög flickeremission på en hög spänningsnivå med hög kortslutningseffekt en mycket stor inverkan på det övriga nätet. En motsvarande flickeremis-

sion på en låg spänningsnivå ger endast en mycket ringa påverkan på flickernivån i det överliggande nätet.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	2
1.1	BAKGRUND	2
1.2	MÅL.....	2
1.3	AVGRÄNSNINGAR.....	2
2	FLICKER	3
2.1	VARIATIONER I VINDHASTIGHET.....	3
2.2	SNABBA VARIATIONER I EFFEKTPRODUKTION	4
2.3	FLICKERALGORITM	6
3	AMP, ANSLUTNING AV MINDRE PRODUKTIONSANLÄGGNINGAR TILL ELNÄTET10	
3.1	BEGREPPEN ANSLUTNINGSPUNKT OCH SAMMANKOPPLINGSPUNKT	10
3.2	BERÄKNING AV FLICKER ENLIGT AMP	10
4	PROBLEMBESKRIVNING.....	12
4.1	SAMBAND MELLAN FLICKERNIVÅ OCH KORTSLUTNINGSEFFEKT	12
5	DYNAMISKA SIMULERINGAR	16
5.1	PROGRAMVARA OCH SIMULERINGSGÅNG	16
5.2	SIMULERAD EFFEKTvariation MED PSCAD/EMTDC FRÅN ETT VINDKRAFTVERK.....	18
5.3	SIMULERING EFFEKTvariationER I PSCAD/EMTDC FRÅN FLERA VINDKRAFTVERK	19
5.4	SIMULERAT NÄT	20
5.5	RESULTAT FLICKER LÄNGS EN RADIAL	20
5.6	TILLÄMPNINGSEXEMPEL.....	21
6	FLICKER PÅ OLIKA SPÄNNINGSNIVÅER.....	24
6.1	FLICKERMÄTNINGAR I TYPISKA LANDSBYGDENÄT	24
6.2	SIMULERINGAR PÅ OLIKA SPÄNNINGSNIVÅER	25
7	DISKUSSION OM FLICKER OCH FLICKERNIVÅER	27
8	SLUTSATS	28
9	REFERENSER	29

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vindkraftverk ger dynamiska störningar på elnätet bland annat till följd av att turbinen inte ger ett konstant moment under ett rotationsvarv. Den ojämna effektproduktionen kan förorsaka variationer i ljusintensiteten från glödlampor, en störning som i elkraftsammanhang benämns flimmer eller flicker. För att förhindra flickerstörningar är tillverkare skyldiga att deklarerar den störnivån som ett vindkraftverk genererar. Detta sker genom ett elkvalitetsprov som utförs på nya vindkraftverk. Elkvalitetsprovet och mätmetoden för flickerstörnivå är definierade i en IEC-standard. Den uppmätta flickerstörnivån kan sedan användas för att beräkna det flicker som ett, eller flera vindkraftverk, genererar i anslutningspunkten i ett godtyckligt nät. Metoden att beräkna detta samt ett gränsvärde för flicker finns preciserade i AMP.

Vid den praktiska tillämpningen av ovan nämnda flickerberäkning uppstår ofta följande två problemställningar:

1. hur adderas flickeremissionen från flera vindkraftverk om de ansluts i olika anslutningspunkter på en och samma ledning?
2. skall gränsvärdet för flicker i anslutningspunkten från ett vindkraftverk eller en vindkraftgrupp vara samma oavsett spänningsnivå?

Båda problemställningarna är vanliga och aktualiseras allt oftare då myndigheterna styr vindkraftutbyggnaden till vissa områden. Denna styrning medför att många enstaka vindkraftverk och/eller flera olika vindkraftgrupper ansluts till en och samma ledning med någon eller några kilometers avstånd från varandra.

1.2 Mål

I denna utredning studeras sammanlagringen av flicker från flera vindkraftverk eller vindkraftgrupper anslutna i olika anslutningspunkter både på en ledning och vid olika spänningsnivåer i samma nät.

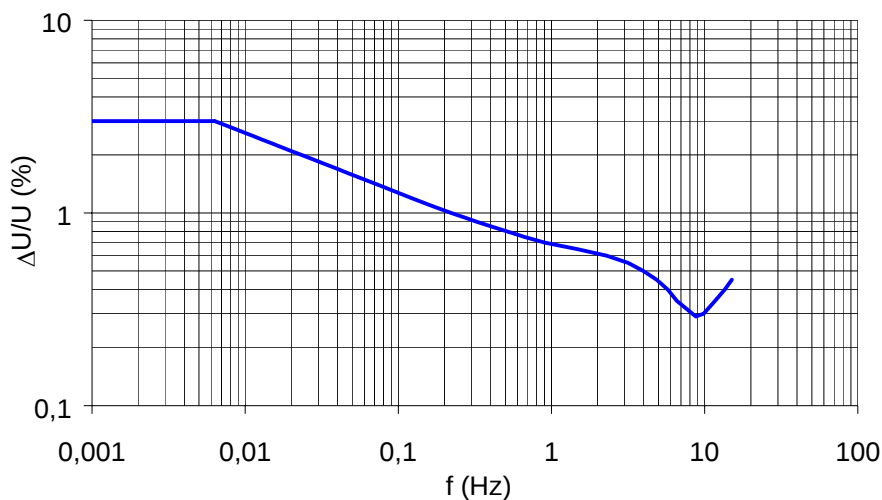
Målet är att finna metoder att beräkna flickeremissionen från flera vindkraftverk anslutna i olika anslutningspunkter i samma nät. Ytterligare ett mål är att studera om gränsvärdet för flicker skall vara samma oavsett spänningsnivå.

1.3 Avgränsningar

Utredningen avgränsas till att omfatta dynamiska studier i programvaran PSCAD/Emtdc. Studierna utförs på typiska landsbygdsnät där vindkraft finns installerad och där nätdata är känd. För att på ett överskådligt sätt härleda resultaten presenteras beräkningar och simuleringar på ett fiktivt kabelnät som är representativt för en typisk distributionsradial på landsbygden.

2 Flicker

Effektpulsationer härstammande från vindgradienten och tornskuggan kan ge upphov till så kallat flicker. Flicker är ett engelskt ord som betyder *fladdra*, *flämta* och avser lågfrekventa störningar i spänningen. Dessa störningar kan ge upphov till variationer i ljusintensiteten hos glödlampor. Regelbundet återkommande stegvisa spänningsändringar skall enligt norm ligga under kurvan i figur 2.1 Som framgår är gränsvärdet i flickerkurvan lägst vid 8.8 Hz, detta beror på att det mänskliga ögat/hjärnans förmåga att upptäcka variationer i en glödlampas ljusintensitet är som störst vid just den frekvensen. Flicker finns närmare beskrivna i IEC 868 och tillägg, Amendment 1, [1][2].



Figur 2.1 Gränskurva för acceptabla stegvisa spänningsändringar

Effektpulsationer förekommer hos vindkraftverk dels som en följd av variationer i vindhastigheten och dels beroende på den så kallade tornskuggseffekten. Det senare förekommer i huvudsak hos vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal. Vindkraftverk som arbetar med variabelt varvtal kan, om de styrs på rätt sätt, utjämna dessa effektpulsationer.

2.1 Variationer i vindhastighet

Vindens hastighet och turbulens har en direkt koppling till den effekt och den elkvalitet som genereras av vindkraftverk. Vinden varierar från plats till plats beroende på klimat, geografiskt läge, omgivande terräng och en rad andra faktorer. Vinden är till sin natur stokastisk, det vill säga den varierar både i ett kortare och ett längre perspektiv efter ett till synes oförutsägbart mönster [3]. Det är med andra ord svårt att förutsäga hur vinden kommer att blåsa den närmaste sekunden eller halvtimmen.

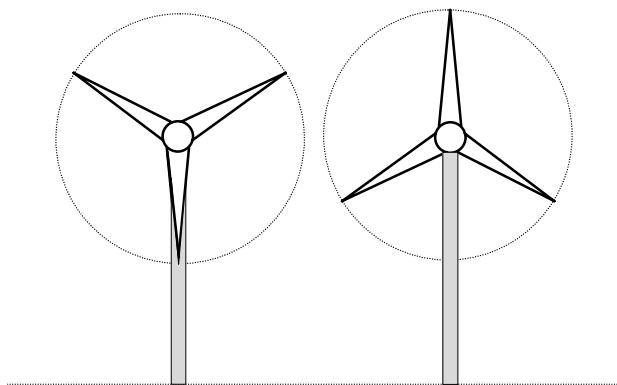
Vinden är normalt inte konstant utan har en viss turbulens. Med turbulens menas variationer av vindhastigheten kring medelvärdet. Turbulens uppstår när vinden träffar träd, byggnader, berg och så vidare. Turbulensen ökar vid ökad vindhastighet.

För förståelsen av turbinens egenskaper bör även begreppet vindgradient nämnas. På flera hundra meters höjd är markytans påverkan på vindhastigheten ringa. Närmare markytan uppstår en friktion som ger upphov till en uppbromsning av vindhastigheten. Denna variation av vindhastigheten som funktion av höjd över markytan kallas vindgradient. Vindgradienten är inte linjär i förhållande till höjden.

2.2 Snabba variationer i effektproduktion

Effekten från en vindturbin pulserar på grund av vindgradienten och tornskuggan [4]. Detta beroende på att mitt framför tornet bromsas vindhastigheten, detta fenomen benämns med tornskugga. Varje gång som ett blad passerar tornet kommer bladet in i tornskuggan. Om turbinen har tre blad kommer fenomenet att uppträda tre gånger för varje varv som turbinen roterar. Vindgradienten påverkar även den turbinen, om vindgradienten vore linjär skulle den inte ha någon inverkan alls på en trebladig turbin. Eftersom vindgradienten inte är linjär har den inverkan på en trebladig turbin.

Den vänstra turbinen i figur 2.2 visar rotorpositionen när ett blad passerar tornet. Som framgår av figuren är inget av de två återstående bladen i det översta läget där vindhastigheten är högst. Motsatsen ses i den högra turbinen i figuren, där är ett blad i översta läget där den högsta vindhastigheten råder medan de två återstående bladen är så långt borta från tornet som möjligt.



Figur 2.2 Olika rotorpositioner på en trebladig turbin. Både tornskuggan och vindgradienten bidrar till effektpulsationer

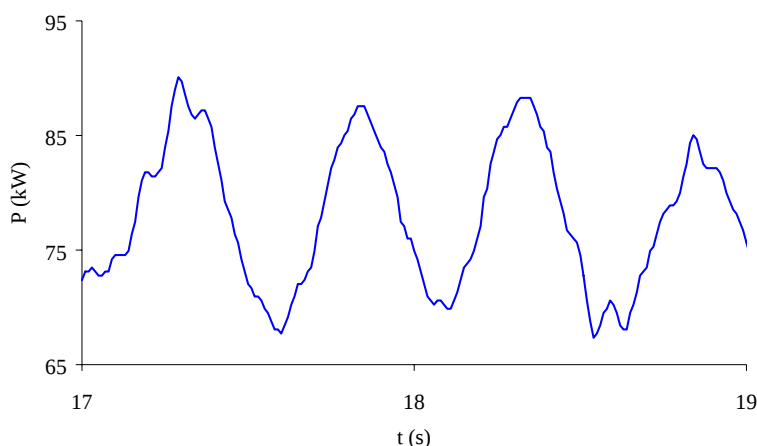
Effektpulsationer orsakade av vindgradient och tornskugga förekommer på alla typer av turbiner oavsett typ av reglering. Frekvensen på effektpulsationerna, f_p , är:

$$f_p = \frac{b * n}{60} \quad (3.1)$$

där b är antalet blad och n är rotorvarvtalet i varv per minut.

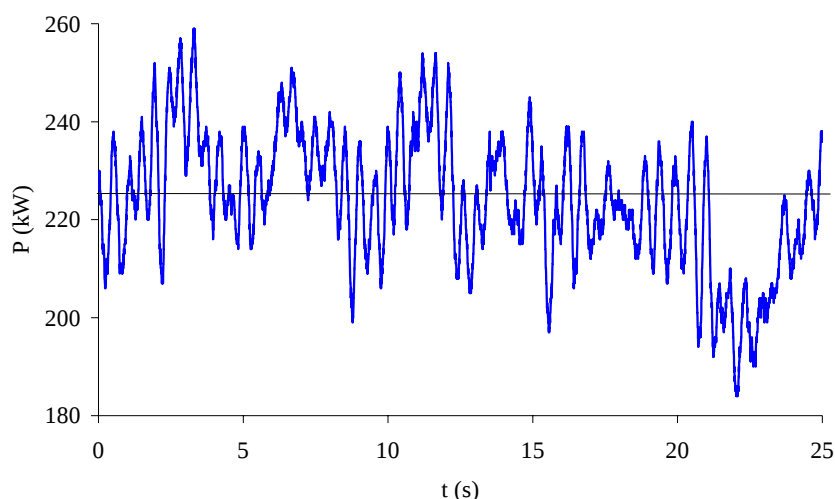
Storleken på effektpulsationerna ökar med vindhastigheten och kan variera mellan olika typer och fabrikat av vindkraftverk. Om vindkraftverket arbetar med variabelt varvtal och/eller har individuell vridning av varje blad kan effektpulsationerna jämnas ut. I vindkraftverk som har stort variabelt varvtal, utrustade med en omriktare, är generatorfrekvensen skild från nätfrekvensen, vilket medför att variationer i moment från turbinen inte går direkt ut på nätet. Vid effektmaximum lagras energi i turbinen som rörelseenergi då turbinen kortvarigt tillåts öka sitt varvtal istället för att avge effekttoppen ut till nätet. På samma sätt kan rörelseenergi tas från turbinen vid ett effektminimum genom kortvarig sänkning av varvtalet.

Figur 2.3 visar effekten från ett trebladigt bladvinkelreglerat Vestas 225 kW vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal på 40,5 rpm. Som framgår av figuren är medeleffekten vid detta tillfälle cirka 80 kW, alltså cirka 35% av märkeffekten. Redan vid denna låga uteffekt fås effektpulsationer som motsvarar $\pm 12,5\%$ av den avgivna medeleffekten. I figuren har den aktiva effekten mätts med en samplingsfrekvens på 100 Hz. Frekvensen på de uppmätta effektpulsationerna är cirka 2 Hz, vilket överensstämmer väl med tre gånger turbinvarvtalet. Återigen, dessa effektpulsationer förekommer på såväl bladvinkelreglerade som överstegringsreglerade vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal.



Figur 2.3 Effektpulsationer härrörande från vindgradient och tornskugga från ett bladvinkelreglerat Vestas 225 kW vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal

Ett annat önskat dynamiskt fenomen från bladvinkelreglerade vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal är effektfluktuationer orsakade av turbulens. Orsaken är att bladens vinkel inte ändra tillräckligt snabbt i förhållande vindhastigheten. Då denna ändring ej är tillräckligt snabb uppstår effektfluktuationer. Figur 2.4 visar effektfluktuationer orsakade av turbulens. Den aktiva effekten är uppmätt från ett Vestas 225 kW vid en vindhastighet som överstiger märkvind, det vill säga bladen är i detta läge vridna.

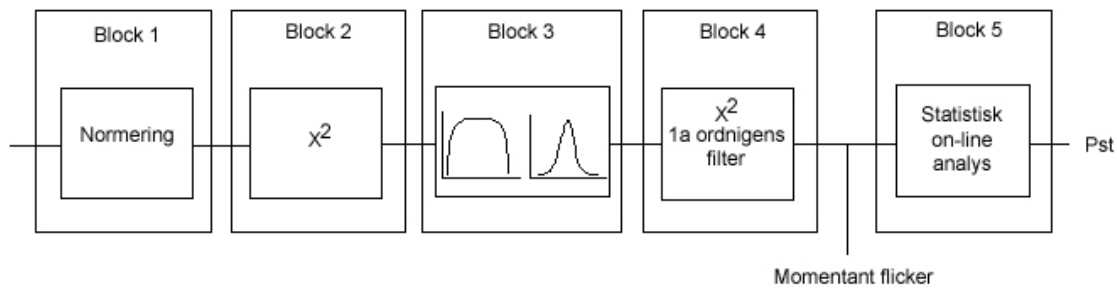


Figur 2.4 Effektpulsationer härrörande från turbulens samt vindgradient och tornskugga från ett bladvinkelreglerat Vestas 225 kW vindkraftverk som arbetar med konstant varvtal. Den tunna linjen visar vindkraftverkets märkeffekt.

I figuren indikerar den tunna räta linjen vindkraftverkets märkeffekt. Som framgår av figuren varierar effekten kring medeleffekten, det högsta toppvärdet under dessa 80 sekunder är cirka 260 kW och det lägsta 180 kW. Medeleffekten ur stationär betraktelse är dock konstant, 225 kW. Noterbart är även att effektpulsationerna som härrör från vindgradient och tornskugga framstår tydligt i denna figur. Turbulensen i vinden tillsammans med vindkraftverkets dynamik ger effektvariationer i området 0,01-10 Hz. [4]

2.3 Flickeralgoritm

Flickernivån anges med ett P_{st} värde där index "st" står för det engelska uttrycket short-term. Flickermätarens design och funktion finns utförligt specificerad i IEC 868 [1]. Blockschemat i figur 2.5 återspeglar flickermeters arkitektur. Trots att blockschemat består av fem block kan flickermeteren delas upp i två enheter. Den ena enheten simulerar responsen motsvarande händelsekedjan lampa-öga-hjärna. Den andra huvudenheten utför fortlöpande en statistisk analys av flickersignalen och presenterar resultatet. Blocken 2, 3 och 4 utför tillsammans den första uppgiften medan block 5 utför den andra.



Figur 2.5 Blockschema av flickermeteren

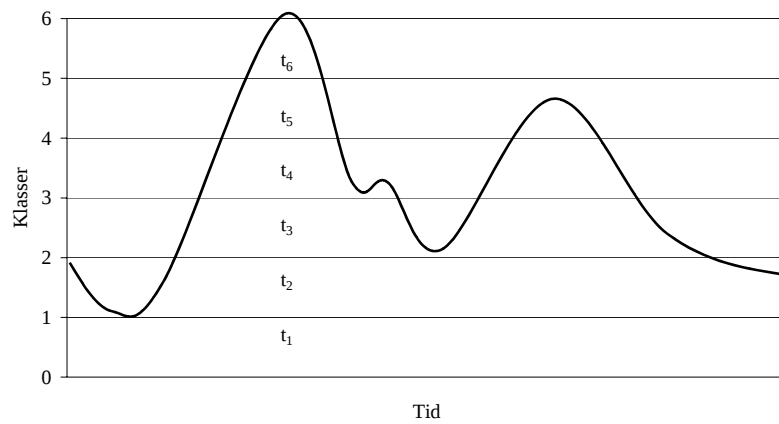
”Block 1” utför det första steget i flickermätaren. Detta block skalar den uppmätta spänningen till ett referensvärde. I ”block 2” kvadreras spänningen för att simulera beteendet hos en glödlampa. ”Block 3” består av två kaskadkopplade filter där det ena filtret eliminerar eventuella dc-komponenter och den dubbla nätfrekvensen. Det andra filtret simulerar frekvensberoende mellan spänningsvariationen i en glödlampa och det mänskliga synorganet. ”Block 4” består av kvadrerande multiplikator och ett första ordningens låg-passfilter med en tidskonstant på 300 ms, tillsammans bildar dessa en icke linjär funktion. Utsignalen från ”block 4” representerar den momentana flickernivån. ”Block 5” är det sista blocket i flickermeteren som utför en fortlöpande statistisk analys av den momentana flickersignalen. Den statistiska analysen kan delas upp i två delar. Först etableras en ackumulerad sannolikhetsfunktion ur den momentana flickernivån och där efter beräknas ett Pst värde med hjälp av en flerpunktsmetod.

Ur det momentana flickervärdet i ”block 4” beräknar den ackumulerade sannolikhetsfunktionen den procentuella andelen av en given observationstid som en viss flickernivå överskrider. Den ackumulerade sannolikheten, $p(l)$, som den momentana flickersignalen överskrider l är definierad som:

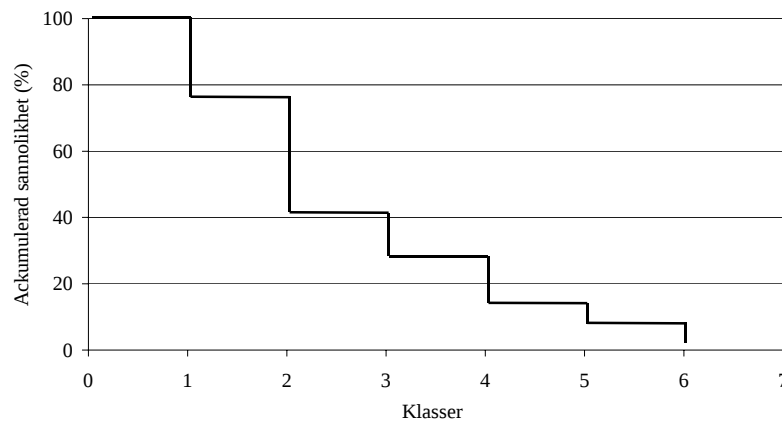
$$p(l) = \frac{t_l}{T} \quad (2.2)$$

där t_l är den tid som signalen överskrider l och T den totala observationstiden. Denna metod benämns på engelsk ”time at level classification” vilket fritt översatt blir klassificering av tid per nivå. Av praktiska skäl kan endast ett begränsat antal nivåer $p(l)$ beräknas. IEC 868 anger att analysen skall utföras med minst 6 bitars upplösning och minst 64 klasser. Minsta samplingshastighet är 50 sampel per sekund.

Figur 2.6 illustrerar denna metod på ett begränsat antal klasser. Den resulterande ackumulerade sannolikheten för observationstiden T illustreras i figur 2.7.



Figur 2.6 Momentant flicker indelat i klasser



Figur 2.7 Ackumulerad sannolikheten av signalen i figur 2.6

Efter denna klassifiering beräknas flickervärdet P_{st} med hjälp av följande flerpunktsekvation:

$$P_{st} = 0,1 \cdot \sqrt{3,14P_{0,1} + 5,25P_{1s} + 6,57P_{3s} + 28P_{10s} + 8P_{50s}} \quad (2.3)$$

där $P_{0,1}$, P_{1s} , P_{3s} , P_{10s} och P_{50s} är de flickernivåer som överskridits under 0,1%, 1%, 3%, 10% and 50% av den observerade tiden, med andra ord de momentana flickernivåer under x% av observationstiden. Indextillägget "s" anger att viktade värden skall användas. Dessa viktade värden beräknas som:

$$P_{1s} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3 \quad (2.4)$$

$$P_{3s}=(P_{2,2}+P_3+P_4)/3 \quad (2.5)$$

$$P_{10s}=(P_6+P_8+P_{10}+P_{13}+P_{17})/5 \quad (2.6)$$

$$P_{50s}=(P_{30}+P_{50}+P_{80})/3 \quad (2.7)$$

Tidskonstanten på 300 ms i "block 4" ser till att $P_{0,1}$ inte ändras momentant vilket gör att viktning inte behövs.

Enligt IEC standard skall ett P_{st} värde baseras på en 10 minuters mätperiod vilket innebär att tidsperioden T enligt ovan väljs till 10 minuter. P_{st} värdet är lämpligt att använda för att analysera flickerstörningar från källor med en kort arbetscykel. För att analysera flicker från källor med lång eller varierande arbetscykel är det lämpligt att använda ett P_{lt} värde där index "lt" står för det engelska uttrycket long-term. P_{lt} beräknas ur P_{st} värden som:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{k=1}^N P_{st,k}^3}{N}} \quad (2.8)$$

där $P_{st,k}$ är N på varandra följande P_{st} värden. P_{lt} beräknas för $N=12$, det vill säga en period om två timmar.

Metoden för att mäta momentant flicker och den algoritm som krävs för att beräkna ett P_{st} värde är ganska komplicerade. En generell analytisk metod för att beräkna P_{st} är ej möjlig att finna. Det finns dock metoder att beräkna summan av flicker från ett antal kända flickerkällor. Enligt IEC 61000-3-7 kan följande ekvation användas [5]:

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_i P_{st,i}^m} \quad (2.9)$$

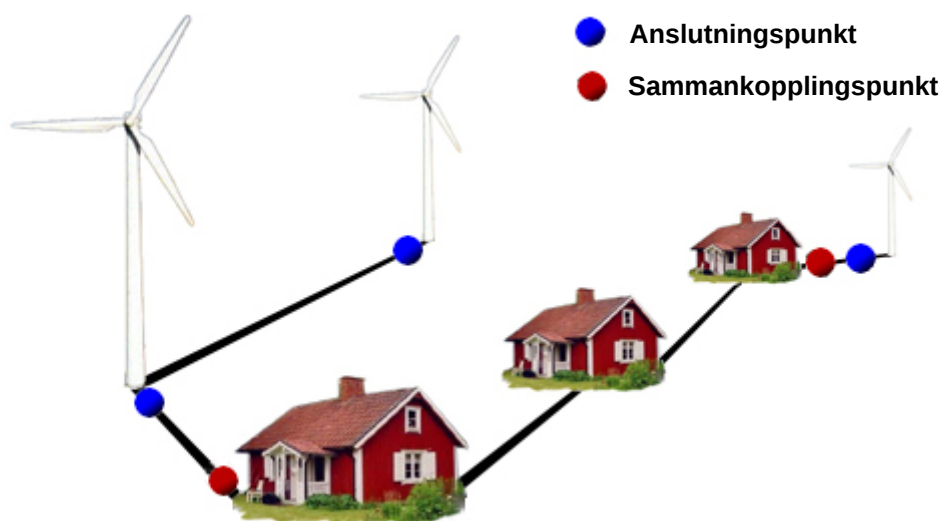
där $P_{st,i}$ är flickeremissionen från källa nummer i och m är en koefficient som beror på den störande källans karaktäristik. Om källans variationer är stokastisk till sin natur skall $m=2$ användas. Enligt IEC 61400-21 är flickeremissionen från ett vindkraftverk under drift stokastisk [6]. Total flickeremission från flera vindkraftverk anslutna till samma anslutningspunkt skall enligt IEC 61400-21 beräknas med hjälp av denna ekvation och med $m=2$.

3 AMP, Anslutning av mindre produktionsanläggningar till elnätet

AMP är en rekommendation som ges ut av branschorganet Svensk Energi och har till syfte att utgöra ett hjälpmedel för nätägaren vid bedömning av anslutning av vindkraft-aggregat till distributionsnätet [7]. Den innehåller även en kravspecifikation för de skydd elnätägaren skall kräva för att nätet skall ha ett fullgott skydd vid fel i produktionsanläggningen eller i elnätet. Delar av den teorin som IEC 61400-21 och AMP baseras på finns beskriven i kapitel 2. I AMP förekommer begrepp som anslutningspunkt och sammankopplingspunkt, begrepp som även används i denna rapport. Begreppen förklaras mer ingående i kapitel 3.1

3.1 Begreppen anslutningspunkt och sammankopplingspunkt

I AMP förekommer begreppen anslutningspunkt och sammankopplingspunkt. Sammankopplingspunkten är den punkt i nätet där närmaste abonnenten finns ansluten. Anslutningspunkten är den punkt där ett eller flera vindkraftverk är anslutna till elnätet. Figur 3.1 ger exempel där röd markering representerar sammankopplingspunkt och blå markering representerar anslutningspunkt.



Figur 3.1 Förklaring av begreppen anslutnings- och sammankopplingspunkt

3.2 Beräkning av flicker enligt AMP

I AMP finns metodik beskriven för beräkning av flicker. Detta gäller både för flicker som förorsakas av ett vindkraftverk under drift och vid start. Ekvation 3.1 beskriver

förhållandet mellan kortslutningseffekt och flickeremission i anslutningspunkten för ett vindkraftverk vid drift.

$$S_k \geq \frac{1}{P_{st}} \cdot c_f \cdot (\psi_k) \cdot s_{ref} \quad (3.1)$$

där S_k är erforderlig kortslutningseffekt i anslutningspunkten, P_{st} är maximalt tillåten flickeremission, c_f och s_{ref} är flickerkoefficienten respektive märkeffekten för ett specifikt vindkraftverk.

Effektvariationerna från ett givet vindkraftverk är de samma oavsett vart i nätet det placeras. Däremot ger dessa effektvariationer olika påverkan på spänningen beroende på hur starkt nätet är. Spänningsvariationerna i sin tur ger upphov till ett flicker. Av den anledningen beror emitterat flicker i anslutningspunkten på kortslutningseffekten vilket leder till att flickernivån ökar omvänt proportionellt mot kortslutningseffekten om flickerkoefficienten är konstant.

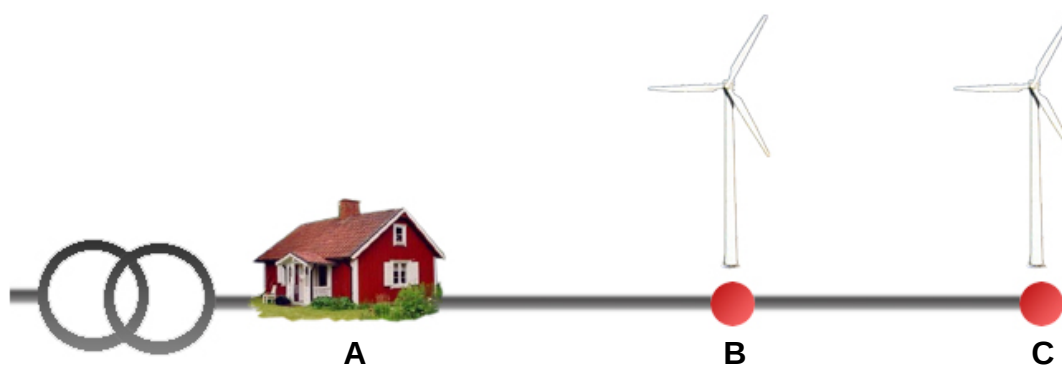
Ekvation 3.1 beskriver påverkan från ett vindkraftverk i en given punkt i elnätet. Om flera vindkraftverk ansluts till samma punkt kan den totala flickeremissionen beräknas enligt ekvation 3.2.

$$P_{st,tot} = \sqrt{\sum_k P_{st,k}^2} \quad (3.2)$$

där $P_{st,tot}$ är sammanräknat flicker för flera vindkraftverk i en punkt, P_{st} är flickeremissionen för varje enskilt verk och k är antalet vindkraftverk.

4 Problembeskrivning

Beräkningsmetoderna för flicker i AMP räcker inte alltid till för att beräkna påverkan från vindkraft. Sambanden för flickerberäkningar i AMP beskriver att det med hjälp av den elkvalitetsdeklaration som erhållits från vindkraftstillverkaren går att beräkna det emitterade flickret i en viss punkt i nätet. Begränsningen med denna beräkningsmetod beskrivs nedan med hjälp av figur 4.1.



Figur 4.1 Schematisk bild av en simulerad vindkraftslinje

Antag att ett vindkraftverk skall anslutas i punkt B. Enligt AMP går det att med givna samband beräkna flickeremissionerna från vindkraftverk i denna punkt om flickerkoeficienten och kortslutningseffekten är känd. Dock anges inte hur flickret beräknas i punkt A. Approximativt går det att anta att anslutningspunkten och sammankopplingspunkten utgör av samma punkt, A. Approximationen blir ett slags "värsta fall" som förmodligen gör att flickernivån överskattas i punkt A, hur mycket är dock inte klarlagt.

Teorin ovan gör gällande att abonnenten i sammankopplingspunkten (A) upplever ett flicker skilt från det som emitteras i anslutningspunkten B. I exemplet ovan finns det även ett vindkraftverk installerat i punkt C. Följaktligen borde flickernivån i punkt A även påverkas i viss grad av detta vindkraftverk

Problemställningen är hur flickernivån hos abonnenten förändras beroende på vindkraftverkens anslutningspunkter. Detta beroende på att:

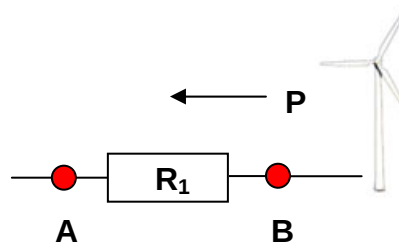
- Flicker från vindkraftverk beräknas separat för respektive anslutningspunkt och det saknas beräkningsmetod för hur de separata flickeremissionerna från olika anslutningspunkter sammanlagras.
- Det saknas beräkningsmetod för hur flicker ändras om anslutnings- och sammankopplingspunkterna är skilda från varandra, dvs. befinner sig punkter med olika kortslutningseffekter.

4.1 Samband mellan flickernivå och kortslutningseffekt

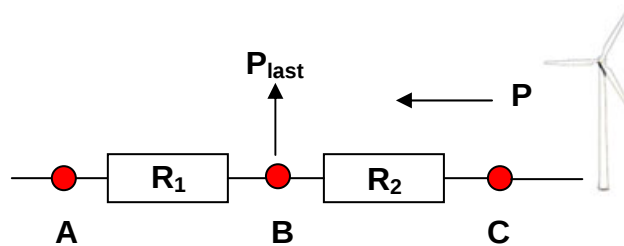
Följande härledning baseras på antagandet att belastningarna är konstanta, dvs. oberoende av spänningen. Antagandet att belastningen är oberoende av spänningen är rimlig

vid de mycket små spänningsvariationer som denna studie behandlar. För att skapa $P_{st}=0,25$ är det tillräckligt med spänningsvariationer om delar av procent. Under dessa förutsättningar är det rimligt att anta att en anslutningspunkt på en radial approximativt ger ett flicker längs radialen oberoende av belastningen

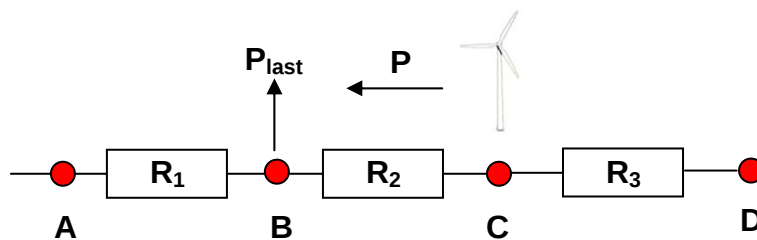
Antag att ett vindkraftverk ansluts till ett resistivt nät enligt figur 4.2 a i punkt B. Vindkraftverket har en uteffekt, P , med effektvariationen ΔP , se figur 4.3. När en aktiv effekt förs från punkt B upp i nätet uppstår en spänningsvariation över resistansen R_1 beroende på den varierande ström som den varierande effekten ΔP åstadkommer. En viss flickernivå uppstår nu i punkt B.



Figur 4.2 a Störkälla ansluten på hög kortslutningseffekt

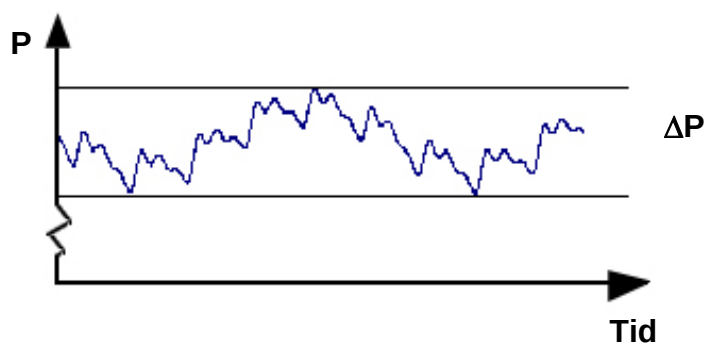


Figur 4.2 b Störkälla ansluten på låg kortslutningseffekt



Figur 4.2 c Störkälla ansluten på låg kortslutningseffekt

Den spänningsvariation som orsakar flicker orsakas av en relativt liten effektvariation. Figur 4.3 visar amplituden på en frekvenskomponent från ett vindkraftverk.



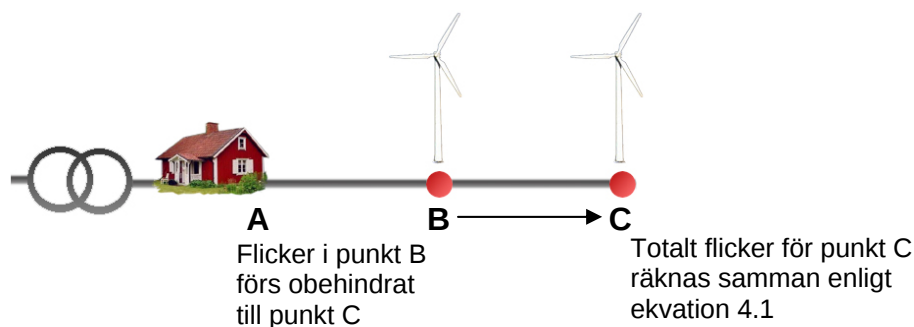
Figur 4.3 Effektvariationens amplitud för en frekvenskomponent från ett vindkraftverk

I figur 4.2 b är vindkraftverket flyttat och en last, P_{last} , finns i punkt B. Antag att lasten i punkt B är lika med noll. När vindkraftverket istället ansluts till punkt C måste fortfarande samma effekt och samma effektpulsationer ΔP flyta genom resistansen R_1 . Detta innebär att flickernivån i punkt B blir samma som när effekten flöt från punkt B i figur 4.2 a.

Antag nu att lasten i punkt B är konstant och lika med halva effekten från vindkraftverket $P/2$. Effekten som flyter genom resistansen R_1 är nu endast $P/2$ men effektvariationerna ΔP är oförändrad. Konsekvenserna av att effekten halverats är att den stationära spänningsnivån ändras men eftersom effektvariationen är oförändrad är flickernivån i punkt B oförändrad. Oberoende av storleken hos belastningen blir effektpulsationerna och därmed flickernivån oförändrad.

I figur 4.2 c finns ytterligare en punkt längre ut i nätet. Denna punkt D är förbunden till punkt C via en resistans R_3 . Om vindkraftverket ger en effektvariation ΔP som förorsakar en viss spänningsvariation och därmed flickernivå enligt resonemanget kring figur 4.2 b måste samma spänningsvariation och flickernivå uppträda i punkt D.

Om flera källor ger flicker längs en radial bör den totala flickernivån längst ute på radialen motsvara sammanräkningen av de enskilda flickeremissionerna längs radialen.



Figur 4.4 Sammanräkning av flicker från hög kortslutningseffekt till låg

Figur 4.4 visar ett exempel med en sammankopplingspunkt i A och två vindkraftverk i anslutningspunkterna B och C. Det totala flickret i punkt C antas möjligt att beräkna med hjälp av ekvation 3.2:

$$P_{st_{tot}} = \sqrt{P_{st_B}^2 + P_{st_C}^2} \quad (4.1)$$

där P_{st_B} och P_{st_C} är flicker i anslutningspunkterna B och C.

I ekvation 4.1 är de två värdena för flickeremissioner olika beroende på att kortslutningseffekten i punkterna B och C är olika. För att räkna om flickernivån från anslutningspunkten C till sammankopplingspunkten A bör följande härledning vara tillämpbar. Enligt ekvation 3.1 är flickret från ett vindkraftverk som är anslutet i en godtycklig punkt 1:

$$P_{st_1} = c \cdot \frac{S_{ref}}{S_{k_1}} \Rightarrow P_{st_1} \cdot S_{k_1} = c \cdot S_{ref} \quad (4.2)$$

Om samma vindkraftverk flyttas till en annan punkt, 2, blir flickret:

$$P_{st_2} = c \cdot \frac{S_{ref}}{S_{k_2}} \Rightarrow P_{st_2} \cdot S_{k_2} = c \cdot S_{ref} \quad (4.3)$$

ekvation 4.2 och 4.3 ger:

$$P_{st_1} = P_{st_2} \cdot \frac{S_{k_2}}{S_{k_1}} \quad (4.4)$$

där P_{st_1} är flickret i punkt 1 och P_{st_2} flicker i punkt 2 och S_k är kortslutningseffekterna i respektive punkter.

En flickeremission genererad i en punkt kan alltså med hjälp av ekvation 4.4 räknas om till en annan punkt i nätet med annan kortslutningseffekt.

5 Dynamiska simuleringar

Dynamiska studier utförs för att studera snabba förändringar i olika driftsfall eller drift-situationer. En dynamisk modell ger möjlighet att studera dynamisk påverkan vid t.ex. felfall eller omkoppling i ett elektriskt nät. När ett fel uppstår i ett elektriskt nät uppstår normalt kortvariga tidsberoende fenomen i form av transienter. Även dessa kan studeras med dynamiska modeller om tidsstegen i beräkningarna hålls korta.

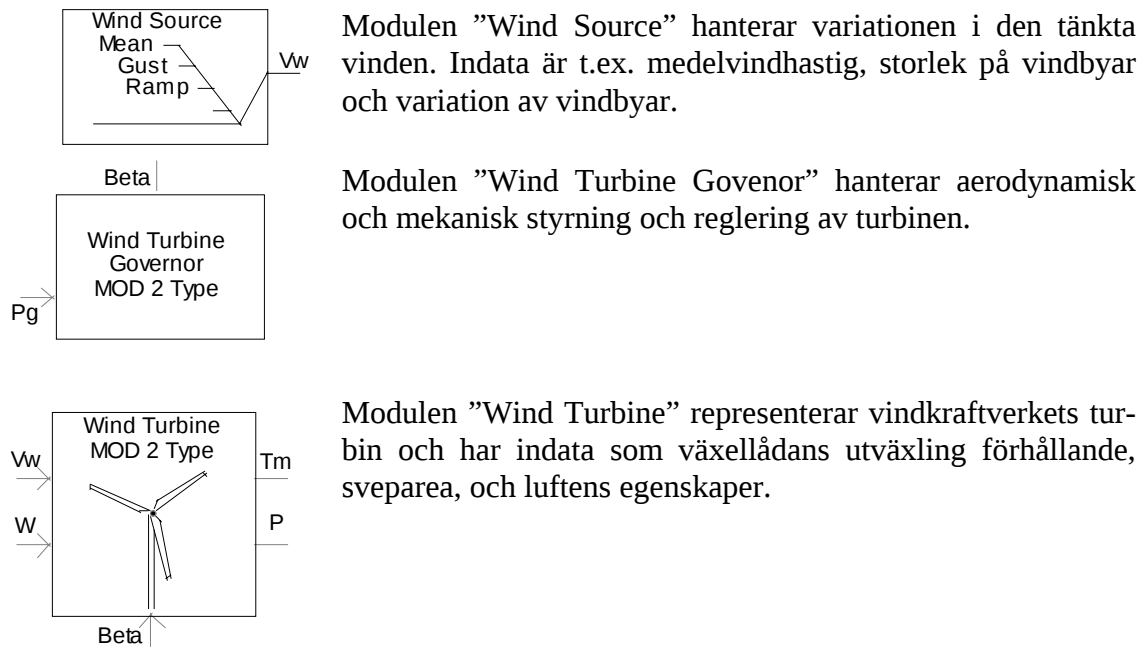
I den här studien används en dynamisk modell för att simulera och studera driftsfall vid samverkan mellan vindkraftverk och det nät de är anslutna till. Den teknik som ett vindkraftverk har ger en viss dynamik beroende på mekaniskt och aerodynamiskt utförande samt elektriska och styrtekniska egenskaper. Tillsammans bildar vindkraftverkets olika delar en komplex dynamisk enhet. Genom att implementera denna modell för ett vindkraftverk i ett elektriskt nät, kan nätets och vindkraftverkets samverkande dynamik studeras.

En typisk dynamisk påverkan från ett vindkraftverk på det matande nätet är de tidigare nämnda effektvariationerna som på aerodynamisk väg uppkommer när ett rotorblad passerar tornet till turbinens maskinhus. Denna effektvariation kan orsaka en spänningsvariation som dels beror på egenskaperna hos det matande nätet och dels på vindkraftverket. Samverkan mellan det matande nätet och det anslutna vindkraftverket ger alltså en dynamisk spänningsvariation som yttrar sig i form av flicker.

5.1 Programvara och simuleringsgång

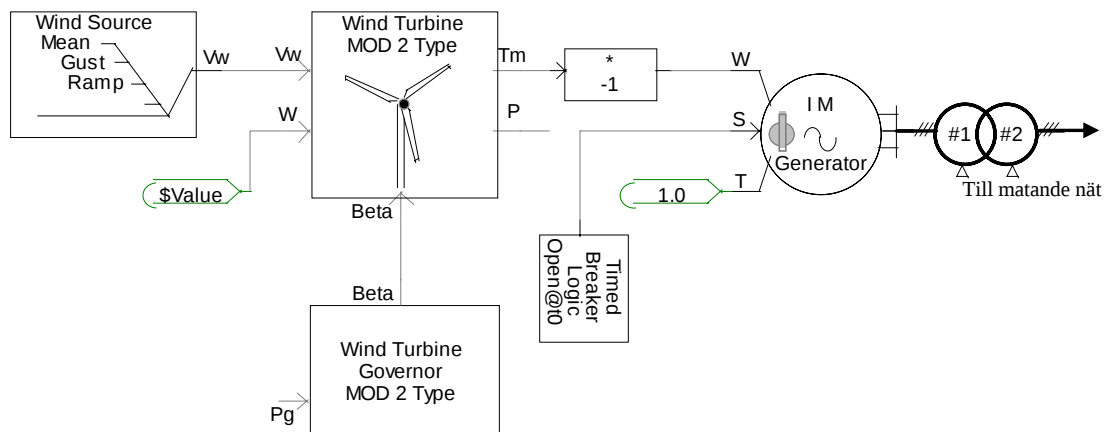
Dynamiska studier går att utföra med olika programvaror, i denna utredning har programvaran PSCAD/Emtdc version 4.1.1 använts. Samma programvara men en annan version användes för dynamiska studier på vindkraftsparken vid Horns Rev utanför Danmarks kust. Vid Horns Rev användes programmet dels för att bekräfta isolationsnivåer på den marina kabeln och dels för att studera vindkraftparkens dynamiska egenskaper. Simuleringsprogrammet har ett användargrafiskt gränssnitt som tillåter schematisk kretssimulering, körning och analys.

Den version av PSCAD som använts till de dynamiska simuleringarna innehåller moduler för en dynamisk modell av vindkraftverk. Vindkraftsmodellerna är generella och inte representativa för ett specifikt fabrikat eller modell men kan användas som grund för att skapa ett godtyckligt vindkraftverk. I programmet finns tre moduler som tillsammans skapar en modell av vindkraftverkets turbin som i sin tur kan driva en fristående generator. Figur 5.1 visar dessa moduler.



Figur 5.1 Vindkraftsmoduler i PSCAD

Kombinerar modulerna enligt figur 5.1 erhålls som utdata ett moment motsvarande vindturbinens moment som används som indata till en generator. Generatoren kan sedan anslutas till ett nät som används för att överföra den effekt som generatoren producerar. Figur 5.2 visar en mer komplett vindkraftmodell med tillhörande asynkrongenerator som kan anslutas till ett nät via vindkraftverkets aggregattransformator.



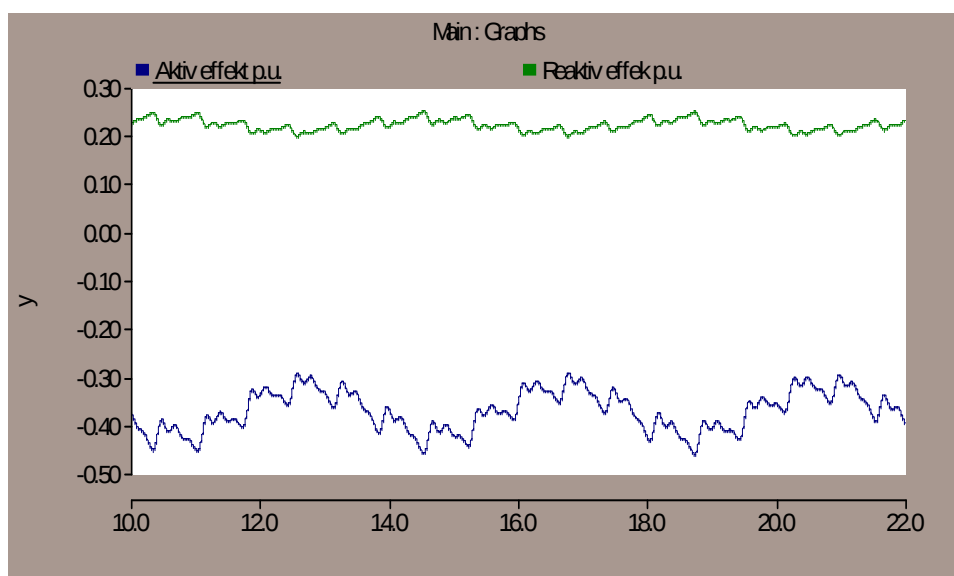
Figur 5.2 Modell av ett vindkraftverk med asynkrongenerator

5.1.1 Beräkning av flicker med Matlab 5.0

Den dynamiska modellen i PSCAD/Emtdc genererar en serie mätdata som representerar effektivvärdet på nätets spänning under en bestämd tidsperiod i en viss punkt i nätet. Eftersom spänningens effektivvärde varierar går det med en standardiserad algoritm för en flickermeter att beräkna ett flickervärde för den givna mätserien, se kapitel 2.3. Serien med simulerade värden från PSCAD/Emtdc förs in i en beräkningsrutin för Matlab som returnerar ett flickervärde för det simulerade fallet.

5.2 Simulerad effektvariation med PSCAD/Emtdc från ett vindkraftverk

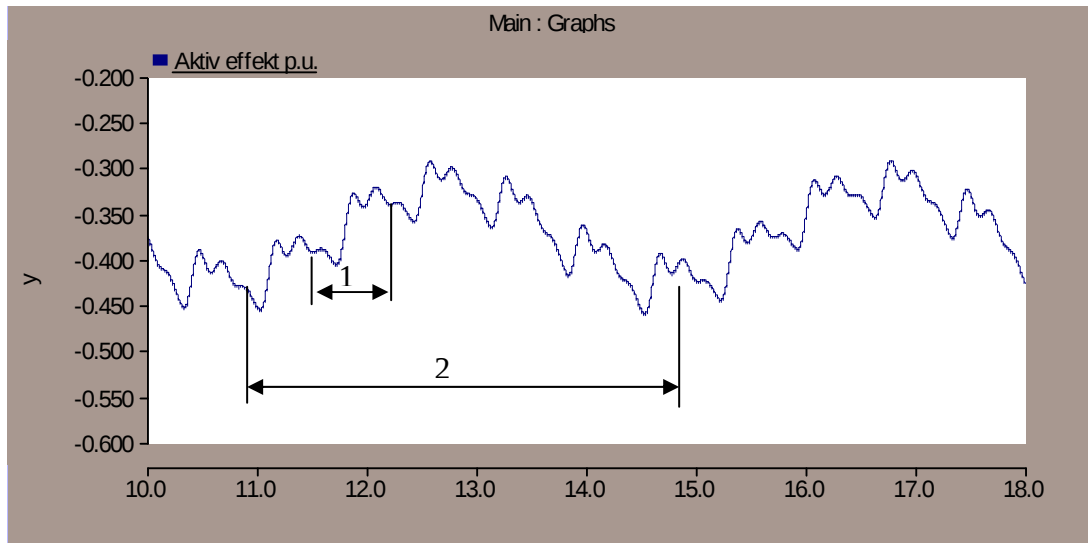
Som tidigare nämnts finns det en karaktäristisk effektvariation från ett vindkraftverk som beror på bl.a. turbinens konstruktion och vindens variation. Denna karaktäristiska effektvariation kan relativt enkelt återskapas genom att effekten dels varierar med ca 0,25 Hz och dels med ca 1,5 Hz. Figur 5.3 visar den simulerade aktiva och reaktiva effekten från ett vindkraftverk.



Figur 5.3 Aktiv och reaktiv effekt från ett vindkraftverk (motoriska referenser)

Vinden är stokastisk vilket innebär att den är statistisk slumpmässig. För att naturtroget efterlikna den stokastiska vinden krävs långa simuleringar. Långa simuleringstider gör att resultatdata växer till ohanterlig volym. Av detta skäl har simuleringstiderna hållits nere. För att kunna göra relevanta bedömningar som korresponderar mellan olika simuleringsfall har samma effektvariationer använts i samtliga fall.

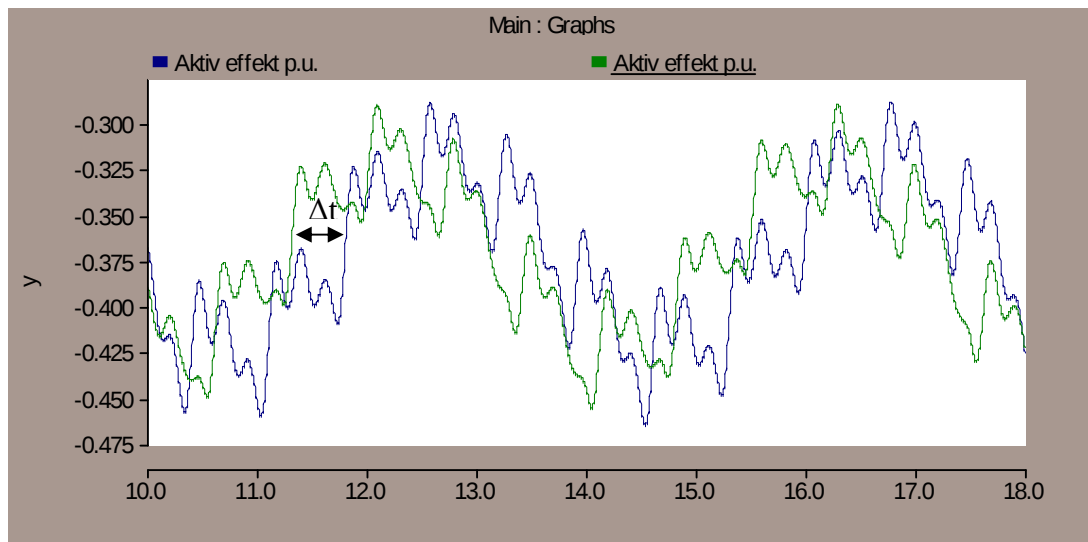
Figur 5.4 visar två olika frekvenskomponenter i effektvariationerna. Den markering som benämns 1 i figuren motsvarar den effektvariation som orsakas av tornskuggan. Den markering som benämns 2 motsvarar den effektvariation som uppstår beroende på vindens typiska variation.



Figur 5.4 Karaktäristisk effektvariation från ett vindkraftverk (motoriska referenser)

5.3 Simulering effektvariationer i PSCAD/Emtdc från flera vindkraftverk

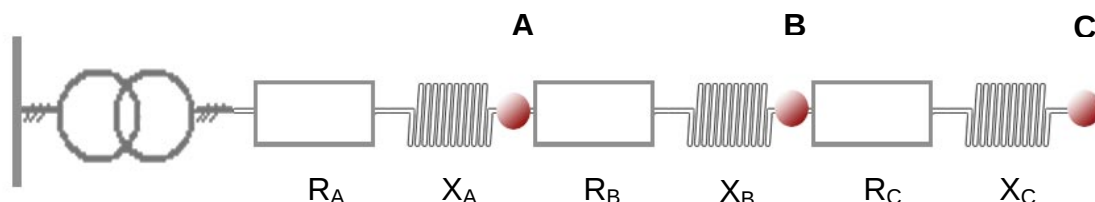
Flicker från flera vindkraftverk kan i samma punkt räknas samman med givet samband, se ekvation 3.2. För att åstadkomma ett fall där flera verk ingår i en simulering kan t.ex. effektkurvan i figur 5.4 förskjutas något. Fallet med förskjutna effektkurvor representerar två verk som står en bit från varandra och därmed träffas av ungefär samma vindhastighet vinden med en viss tidsdifferens, se figur 5.5.



Figur 5.5 Tidförskjutna effektvariationer från två vindkraftverk (motoriska referenser)

5.4 Simulerat nät

Vanligt förekommande är vindkraftverk anslutna till elnät på landsbygden, nät där kablar blir allt mer vanligt förekommande. Det simulerade nätet är valt som ett nät av kabelkaraktär. Simuleringen är utförd längs en linje med spänningen 10 kV. Linjen matas via en transformator med omsättningen 40/10 kV. Figur 5.6 visar simulerad linje.



Figur 5.6 Elektrisk ekvivalent modell av simulerad nätradio.

På linjen i figur 5.6 visas tre impedanser. Den första impedansen från vänster begränsar kortslutningseffekten så att den simulerade punkten A representeras av en punkt relativt långt ut i nätet, jfr även figur 4.1. Impedansen består av en resistiv del, R_A , och en induktiv del, X_A . De två andra impedanserna (B och C) representerar vardera en 5 km lång typisk PEX-kabel med arean 95 mm².

5.5 Resultat flicker längs en radial

Simuleringarna visar att flicker fortplantar sig obehindrat ut i nätet mot lägre kortslutningseffekt. Det innebär att den flickernivå som genereras i punkt B, inte dämpas utan är oförändrad till amplitud. Om ytterligare ett vindkraftverk installeras i C kan de olika flickeremissionerna räknas samman enligt ekvation 3.2 till ett totalt flicker i punkt C.

Tabell 5.1 visar resultatet från tre olika fall med olika kortslutningseffekter. De simulerade fallen motsvarar kortslutningseffekterna 10, 15 och 20 MVA i punkt A.

Tabell 5.1 Simulerat och beräknat flicker ut med en radial

Sk i punkt A (MVA)	Simulerat och uppmätt flicker	Transponerat flicker	Approximerat flicker	Reducerat flicker %
10	0,1434	0,1443	0,1578	9%
15	0,1038	0,1032	0,1138	9%
20	0,0696	0,0691	0,0783	12%

Kolumnen "Simulerat och uppmätt flicker" anger flickernivån i anslutningspunkten A när ett vindkraftverk ansluts i B och ett i C. En simulerad flickermätning sker i detta fall i punkt A. Kolumnen "Transponerat flicker" visar även den flickernivån i A, skillnaden är att detta flickervärde är framräknat med tidigare antaganden att flicker fortplantas obehindrat utåt i nätet samtidigt som det går att transponera till en högre kortslutningseffekt enligt ekvation 4.4. "Approximerat flicker" avser det flicker som erhålls om bägge vindkraftverken ansluts i sammankopplingspunkten hos abonnenten i A enligt meto-

den ”värsta fallet”. Detta är den metod som kan användas i avsaknad på beräkningsmetod för beskriven sammanlagring och transponering. Kolumnen ”Reducerat flicker” anger i procent hur mycket lägre flickernivån blir om den föreslagna transponerande metoden används istället för den approximativa metoden ”värsta fallet” med bägge vindkraftverken anslutna i sammankopplingspunkten A.

5.6 Tillämpningsexempel

Vid anslutning av vindkraftverk längs en radial kan sammankopplingspunkten hamna på olika ställen. Det innebär att anslutningspunkterna för vindkraftverken kan hamna på både högre och lägre kortslutningseffekt jämfört med sammankopplingspunkten. Detta avsnitt beskriver tre typiska exempel på placeringar av vindkraftverk på en landsbygdsradial.

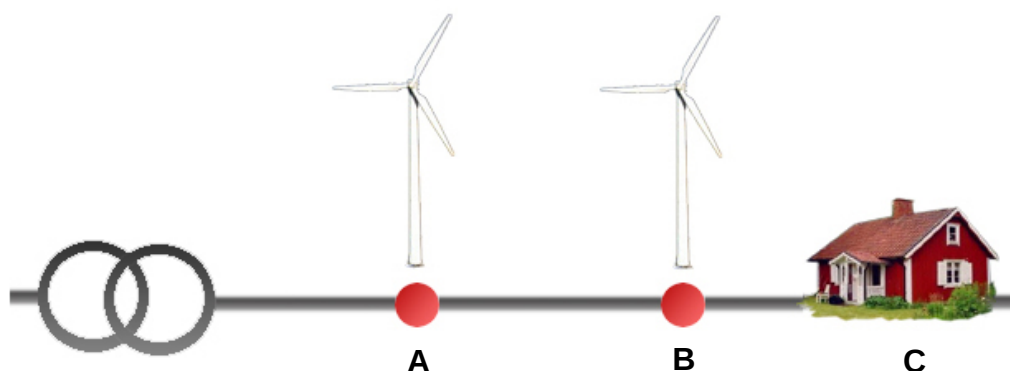
I de tre exempel ansluts vindkraftverk och abonnent i tre olika punkter med olika kortslutningseffekter längs radialen. Följande kortslutningseffekt finns i de tre punkterna, se tabell 5.2.

Tabell 5.2 Kortslutningseffekt i olika punkter

Punkt	Kortslutningseffekt, S_k
A	10 MVA
B	8 MVA
C	6 MVA

Flickerkoefficienten för vindkraftverken antas i samtliga fall till 2,3. Flickerkoefficienten är normalt beroende av nätets kortslutningsvinkel, men eftersom den betraktade delen av radialen är relativt kort är kortslutningsvinkel och därmed flickerkoefficienten i princip konstant. Vindkraftverkens referenseffekt antas till 0,5 MVA.

5.6.1 Vindkraftsradial med sammankopplingspunkten i punkten med lägst kortslutningseffekt



Figur 5.7 Vindkraftsradial

Flickeremissionen i punkt A beräknas:

$$P_{st_A} = c \cdot \frac{s_{ref}}{s_{k_d}} = 2,3 \cdot \frac{0,5}{10} = 0,115 \quad (5.1)$$

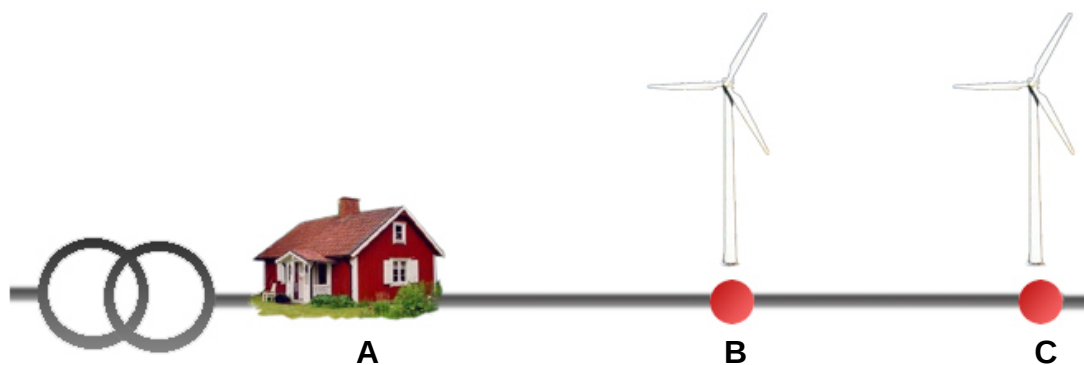
Flickeremissionen i punkt B beräknas:

$$P_{st_B} = 2,3 \cdot \frac{0,5}{8} = 0,144 \quad (5.2)$$

De två störkällornas flickeremissioner fortplantas obehindrat till punkt C, där de kan sammanräknas till en total flickernivå enligt:

$$P_{st_C} = \sqrt{P_{st_A}^2 + P_{st_B}^2} = \sqrt{0,115^2 + 0,144^2} = 0,184 \quad (5.3)$$

5.6.2 Vindkraftsradial med sammankopplingspunkten i punkten med högst kortslutningseffekt



Figur 5.8 Vindkraftsradial

Flickeremissionen i punkt B beräknas:

$$P_{st_B} = 2,3 \cdot \frac{0,5}{8} = 0,144 \quad (5.4)$$

Flickeremissionen i punkt C beräknas:

$$P_{st_C} = 2,3 \cdot \frac{0,5}{6} = 0,192 \quad (5.5)$$

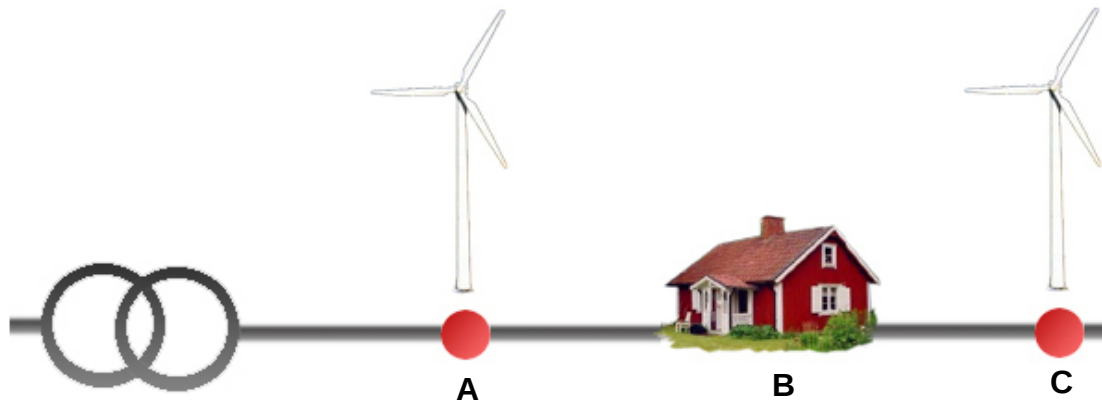
Flickeremissionen i punkt B fortplantas obehindrat till punkt C där den totala flickeremissionen beräknas enligt:

$$P_{st_{tot}} = \sqrt{0,144^2 + 0,192^2} = 0,24 \quad (5.6)$$

Den resulterande flickernivån i punkt A beräknas genom att det totala flickret i punkt C transponeras till punkt A.

$$P_{st_A} = P_{st_{tot}} \cdot \frac{s_{k_C}}{s_{k_A}} = 0,24 \cdot \frac{6}{10} = 0,144 \quad (5.7)$$

5.6.3 Vindkraftsradial med sammankopplingspunkten i en punkt mellan vindkraftverk



Figur 5.9 Vindkraftsradial

Flickeremissionen för de enskilda vindkraftverken beräknas enligt ekvation 5.1 och 5.5. Flickret från vindkraftverket i punkt A fortplantas obehindrat till sammankopplingspunkten i punkt B. Flickeremissionen i punkt C transponeras till punkt B enligt:

$$P_{st_C}' = P_{st_C} \cdot \frac{s_{k_C}}{s_{k_B}} = 0,192 \cdot \frac{6}{8} = 0,144 \quad (5.8)$$

Den resulterande flickernivån i punkt B beräknas:

$$P_{st_B} = \sqrt{P_{st_A}^2 + P_{st_C}'^2} = \sqrt{0,115^2 + 0,144^2} = 0,184 \quad (5.9)$$

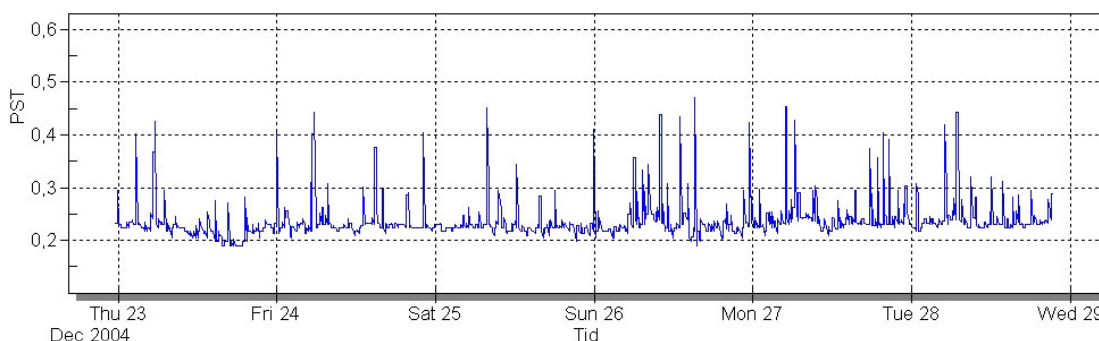
6 Flicker på olika spänningsnivåer

Betraktat från transmissionsnätet ned mot lägre spänningsnivå, avtar kortslutningseffekten i och med att impedansen i nätet ökar. Detta gör att samma effektvariation injicerade i olika ställen i nätet kommer att emittera olika flicker. Flickeremissionen ökar alltså med andra ord med sjunkande kortslutningseffekt, dvs. lägre spänningsnivå.

Antag att en störkälla ansluts till nivån 50 kV och orsakar ett visst flicker i anslutningspunkten. Detta innebär att hela det underliggande nätet antar minst samma flickernivå. I det underliggande nätet återfinns, förutom flickeremissionerna på det överliggande 50 kV nätet, även den flickeremission som andra källor orsakar. Om störkällan istället ansluts långt ut i nätet och skapar ett motsvarande flicker på t.ex. 10 KU-nivå, avtar detta dock uppåt i spänningsnivå till följd av den ökande kortslutningseffekten.

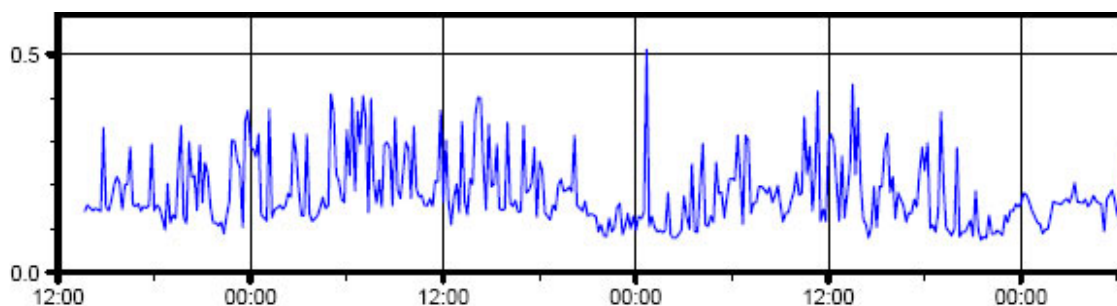
6.1 Flickermätningar i typiska landsbygdsnät

Ett högt flicker långt ut i nätet har en betydligt lägre påverkan för det övriga nätet jämfört med ett flicker högt upp i nätet. Figur 6.1 visar flicker i ett typiskt landsbygdsnät på 10 kV. I detta fall är flickernivån knappt 0,25 med undantag från några toppar per dygn



Figur 6.1 Uppmätt flicker på 10 kV distributionsradial i Falbygden

På samma sätt visar figur 6.2 uppmätt flicker på ett annat typiskt landsbygdsnät på 10 kV i Grästorp. Mätningen visar en ungefärlig flickernivå på 0,2.

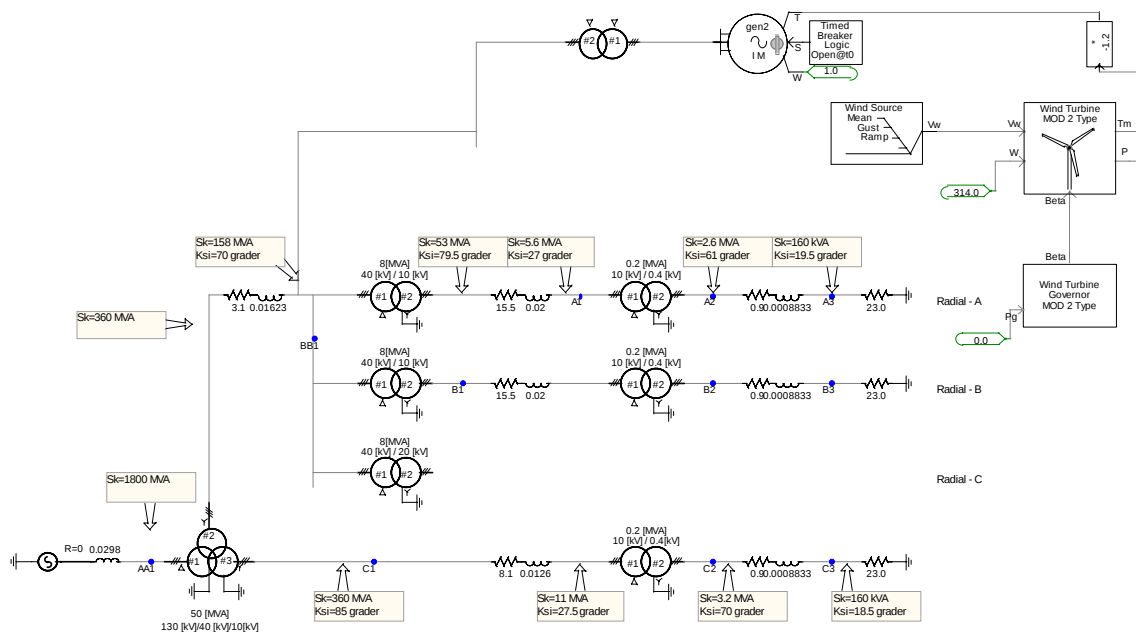


Figur 6.2 Uppmätt flicker på 10 kV, distributionsradial i Grästorp

Flickermätning utförd på regionnätet vid 55 kV på Öland [8], vilken visar på ett ungefärligt flicker på nätet på $P_{st}=0,1$. Dessa mätningar är representativa och visar typiska flickernivåer på nätet vid dess spänningsnivåer. Mätningarna visar att flickret avtar med ökande kortslutningseffekt. Det är rimligt eftersom en stor del av flickret på nätet orsakas av lastväxlingar hos abonnenter, stora som små. Flickret genererat på en högre spänningsnivå fortplantas ut i nätet mot lägre spänningsnivå och adderas där med störningar från abonnenter på denna nivå.

6.2 Simuleringar på olika spänningsnivåer

Genom att bygga ett i nät i PSCAD med olika spänningsnivåer kan flickerdistributionen studeras, se fig 6.3.

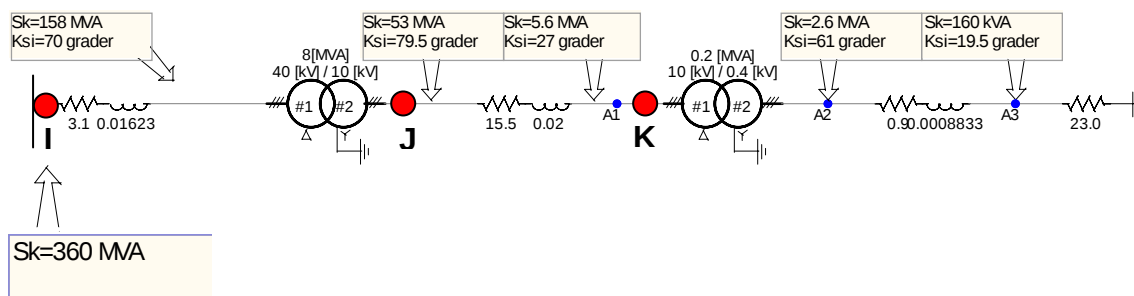


Figur 6.3 Nätmodell med olika spänningsnivåer i PSCAD

Vid höga kortslutningseffekter som förekommer vid t.ex. 130 kV krävs stora effektvariationer för att skapa flickeremission på t.ex. $P_{st}=0,25$. För att skapa så stora effektvariationer krävs orimligt stora vindkraftsparker. Simuleringar med befintlig vindkraftsmodell bekräftar att störningarna bli obefintliga. Som tidigare visats ger en simulerad effektvariation applicerad på 10 kV-nivå ett flicker som fortplantas obehindrat ut till abonnenten på 0,4 kV-nivå. Om flickermätningen istället sker på 40 kV-nivå på transformatorns högspänningssida, med störkällan på 10 kV, har flickret till största delen avtagit beroende på att kortslutningseffekten är betydligt högre på transformatorns högspänningssida jämfört med på lågspänningssidan. Simuleringarna visar att en hög flickernivå högt upp i nätet har stor betydelse för flickernivån på underliggande nät. På samma sätt visar simuleringar att en hög flickernivå på underliggande nät inte ger något mätbart flicker högre upp i nätet.

6.2.1 Beräknade flickervärden för olika spänningsnivåer

Figur 6.4 visar ett radialnät som består av olika spänningsnivåer. Till vart och ett av de olika anslutningspunkterna har en fiktiv vindkraftspark bestående av 10 stycken 850 kW vindkraftverk anslutits och varvid flickernivån i punkterna I, J och K beräknas. I punkt I är kortslutningseffekten hög varför flickret i denna punkt blir nästan obefintligt. Punkt J finns på nedsidan av en transformator vilket innebär att nätimpedansen öka relativt mycket pga. kortslutningseffekten minskat. När samma störkälla appliceras erhålls ett betydligt högre flicker. I punkten K har kortslutningseffekten sjunkit till mycket låg nivå vilket leder till ett högt flicker erhålls. Resultatet presenteras i tabell 5.1.



Figur 6.4 Radial med olika fiktiva anslutningspunkter på olika spänningsnivåer för en vindkraftspark på 8,5 MW

Tabell 6.1 Beräknat flicker enl. AMP från en vindkraftspark i olika anslutningspunkter

Anslutningspunkt	I	J	K
I	0,021	0,021	0,021
J	0,021	0,14	0,14
K	ca 0,023	ca 0,15	1,45

De celler i tabell 6.1 som är markerade (II, JJ och KK) avser anslutningspunkten och den flickernivå som erhålls där vindparken ansluts. De övriga cellerna är flickernivån i de andra punkterna på radialen. Anledningen att vissa värden är ungefärliga beror på att kortslutningsvinkeln inte kan antas konstant vid transponering av flicker mellan olika punkter upp i nätet.

Värdena för flicker i anslutningspunkten är beräknade enligt ekvation 3.1 och 3.2. Utåt i nätet fortplantar sig flicker obehindrat varför hela nätet under anslutningspunkten får samma flickernivå som anslutningspunkten. När flickret transponeras till en högre nivå i ekvation 4.4 erhålls en lägre flickernivå i de punkter som har en med högre kortslutningseffekt.

7 Diskussion om flicker och flickernivåer

Rapporten tar upp två huvudsakliga frågeställningar kring flicker. Dels hur flicker fortplantas och sammanlagras längs en radial och dels hur flicker distribueras i en större del av ett nät med flera olika spänningsnivåer och därmed olika kortslutningseffekter. Det har under studiens gång framkommit frågeställningar kring hur flicker från flera vindkraftverk sammanlagras och om det är troligt att sammanlagringen sker på samma sätt oberoende av vindkraftverkens typ.

Om den installerade vindkraftseffekten jämförs med kortslutningseffekten i anslutningspunkten erhålls en kortslutningskvot (eng. short-circuit ratio, SCR). Om ett nät är svagt i förhållande till den installerade effekten, dvs. att kortslutningskvoten är låg, kan sammanlagring av flicker ske på ett sätt som inte är stokastiskt, dvs. på ett sätt som inte överensstämmer med AMP. IEC standard 61400-21 [6] som ligger till grund för AMP, anger att flickret från flera vindkraftverk sammanlagras stokastiskt om kortslutningseffekten är hög. Om däremot kortslutningskvoten är låg anger IEC standarden att det finns risk att sammanlagringen underskattas, något som bekräftas av flickermätningar från vindparken Utgrunden där kortslutningskvoten är 6,3 [9]. Mätresultaten från Utgrunden visar att det sammanlagrade flickret i anslutningspunkten ligger mellan antalet turbiner multiplicerad med flickeremissionen för ett vindkraftverk och roten ur antalet turbiner multiplicerad med flickeremissionen för ett vindkraftverk.

Om kortslutningskvoten är hög sker sammanlagring enligt IEC och AMP men om kortslutningskvoten är låg fås en underskattning av flickret. Vart gränsen går, dvs. vad som är att anse som hög respektive låg kortslutningskvot är ej fastlagt. Om nätet är starkt uppkommer inte dessa fenomen varför det är av intresse att utreda vid vilken kortslutningskvot som avvikelserna uppstår och därmed avgöra när sambandet för stokastiskt sammanlagrat flicker inte gäller.

AMP anger som rekommendation att flickret orsakat av vindkraft inte bör överstiga $P_{st}=0,25$ i sammankopplingspunkten. Detta är ett gränsvärde som gäller generellt för alla spänningsnivåer. Eftersom flicker fortplantar sig obehindrat utåt i nätet innebär det att en hög flickeremission på hög spänningsnivå högt upp i nätet har stora konsekvenser eftersom det underliggande nätet antar minst samma flickernivå. Om motsvarande flickernivå erhålls när vindkraftverk ansluts på en lägre spänningsnivå fås en betydligt mer begränsad flickerspridning. Av det skälet borde gränsvärdet för flicker vara lägre på högre spänningsnivåer jämfört med gränsvärdet för lägre spänningsnivåer. Exakt vart flickernivån skall ligga på en lägre spänningsnivå bör med avseende på tidigare oklarhet om sammanlagring utredas närmare.

8 Slutsats

Resultaten av simuleringarna och beräkningarna visar att flicker från olika störkällor fortplantas obehindrat mot lägre kortslutningseffekt ut i nätet. Det innebär att om flera störkällor ansluts till en och samma radial kommer ett resulterande flicker motsvarande det från alla störkällor att uppträda i nätets svagaste punkt.

Om en sammankopplingspunkt finns på en högre kortslutningseffekt i förhållande till störkällan kommer flickernivån i sammankopplingspunkten vara lägre än den i störkällans anslutningspunkt. Det beror på att flickernivån i sammankopplingspunkten är beroende av kortslutningsimpedansen fram till det ställe där flickret betraktas. Det är alltså inte ledningens elektriska egenskaper i sig som dämpar flickret utan flickerreduktionen beror i första hand på kortslutningsimpedansen fram till mätstället.

De i rapporten härledda sambanden gör det möjligt att närmare beräkna flickernivån hos en abonnent när vindkraftverk finns anslutna till en andra punkter i nätet.

Eftersom flicker fortplantar sig obehindrat utåt i nätet mot lägre kortslutningseffekt har en hög flickeremission på en hög spänningsnivå (med hög kortslutningseffekt) stor påverkan på underliggande nätet eftersom detta antar minst samma flickernivå som anslutningspunkten. Om störkällor ansluts längre ut i nätet blir konsekvenserna betydligt mindre eftersom flickret avtar med den ökande kortslutningseffekten, dvs. flickerstörningarna fortplantas inte uppåt i nätet. Det vore därför rimligt med ett lägre gränsvärde vid högre spänningsnivåer.

Ett problem vid lägre spänningsnivåer där kortslutningseffekten är låg är den osäkerhet som finns kring sammanlagringen av flicker från vindkraftverk. Vid hög kortslutningskvot är sammanlagringen att betrakta som stokastisk vilket innebär att den totala flickernivån i anslutningspunkten är proportionell mot kvadraten ur antalet turbiner. Vid låga kortslutningseffekter visar mätningar på högre total flickernivå.

För att utreda vart denna gräns mellan hög och låg kortslutningskvot ligger krävs mätningar från vindkraftverk och grupper av vindkraftverk anslutna till nät med låg kortslutningskvot. Mätningarna bör omfatta både spänningen på det ostörda nätet och effekten från vindkraftverken. Dessa mätningar måste sedan kompletteras med dynamiska simuleringar.

9 Referenser

- [1] International Electrotechnical Commission, IEC Standard, Publication 868, Flickermeter – Functional and Design Specifications, 1990.
- [2] International Electrotechnical Commission, IEC Standard, Amendment 1 to Publication 868, Flickermeter – Functional and Design Specifications, 1990.
- [3] Wiin-Nielsen, A.C., et al., "Meteorological aspects of the utilization of wind as an energy source", Geneva, Switzerland, Secretariat of the World Meteorological Organization; Technical note no. 175, 1981.
- [4] Larsson, Å., "Vindkraft i lokala och regionala nät – elektriska egenskaper och elkvalitet", Elforsk Rapport 98:20, Oktober 1998.
- [5] International Electrotechnical Commission, IEC Standard, Publication 61000-3-7, Electromagnetic compatibility, Limitation of voltage fluctuations and flicker equipment connected to medium and high voltage power supply systems, 1995
- [6] International Electrotechnical Commission, IEC Standard, Publication 61400-21, Wind turbine generator systems – Measurements and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines, 2000.
- [7] Anslutning av Mindre Produktionsanläggningar till elnätet (AMP), Sveriges elleverantörer, 1999.
- [8] Thiringer, t., Pertru, T., Lundberg, S., "Flicker contribution from wind turbine installations, IEEE transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, pp. 157-163, March 2004.
- [9] Thiringer, T., "Power Quality evaluation of the Utgrunden Wind Park", Department of Energy and Environment, Technical report No. 2005-32R, Chalmers University of technology, Göteborg, Sweden, 2005.
- [10] Manitoba HVDC Research Centre: User's Guide on the Use of PSCAD, April 30, 2004, Version 4.1.0

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31

Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35

www.elforsk.se